

**IRRIGAÇÃO
DA CONSERVAÇÃO DE ÁGUA
E SOLO À SUSTENTABILIDADE
COM VISTAS À AUTOGESTÃO**

IRRIGAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE ÁGUA E SOLO À SUSTENTABILIDADE COM VISTAS À AUTOGESTÃO

Organizadores
José Antonio Frizzone
Sílvio Carlos Ribeiro Vieira Lima
Raimundo Nonato Távora Costa



Fortaleza - CE
2014

IRRIGAÇÃO

Da Conservação de Água e Solo à Sustentabilidade com Vistas à Autogestão

Editoração Eletrônica
Byte Systems - Soluções Digitais

Revisão de Texto e Normatização
Maria Sônia Pereira de Azevedo

Capa
Rogis Rosemberg R. Gomes

Dados da Publicação para Catalogação

Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada – INOVAGRI

T266 Irrigação: da conservação de água e solo à sustentabilidade com vistas à autogestão / José Antonio Frizzone, Sílvio Carlos Ribeiro Vieira Lima, Raimundo Nonato Távora Costa – Fortaleza, CE: INOVAGRI, 2014. 129 p. : il, 15,5 x 21,0 cm

ISBN 978-85-67668-05-5

1. Recursos Hídricos. 2. Irrigação. 3. Drenagem Agrícola. I. Frizzone, José Antonio. II. Lima, Sílvio Carlos Ribeiro Vieira. III. Costa, Raimundo Nonato Távora. IV. INOVAGRI.

CDD 333.91

Os temas, dados, figuras e conceitos emitidos neste livro, são de exclusiva responsabilidade dos respectivos autores. A eventual citação de produtos e marcas comerciais não significa recomendação de utilização por parte dos autores/editores. A reprodução é permitida desde que seja citada a fonte.

Apresentação

A agricultura irrigada utiliza entre 70% e 80% da água doce disponível e sua importância tem aumentada em virtude da necessidade de incremento da produção agrícola, em função do crescimento populacional, o que provoca escassez e degradação dos recursos hídricos. Por sua vez, a irrigação provoca impactos sobre o meio ambiente, o que requer a promoção de ações e práticas de manejo, que induzam o uso racional dos recursos água e solo.

De acordo com a “conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – 2013”, produzido pela Agência Nacional de Águas – ANA, citando os dados da FAO e do IBGE, o Brasil está entre os quatro países com maior área potencial para a irrigação, embora apenas uma pequena parte seja utilizada (5,8 milhões de hectares) o que corresponde a 19,6% do potencial nacional de 29,6 milhões de hectares.

Nos distritos de irrigação, o desempenho da eficiência do sistema pode não ser elevado devido às deficiências das instalações hidráulicas de distribuição bem como ao inadequado manejo da água pelo usuário. Assim, é de fundamental importância a elaboração de documentos técnicos e científicos para a divulgação dos conhecimentos e que passam a apoiar o desenvolvimento e a capacitação profissional de recursos humanos na agricultura irrigada.

Dentro desse contexto, torna-se extremamente louvável esta iniciativa dos organizadores deste Livro, que trata da conservação de água e solo à sustentabilidade com vista à autogestão.

No primeiro capítulo, os autores dedicam-se à aplicação da “estatística multivariada” e da inteligência artificial como ferramenta para a tomada de decisão no processo de autogestão em perímetros públicos federais. Em seguida, o segundo capítulo trata da “eficiência e uniformidade da irrigação: possibilidades técnicas e econômicas para melhoria”, em que o autor faz uma intensa análise desde o balanço hídrico em campos irrigados até os fatores que afetam o desempenho dos sistemas.

A estimativa da perda de solos na irrigação por superfície é o tema considerado no capítulo 3, visando o uso racional da água nos sistemas por superfície e, finalmente, os indicadores de desempenho da irrigação em áreas coletivas é o 4º Capítulo que apresenta os conceitos relativos a este tema fundamental relativo à produtividade da água, indicando metodologias de manejo e de avaliação.

Este livro pretende contribuir com as questões relacionadas, principalmente aos Distritos Públicos de Irrigação, discutindo a conservação da água e a gestão da irrigação.

Francisco de Souza
Ph.D em Engenharia Agrícola

Sumário

Apresentação v

1 - Estatística Multivariada e Inteligência Artificial como Ferramentas para Tomada de Decisão no Processo de Autogestão em Perímetros Irrigados Públicos Federais 11

Fabrcício M. Gonçalves, Raimundo N. T. Costa,
Renato S. da F. Ribeiro & Julien D. Burt

1 Introdução 12

2 Ferramentas de apoio à tomada de decisão 13

3 Identificação de padrões nos perímetros irrigados 14

3.1 Análise multivariada dos indicadores de desempenho dos perímetros e criação de modelo estatístico de desempenho 14

3.2 Criação da Rede Neural Artificial para identificação de padrões não lineares 17

3.3 Variáveis analisadas 19

3.4 Indicadores de Desempenho 20

3.5 Indicadores de desempenho 23

3.6 Modelo estatístico de desempenho e agrupamento dos perímetros 25

4 Determinação dos pesos para rede neural artificial 28

5 Aplicação da metodologia 31

6 Conclusões 33

Referências bibliográficas 33

2 - Eficiência e Uniformidade da Irrigação: Possibilidades Técnicas e Econômicas para Melhoria 35

José A. Frizzone

1 Introdução 36

2 Balanço hídrico em campos irrigados 38

3 Partição da água aplicada por irrigação 39

4 Necessidade de água de ecossistemas cultivados 42

5 Medidas de desempenho da irrigação 43

5.1 Indicadores de eficiência 43

| | |
|---|----|
| 5.2 Indicadores de uniformidade | 48 |
| 5.3 Grau de adequação | 51 |
| 6 Fatores que afetam o desempenho do sistema de irrigação | 55 |
| 6.1 Sistemas de irrigação por aspersão | 55 |
| 6.2 Sistemas de microirrigação | 58 |
| 6.3 Sistemas de irrigação por superfície | 61 |
| 7 Indicadores de produtividade da água | 62 |
| 7.1 Produtividade da água – Conceitos | 62 |
| 7.2 Fatores que afetam a produtividade da água | 66 |
| 7.3 Técnicas para aumentar a produtividade da água | 70 |
| 7.4 Irrigação com déficit em condições de água escassa | 70 |
| 8 Conclusões e perspectivas futuras | 77 |
| Referências bibliográficas | 78 |

3 - Estimativa da Perda de Solo na Irrigação por Sulcos 83

D. F. Araújo, R. N. T. Costa, L. Mateos & J. C. Araújo

| | |
|--|-----|
| 1 Introdução | 84 |
| 2 Irrigação por superfície e a erosão na irrigação por sulcos | 85 |
| 3 Caracterização do estudo | 89 |
| 3.1 Unidade textural franco arenosa (área B-T2): caracterização, período e condução do experimento | 92 |
| 3.2 Unidade textural franco argilo siltosa (área C-S2): caracterização, período e condução do experimento | 93 |
| 3.3 Variáveis analisadas | 93 |
| 3.3.1 Medidas de desempenho do sistema | 93 |
| 3.3.2 Concentração de sedimentos na água de irrigação | 98 |
| 3.3.3 Perdas de solo | 101 |
| 4 Conclusões | 108 |
| Referências bibliográficas | 108 |

4 - Indicadores de Desempenho de Áreas Coletivas de Irrigação 113

Sílvio C.R.V. Lima & Francisco de Souza

| | |
|---|-----|
| 1 Introdução | 114 |
| 2 Avaliação da irrigação em perímetros irrigados: Indicadores de desempenho | 115 |
| 3 Avaliação econômica da irrigação | 117 |
| 4 Avaliações hidrológicas e da irrigação de áreas agrícolas: O exemplo das pesquisas no Projeto Genil-Cabra, Espanha | 118 |
| 5 Balanço de água na área e índices de irrigação | 122 |
| 6 Indicadores socioeconômicos de áreas irrigadas | 124 |
| 6.1 Avaliação econômica | 124 |

| | |
|--|-----|
| 6.2 Avaliação das receitas líquidas e brutas | 125 |
| 6.3 Relação benefício/custo | 126 |
| 7 Serviço de Assessoramento ao Irrigante (SAI) do INOVAGRI | 126 |
| 7.1 Contextualização | 126 |
| 7.2 Descrição dos indicadores | 127 |
| 8 Conclusões | 128 |
| Referências bibliográficas | 129 |

Estatística Multivariada e Inteligência Artificial como Ferramentas para Tomada de Decisão no Processo de Autogestão em Perímetros Irrigados Públicos Federais

**Fabrcio M. Gonalves¹, Raimundo N. T. Costa¹,
Renato S. da F. Ribeiro¹ & Julien D. Burt¹**

¹ Universidade Federal do Ceará

- 1 Introdução
 - 2 Ferramentas de apoio à tomada de decisão
 - 3 Identificação de padrões nos perímetros irrigados
 - 3.1 Análise multivariada dos indicadores de desempenho dos perímetros e criação de modelo estatístico de desempenho
 - 3.2 Criação da Rede Neural Artificial para identificação de padrões não lineares
 - 3.3 Variáveis analisadas
 - 3.4 Indicadores de Desempenho
 - 3.5 Indicadores de desempenho
 - 3.6 Modelo estatístico de desempenho e agrupamento dos perímetros
 - 4 Determinação dos pesos para rede neural artificial
 - 5 Aplicação da metodologia
 - 6 Conclusões
- Referências bibliográficas

Irrigação da Conservação de água e Solo
 Sustentabilidade com Vistas  Autogestão
ISBN 978-85-67668-05-5

INOVAGRI
INSTITUTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO NA AGRICULTURA IRRIGADA

Fortaleza - CE
2014

1

Estatística Multivariada e Inteligência Artificial como Ferramentas para Tomada de Decisão no Processo de Autogestão em Perímetros Irrigados Públicos Federais

1 INTRODUÇÃO

A transferência da gestão, do setor público para o privado, dos perímetros irrigados tornou-se uma estratégia ampla na Ásia, África e América Latina como forma de melhorar o processo de gestão, aumentando dessa forma a participação dos irrigantes nas tomadas de decisões administrativas, possibilitando teoricamente um melhor desempenho dos perímetros irrigados devido o envolvimento mais efetivo dos mesmos.

Os primeiros esforços para transferência de gestão dos perímetros irrigados de governo para as organizações de agricultores ocorreram nos Estados Unidos da América (EUA), França, Colômbia e Taiwan, a partir da década de 1950 até a década de 1970 (VERMILLION, 2001). Em mais de 25 países os governos estão reduzindo seus papéis na gestão dos projetos de irrigação. Apesar da extensão em que a transferência de gestão está sendo implementada em todo o mundo, existem poucas informações internacionais disponíveis sobre os resultados de programas de transferência (VERMILLION, 2001).

Conforme Meinzen-Dick e Raju (2002), uma combinação de deficiências da gestão do Estado nos projetos de irrigação e sérios problemas fiscais voltados ao setor da irrigação têm contribuído para a adoção de políticas de retirada do poder público da administração dos projetos de irrigação em muitos países. Isso se tornou um fenômeno generalizado em resposta ao baixo desempenho dos perímetros e restrições ao financiamento público. Experiências mundiais mostram um quadro misto de resultados positivos e negativos para o processo de autogestão. Turquia, México, EUA e Nova Zelândia são considerados países com programas de transferência da gestão da irrigação (TGI) bem sucedidos (SHAH et al., 2002).

No Brasil, o modelo adotado foi o de delegar a administração, operação e manutenção da infraestrutura de irrigação de uso comum, por meio de contrato, às cooperativas existentes nos perímetros. Entretanto, o resultado não foi positivo (DOURADO et al., 2006). Devido ao fracasso nas primeiras tentativas, adotou-se outro modelo de gestão, com algumas das características da experiência anterior.

Essa organização foi denominada “Distrito de Irrigação” e, de forma precursora, constitui-se em uma organização típica do que, posteriormente, veio a ser conhecido como “terceiro setor”.

Diante das dificuldades enfrentadas pelos perímetros irrigados, algumas técnicas para auxiliar o processo de gestão dos mesmos são abordadas na literatura científica, dentre as quais temos a análise multivariada e a inteligência artificial. A análise discriminante é uma estatística multivariada que permite estudar e evidenciar as ligações, as semelhanças e as diferenças existentes entre todas as variáveis envolvidas em um determinado processo (PREARO et al., 2010). A necessidade de entender a relação entre diversos indicadores faz da análise multivariada discriminante uma metodologia com grande potencial de uso para identificar quais indicadores são mais importantes no processo de autogestão dos perímetros irrigados. Já as redes neurais artificiais, uma das aplicações da inteligência artificial, configuram como ferramenta auxiliar no processo de diferenciação de padrões, podendo ser aplicada para diferenciar o nível de autogestão dos perímetros irrigados automaticamente por meio de indicadores.

Costa et al. (2011) e Dourado et. al. (2006) apresentaram os principais indicadores utilizados pelo Tribunal de Contas da União do Brasil (2002) para o monitoramento dos perímetros irrigados. Os mesmos são considerados como ferramentas de avaliação sistemática, constituindo-se em subsídio para identificar as deficiências de programação e de execução.

Riesgo e Gómez-Limón (2006) mencionaram a utilização de indicadores que permitem analisar os potenciais impactos econômicos, sociais e ambientais dos vários cenários políticos sobre a agricultura irrigada a partir de um ponto de vista público. Os mesmos autores relataram que os indicadores devem ser considerados como critérios públicos em que as decisões políticas podem ser baseadas. (OECD) (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico) (OCDE, 2001).

2 FERRAMENTAS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO

O principal objetivo da Análise Multivariada Discriminante (AMD) é verificar as diferenças existentes entre grupos definidos a priori a partir de uma série de variáveis independentes, selecionadas, a partir de um modelo teórico. Assim, trata-se de uma técnica estatística apropriada para identificar as variáveis que melhor separam uma população em diferentes grupos.

Essa técnica possibilita inicialmente identificar as variáveis mais importantes no processo discriminatório entre grupos, gerando um modelo estatístico que tem a capacidade de classificar determinados elementos em seus respectivos grupos conforme o seu padrão que reflete por meio de uma pontuação individual para cada elemento avaliado. Entretanto, os dados a serem utilizados para gerar o modelo dependem de algumas premissas para que o mesmo seja significativo. Faz-se

necessária uma análise e refinamento desses dados para que possam ser utilizados nesse procedimento estatístico. Para evitar problemas de quebra de premissas, outras técnicas não lineares podem ser utilizadas apenas para classificar elementos em seus respectivos grupos baseado em informações já conhecidas de classificação. Uma das técnicas mais promissoras, como sugerido por Krugman (1994), é a técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA).

A utilização das duas técnicas em conjunto proporciona a análise de comportamentos lineares e não lineares no processo discriminatório de grupos. Dessa forma, a AMD inicialmente determina a(s) variável (is) mais importante no processo discriminatório dos grupos e gera uma pontuação que identifica a que grupo aquele elemento pertence. A RNA com base nos mesmos dados utilizados na AMD (sem tratamento) e o resultado gerado por ela (pontuação) é treinada com o objetivo de assimilar os padrões e conseguir chegar ao mesmo resultado obtido pela AMD em processo denominado aprendizado da RNA. Com isso, após o aprendizado da RNA, a mesma pode suportar a inserção de valores lineares e não lineares e fazer referência ao intervalo de pontuação gerado inicialmente pela AMD proporcionando a classificação de cada elemento em seu respectivo grupo de forma mais ágil e menos complexa.

3 IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES NOS PERÍMETROS IRRIGADOS

A Análise Multivariada Discriminante (AMD) e a Técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA) foram utilizadas para separar os padrões referentes ao desempenho dos Perímetros Irrigados que estão administrativamente sob as responsabilidades do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) e da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf).

3.1 Análise multivariada dos indicadores de desempenho dos perímetros e criação de modelo estatístico de desempenho

Utilizou-se a metodologia proposta por Corrar et al. (2007) para proceder à análise dos indicadores e os “softwares” estatísticos SPSS® versão 13.0 e o aplicativo Action para Excel®, como ferramenta facilitadora no processo de cálculo.

Os indicadores foram adimensionalizados e analisados quanto a sua normalidade, sendo os mesmos submetidos à transformação *Box-Cox*, *uma das possíveis formas de contornar o problema de dados que não obedecem aos pressupostos da análise de variância, como normalidade dos dados*.

Foram avaliadas as condições de normalidade multivariada, a linearidade, ausência de “outliers” (observações atípicas), ausência de multicolineariedade e homogeneidade das matrizes de variância-covariância.

A Tabela 1 foi utilizada para classificar as variáveis categóricas na AMD.

Segundo a Codevasf (2011), a emancipação de um perímetro irrigado significa alcançar, em determinado espaço de tempo, sua autossustentação nos aspectos

Tabela 1 Situação atual da administração dos perímetros irrigados da Codevasf e do Dnocs

| Perímetros irrigados | Administração |
|-----------------------------|----------------------|
| Bebedouro | Autogestão |
| Boacica | Cogestão |
| Curaçá I | Autogestão |
| Estreito | Autogestão |
| Formoso | Cogestão |
| Gorutuba | Autogestão |
| Itiúba | Cogestão |
| Jaíba | Cogestão |
| Lagoa Grande | Autogestão |
| Mandacaru | Autogestão |
| Maniçoba | Autogestão |
| Mirorós | Cogestão |
| Nilo Coelho | Cogestão |
| Nupeba/Riacho Gde. | Cogestão |
| Pirapora | Autogestão |
| São Desidério | Autogestão |
| Tourão | Autogestão |
| Tabuleiros Litorâneos | Cogestão |
| Tabuleiro São Bernardo | Cogestão |
| Caldeirão | Cogestão |
| Platôs de Guadalupe | Cogestão |
| São Gonçalo | Cogestão |
| Moxotó | Cogestão |
| Vaza Barris | Cogestão |
| Brumado | Cogestão |
| Curu-Pentecoste | Cogestão |
| Morada Nova | Cogestão |
| Tabuleiros de Russas | Cogestão |
| Jaguaribe-Apodi | Cogestão |

Fonte: CODEVASF (2006); DNOCS (2011)

econômico, social e político. Trata-se de um processo que, para obter êxito, requer as seguintes etapas: cogestão, autogestão e emancipação.

Com base nas classificações realizadas pela Codevasf e Dnocs em relação aos perímetros irrigados, foram determinadas as variáveis categóricas necessárias para gerar o modelo estatístico preditor do desempenho dos mesmos com relação a sua capacidade de autogestão. As variáveis categóricas serão explicadas pelas variáveis independentes (indicadores). Nesse processo serão atribuídas as notas 1 e 2. Os perímetros que apresentarem nota 1 serão pré-classificados como aptos com relação a sua autogestão, e os que apresentarem nota 2 serão pré-classificados não aptos, portanto, ainda no processo de cogestão (Tabela 2).

Com o propósito de utilizar um modelo estatístico para avaliar se um perímetro irrigado reúne as condições adequadas à autogestão, foi desenvolvida uma função

Tabela 2 Pré-classificação dos Perímetros Irrigados da Codevasf e do Dnocs

| Perímetros irrigados | Administração |
|-------------------------|---------------|
| Bebedouro | 1 |
| Boacica | 2 |
| Curaçá I | 1 |
| Estreito | 1 |
| Formoso | 2 |
| Gorutuba | 1 |
| Itiúba | 2 |
| Jaíba | 2 |
| Lagoa Grande | 1 |
| Mandacaru | 1 |
| Maniçoba | 1 |
| Mirrorós | 2 |
| Nilo Coelho | 2 |
| Nupeba/Riacho Gde. | 2 |
| Pirapora | 1 |
| São Desidério | 1 |
| Tourão | 1 |
| Tabuleiros Litorâneos | 2 |
| Tabuleiros São Bernardo | 2 |
| Caldeirão | 2 |
| Platôs de Guadalupe | 2 |
| São Gonçalo | 2 |
| Moxotó | 2 |
| Vaza Barris | 2 |
| Brumado | 2 |
| Curu-Pentecoste | 2 |
| Morada Nova | 2 |
| Tabuleiro de Russas | 2 |
| Jaguaribe-Apodi | 2 |

linear denominada função desempenho - $f(d)$, sendo a mesma composta pelos indicadores mais significativos estatisticamente, onde:

$$f(d) = X_1EF + X_2IGCH + X_3CUT + X_4Ad + X_5PAC + K \quad (1)$$

sendo:

$f(d)$ - função desempenho

X_1, X_2, X_3, X_4 e X_5 - são os coeficientes dados a cada uma das variáveis (indicadores)

EF - eficiência financeira

GRH - índice de geração de receita por hectare

CUT - coeficiente de utilização da terra

Ad - adimplência

PAC - produtividade da água captada

K - valor da constante.

Utilizou-se a AMD para identificar quais os indicadores mais importantes para discriminar o estágio atual dos perímetros irrigados.

Procedeu-se a uma análise discriminante que permitiu estabelecer a relação da variável não métrica $f(d)$ com as variáveis independentes (indicadores). Para tanto, utilizou-se o aplicativo para análise estatística SPSS® versão 13.0, com intuito de definir a função $f(d)$.

Essa equação determina um escore discriminante para cada observação e o escore médio do grupo. A média do grupo é referida como centróide. Através dos centróides determinou-se o grupo de melhor localização para qualquer caso. O teste de significância estatístico da função discriminante foi medido pela distância entre os centróides dos grupos, ou seja, quanto mais distantes os centróides de cada grupo estiverem, mais as variáveis selecionadas estarão diferenciando os grupos.

Na sequência deu-se início ao procedimento para o uso da AMD, que consistiu em definir os parâmetros com os quais o sistema SPSS® realizou os testes estatísticos e produziu a função discriminante.

Optou-se, então, pelo método “Stepwise” (passo a passo) em que foram selecionadas as variáveis com o maior poder de explicação ou discriminação dentro do processo de análise.

O método utilizado para a inserção das variáveis na função discriminante foi o método de Wilk’s Lambda, que é uma variação do teste F, o qual é obtido, pela razão da variação dentro dos grupos (variação não explicada) sobre a variação total. Varia de 0 a 1, onde os pequenos valores indicam grandes diferenças entre os grupos, enquanto que os valores elevados indicam não haver diferenças entre os mesmos. Atingindo-se determinado nível de significância de Lambda, em que seu valor é minimizado, a variável em questão é selecionada para a função. Esse nível de significância está em função de um valor F ou de probabilidade de F, que implica a inserção de variáveis que tenha um nível igual ou menor que 5%. Isso equivale a um nível de confiança de 95%.

O modelo estatístico possibilitará classificar em ordem decrescente de desenvolvimento (autogestão) os melhores perímetros conforme os principais indicadores escolhidos para compor o modelo.

3.2 Criação da Rede Neural Artificial para identificação de padrões não lineares

Com base na discriminação feita por meio da AMD foi realizada a aplicação da técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA).

Após a classificação dos perímetros aptos a Autogestão ou Cogestão por meio da AMD, foram utilizados parte dos resultados obtidos para o treinamento da RNA por meio da metodologia proposta por Corrar et al. (2009), utilizando o programa computacional QwikNet V.2.23® como ferramenta facilitadora da criação, treinamento e teste da Rede Neural Artificial.

A Rede Neural executada no QwikNet V.2.23® é chamada de “*Multilayer Perceptron*”, que é uma rede composta de diversas camadas. O programa QwikNet

V.2.23[®] oferece uma relação flexível e intuitiva que permite projetar, treinar e testar redes neurais em um ambiente gráfico. Permite projetar a rede usando a interface gráfica e então exportá-la em um de diversos formatos populares incluindo: C/C++, Pascal ou Matlab.

Características do QwikNet V.2.23[®]:

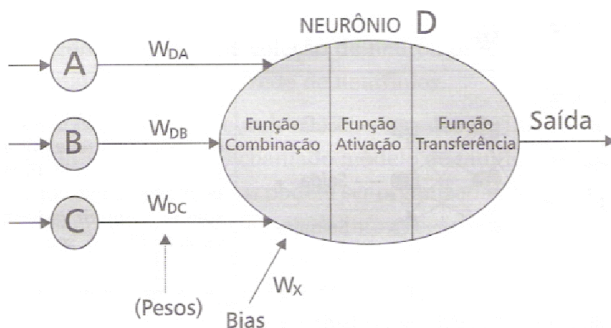
- **Learning Rate:** A taxa de aprendizado controla a taxa à qual a rede aprende. Normalmente, quanto mais alta a taxa de aprendizagem, mais rápido a rede aprende. Se a taxa de aprendizado é muito alta, a rede pode ficar instável.

- **Momentum:** Este parâmetro controla a influência da última mudança de peso na atualização de peso atual. Normalmente, resulta em uma aprendizagem mais rápida, mas pode causar instabilidade em alguns casos se for muito grande.

- **Weights:** Os campos Mínimo e Máximo permitem ao usuário fixar os mais baixos e as mais altas variâncias.

No processo de treinamento da RNA foram utilizados os resultados da função desempenho $f(d)$ dos perímetros irrigados como alvo da Rede Neural e todos indicadores de desempenho dos perímetros adimensionalizados utilizados para a sua construção.

No processo de criação dos neurônios artificiais foi utilizado o modelo denominado *On Line Backprop-Rand*, uma variação do algoritmo retropropagação. Ele é baseado nos modelos de processamento distribuído paralelo propostos por Rumelhart et al. (1986). A propagação de informação através da rede foi efetuada da seguinte forma: os valores de entrada foram transmitidos de uma camada para a outra e transformados através de pesos de conexões entre os neurônios (Figura 1) (CORRAR et al., 2009).



Fonte: CORRAR et al., 2009

Figura 1 Elementos do processo

O tipo de função combinação utilizada foi a soma ponderada (Equação 2), na qual cada entrada (X) é multiplicada por seu respectivo peso (W) e esses produtos são somados, chegando-se a um único valor (Y), que representa o total das entradas ponderadas por seus pesos.

$$Y_j = \sum_j^n X_i W_{ij} \quad (2)$$

A função ativação utilizada foi a logística ou sigmóide (Equação 3), caracterizada como uma função não linear.

$$\text{Sigmóide}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

Sendo x o resultado da função combinação, obtido anteriormente em Y_j .

A função transferência foi utilizada somente como forma de transferir o valor da função ativação conforme o parâmetro limiar lógico.

O processo de aprendizagem é ilustrado na Figura 2.

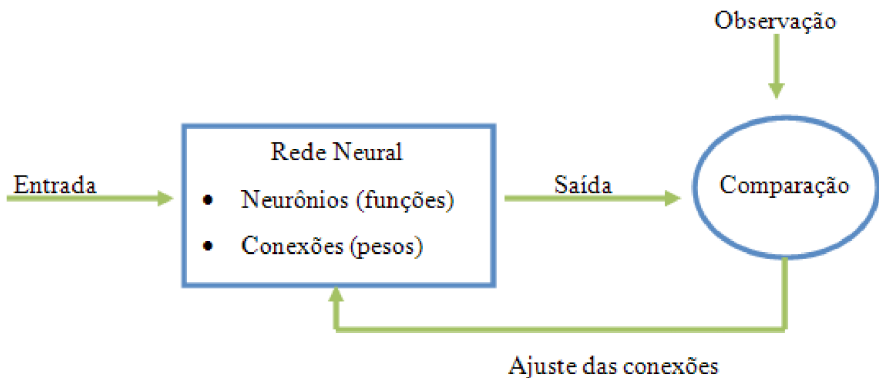


Figura 2 Processo de aprendizado da Rede Neural Artificial

3.3 Variáveis analisadas

As variáveis analisadas para o cálculo dos principais Indicadores de Desempenho dos perímetros irrigados públicos federais foram obtidas junto ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) e a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf) correspondentes ao ano de 2010. As variáveis analisadas são a seguir discriminadas:

- Custo de Operação e Manutenção da infraestrutura de uso comum (O & M), em R\$;
- Área Irrigável (AI), em ha;
- Área Cultivada (AC), em ha;
- Valor Bruto da Produção (VBP) em R\$;
- K_2 Faturado (K_2F), em R\$;
- K_2 Recebido (K_2R), em R\$;
- Volume de água captado (VAC), mil m^3 .

Na Tabela 3 são apresentados os valores das variáveis anteriormente discriminadas para os perímetros irrigados avaliados.

Tabela 3 Valores das variáveis para cálculo dos indicadores de desempenho dos perímetros irrigados – Ano base 2010

| Perímetro irrigado | O & M (R\$) | AI (ha) | AC (ha) | VBP (R\$) | K ₂ F (R\$) | K ₂ R (R\$) | (VAC) (mil m ³) |
|-------------------------|---------------|-----------|-----------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Barreiras Norte | 981.385,97 | 2.093,00 | 613,70 | 4.408.540,50 | 739.632,40 | 572.942,52 | 3.825,22 |
| Bebedouro | 1.046.217,89 | 2.091,00 | 1.130,75 | 13.923.983,65 | 1.024.344,25 | 1.011.768,74 | 18.392,16 |
| Boacica | 1.415.312,08 | 3.334,00 | 2.584,30 | 8.042.550,00 | 452.355,55 | 309.474,26 | 57.687,59 |
| Brumado | 530.457,73 | 5.800,00 | 3.718,50 | 11.603.607,40 | 513.363,00 | 504.009,59 | 37.627,20 |
| Caldeirão | 165.179,00 | 459,00 | 397,00 | 481.745,64 | 36.692,49 | 15.024,65 | 478,68 |
| Curá I | 2.896.945,12 | 4.366,00 | 3.916,25 | 86.411.742,23 | 2.940.435,46 | 2.626.133,50 | 41.627,32 |
| Curu-Pentecoste | 566.839,92 | 1.180,00 | 885,14 | 2.945.268,24 | 178.392,00 | 176.024,50 | 88.646,40 |
| Estreito | 1.772.663,55 | 7.983,00 | 2.481,44 | 11.442.592,99 | 1.419.698,60 | 596.375,41 | 12.296,36 |
| Formoso | 6.782.366,46 | 12.558,00 | 6.558,08 | 76.462.510,07 | 10.655.274,40 | 5.068.259,53 | 109.146,06 |
| Gorutuba | 1.863.492,24 | 5.286,00 | 3.589,40 | 48.645.757,40 | 812.655,31 | 979.474,80 | 48.051,36 |
| Itiúba | 972.065,88 | 894,00 | 809,70 | 3.437.415,00 | 100.616,54 | 108.430,11 | 18.953,97 |
| Jaguaribe-Apodi | 1.625.192,46 | 5.335,00 | 4.805,00 | 29.179.804,83 | 4.776.071,74 | 4.776.071,74 | 41.920,30 |
| Jaiba | 5.587.691,45 | 1.538,00 | 7.665,28 | 84.712.231,62 | 4.053.250,10 | 4.587.380,17 | 180.399,45 |
| Lagoa Grande | 274.223,37 | 24.745,00 | 1.040,93 | 16.045.096,68 | 297.483,19 | 303.159,70 | 15.403,73 |
| Mandacaru | 421.066,11 | 419,00 | 340,24 | 3.996.060,00 | 493.725,52 | 490.830,30 | 8.981,67 |
| Maniçoba | 2.956.432,90 | 5.031,00 | 3.853,03 | 73.069.098,45 | 3.759.522,33 | 3.714.462,70 | 75.418,84 |
| Mirorós | 1.861.695,78 | 2.703,00 | 1.716,00 | 22.877.560,00 | 1.076.300,91 | 1.042.084,30 | 17.588,70 |
| Morada Nova | 620.413,40 | 4.474,19 | 4.474,19 | 13.029.431,98 | 646.203,00 | 568.506,00 | 143.941,54 |
| Moxotó | 971.044,77 | 8.596,00 | 1.300,00 | 12.696.123,00 | 561.120,00 | 198.331,71 | 62.152,10 |
| Niilo Coelho | 24.961.613,22 | 18.858,00 | 19.225,02 | 444.218.185,87 | 24.984.803,03 | 22.943.397,58 | 246.340,34 |
| Nupeba/Riacho Gde. | 1.309.755,71 | 3.318,00 | 459,75 | 3.241.171,00 | 1.250.168,64 | 729.438,99 | 4.229,25 |
| Pirapora | 1.182.309,01 | 1.236,00 | 729,04 | 14.056.349,84 | 1.227.360,25 | 1.221.183,67 | 10.877,00 |
| Platôs de Guadalupe | 189.783,79 | 14.957,00 | 3.196,00 | 3.197.300,00 | 82.651,26 | 197.551,60 | 4.677,85 |
| São Desidério | 324.166,44 | 2.238,00 | 416,50 | 1.839.335,00 | 258.307,03 | 258.725,80 | 41.173,85 |
| São Gonçalo | 304.604,80 | 3.045,63 | 1.823,05 | 11.533.258,00 | 149.786,30 | 55.425,67 | 47.429,62 |
| Tabuleiros de Russas | 2.159.824,79 | 10.765,00 | 2.607,05 | 36.387.026,22 | 366.056,01 | 159.341,03 | 11.881,59 |
| Tabuleiros Litorâneos | 284.748,99 | 8.183,00 | 2.443,00 | 6.096.213,30 | 125.329,62 | 401.294,36 | 411,55 |
| Tabuleiros São Bernardo | 24.322,05 | 5.592,00 | 542,00 | 15.901,20 | 34.588,13 | 12.504,72 | 64,32 |
| Tourão | 10.426.893,02 | 13.873,00 | 12.409,44 | 66.494.561,70 | 10.426.893,03 | 10.528.753,56 | 372.754,14 |
| Vaza Barris | 217.435,12 | 4.498,00 | 974,00 | 10.698.356,95 | 198.000,00 | 116.611,50 | 14.000,00 |

3.4 Indicadores de Desempenho

Os indicadores de desempenho utilizados no estudo foram propostos pelo Tribunal de Contas da União (2002) para monitoramento dos perímetros irrigados. Os mesmos são considerados como ferramentas de avaliação sistemática, constituindo-se em subsídio para identificar as deficiências de planejamento e gestão.

a) Eficiência Financeira (EF)

Definido pela relação entre o volume de recursos financeiros arrecadados da tarifa de água (parcela K₂) e o custo de Operação e Manutenção (O & M) necessário à manutenção e operacionalidade do perímetro irrigado, conforme a expressão:

$$EF = \frac{K_2 \text{ arrecadado}}{\text{custo O \& M}} \quad (4)$$

em que:

EF - indicador de eficiência financeira (R\$ R\$⁻¹)

Custo O & M - custo anual de operação e manutenção do perímetro (R\$)

K₂ arrecadado - recursos da tarifa de água arrecadados anualmente no Perímetro (R\$).

Dá um indicativo da capacidade do perímetro irrigado em gerar os recursos necessários à sua própria manutenção. À medida que este indicador se aproxima de 1,0, o valor do total anual de K_2 arrecadado se aproxima do custo de operação e manutenção. Evidencia ainda que o irrigante não tem dificuldade em arcar com o ônus da operação e manutenção do perímetro.

b) Custo de um Hectare em Produção (IHP)

Definido como sendo o valor necessário para operar e manter a infraestrutura de uso comum relativa a um hectare cultivado em produção, ou seja, a despesa anual realizada para aduzir a água necessária para irrigação normal do hectare cultivado, nas condições do perímetro irrigado, sendo expresso pela relação entre o custo de O & M pela área cultivada:

$$\text{IHP} = \frac{\text{custo O \& M}}{\text{área cultivada}} \quad (5)$$

em que:

IHP - indicador do custo de um hectare em produção (R\$ ha⁻¹)

Custo O & M - custo anual de O & M do Perímetro irrigado (R\$)

Área cultivada - área anual cultivada no Perímetro (ha).

Este indicador mostra o quanto custa para manter em operação cada hectare.

c) Percentual da Produção Necessária a O & M (IVPNM)

Indica o percentual da produção necessário à operação e manutenção do perímetro irrigado, conforme a seguinte expressão:

$$\text{IVPNM} = \frac{\text{O \& M}}{\text{VBP}} \quad (6)$$

em que:

IVPNM - percentual do valor bruto da produção necessária à operação e manutenção do perímetro (R\$ R\$⁻¹)

VBP - valor bruto de toda produção do perímetro no ano (R\$)

Custo O & M - custo anual de O & M do perímetro (R\$).

d) Geração de Receita por Hectare (GRH)

É definido como a receita bruta anual produzida por um hectare, sendo expresso pela relação do valor bruto da produção (VBP) total do perímetro irrigado pela área colhida (AC), conforme a expressão:

$$\text{IGCH} = \frac{\text{VBP}}{\text{AC}} \quad (7)$$

em que:

GRH - índice de geração de receita por hectare (R\$ ha⁻¹)

VBP - valor bruto de toda produção do perímetro no ano (R\$)

AC - área colhida (ha).

Informa o quanto se está gerando de receita bruta média por hectare. Fornece subsídios para avaliação da Assistência Técnica prestada aos produtores, tanto no aspecto da produtividade das culturas quanto da comercialização dos produtos. Este indicador permite ainda averiguar problemas como descapitalização de produtores e necessidade de medidas para reverter o quadro.

e) Coeficiente de Utilização da Terra (CUT)

Este indicador tem como definição a ocupação anual da terra com culturas no espaço e no tempo, podendo apresentar variação de acordo com o ciclo da cultura explorada, sendo expresso pela relação:

$$CUT = \frac{\text{área irrigada}}{\text{área entregue ao irrigante}} \quad (8)$$

em que:

CUT - coeficiente de utilização da terra (ha ha⁻¹)

Área irrigada - área irrigada no perímetro (ha)

Área entregue ao irrigante - área total do perímetro que foi entregue ao irrigante (ha).

Importante para determinar a destinação de novos investimentos, incrementando o retorno por real investido.

f) Adimplência (Ad)

A adimplência (R\$ R\$⁻¹) é dada pela relação entre a tarifa de água recebida e a tarifa de água faturada ou devida.

$$\text{Adimplência} = \frac{\text{tarifa de água recebida}}{\text{tarifa de água faturada ou devida}} \quad (9)$$

g) Impacto da Tarifa d'água na Produção (ITP)

A água como insumo do processo de produção agrícola nos perímetros irrigados tem um custo representado pela tarifa d'água. O indicador impacto da tarifa d'água mede o percentual do valor bruto da produção necessário ao pagamento da tarifa d'água.

$$ITP = \frac{O \& M \text{ (R\$)}}{VBP \text{ (R\$)}} \quad (10)$$

h) Produtividade da Água Captada (PAC)

Definido como a relação entre o valor bruto da produção (VBP) de toda atividade de irrigação do perímetro pelo volume de água captado. Expresso pela equação a seguir:

$$PAC = \frac{VBP}{\text{volume de água}} \quad (11)$$

em que:

PAC - produtividade da água captada (R\$ m⁻³)

VBP - valor bruto de toda produção do perímetro no ano (R\$).

Importante para verificar quais perímetros promove o uso mais racional da água, obtendo mais renda por m³ utilizado.

3.5 Indicadores de desempenho

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos indicadores de desempenho para cada perímetro irrigado com suas respectivas unidades.

Na Tabela 5 é apresentada a estatística resumo da situação geral dos indicadores de desempenho dos perímetros irrigados.

Os perímetros irrigados Jaguaribe-Apodi e Tabuleiros Litorâneos apresentam os melhores desempenhos quanto ao indicador Eficiência Financeira quando comparados

Tabela 4 Indicadores de desempenho dos perímetros irrigados

| Perímetro de irrigação | EF (R\$ R\$ ⁻¹) | ICHP (R\$ ha ⁻¹) | IVPNM (R\$ R\$ ⁻¹) | GRH (R\$ ha ⁻¹) | PAC (R\$ m ⁻³) | CUT (ha ha ⁻¹) | ITP (R\$ R\$ ⁻¹) | Ad (R\$ R\$ ⁻¹) |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Bebedouro | 0,97 | 925,24 | 0,08 | 12.313,94 | 757,06 | 0,54 | 0,08 | 0,99 |
| Boacica | 0,22 | 547,66 | 0,18 | 3.112,08 | 139,42 | 0,78 | 0,18 | 0,68 |
| Brumado | 0,95 | 142,65 | 0,05 | 3.120,51 | 308,38 | 0,64 | 0,05 | 0,98 |
| Caldeirão | 0,09 | 416,07 | 0,34 | 1.213,47 | 1.006,41 | 0,86 | 0,34 | 0,41 |
| Curuçá I | 0,91 | 739,72 | 0,03 | 22.064,92 | 2.075,84 | 0,90 | 0,03 | 0,89 |
| Curu-Pentecoste | 0,31 | 640,40 | 0,19 | 3.327,46 | 33,22 | 0,75 | 0,19 | 0,99 |
| Estreito | 0,34 | 714,37 | 0,15 | 4.611,28 | 930,57 | 0,31 | 0,15 | 0,42 |
| Formoso | 0,75 | 1.034,20 | 0,09 | 11.659,28 | 700,55 | 0,52 | 0,09 | 0,48 |
| Gorutuba | 0,53 | 519,17 | 0,04 | 13.552,62 | 1.012,37 | 0,68 | 0,04 | 1,21 |
| Itiúba | 0,11 | 1.200,53 | 0,28 | 4.245,29 | 181,36 | 0,91 | 0,28 | 1,08 |
| Jaguaribe-Apodi | 2,94 | 338,23 | 0,06 | 6.072,80 | 696,08 | 0,90 | 0,06 | 1,00 |
| Jaíba | 0,82 | 728,96 | 0,07 | 11.051,43 | 469,58 | 4,98 | 0,07 | 1,13 |
| Lagoa Grande | 1,11 | 263,44 | 0,02 | 15.414,27 | 1.041,64 | 0,04 | 0,02 | 1,02 |
| Mandacaru | 1,17 | 1.237,56 | 0,11 | 11.744,83 | 444,91 | 0,81 | 0,11 | 0,99 |
| Maniçoba | 1,26 | 767,30 | 0,04 | 18.964,06 | 968,84 | 0,77 | 0,04 | 0,99 |
| Mirorós | 0,56 | 1.084,90 | 0,08 | 13.331,91 | 1.300,70 | 0,63 | 0,08 | 0,97 |
| Morada Nova | 0,92 | 138,66 | 0,05 | 2.912,13 | 90,52 | 1,00 | 0,05 | 0,88 |
| Moxotó | 0,20 | 746,96 | 0,08 | 9.766,25 | 204,28 | 0,15 | 0,08 | 0,35 |
| Niilo Coelho | 0,92 | 1.298,39 | 0,06 | 23.106,25 | 1.803,27 | 1,02 | 0,06 | 0,92 |
| Nupeba/Riacho Gde. | 0,56 | 2.848,84 | 0,40 | 7.049,86 | 766,37 | 0,14 | 0,40 | 0,58 |
| Pirapora | 1,03 | 1.621,73 | 0,08 | 19.280,63 | 1.292,30 | 0,59 | 0,08 | 0,99 |
| Platôs de Guadalupe | 1,04 | 59,38 | 0,06 | 1.000,41 | 683,50 | 0,21 | 0,06 | 2,39 |
| São Desidério | 0,80 | 778,31 | 0,18 | 4.416,17 | 44,67 | 0,19 | 0,18 | 1,00 |
| São Gonçalo | 0,18 | 167,09 | 0,03 | 6.326,35 | 243,17 | 0,60 | 0,03 | 0,37 |
| Tabuleiros de Russas | 0,07 | 828,46 | 0,06 | 13.957,16 | 3.062,47 | 0,24 | 0,06 | 0,44 |
| Tabuleiros Litorâneos | 1,41 | 116,56 | 0,05 | 2.495,38 | 14.812,93 | 0,30 | 0,05 | 3,20 |
| Tabuleiros São Bernardo | 0,51 | 44,87 | 1,53 | 29,34 | 247,23 | 0,10 | 1,53 | 0,36 |
| Tourão | 1,01 | 840,24 | 0,16 | 5.358,39 | 178,39 | 0,89 | 0,16 | 1,01 |
| Vaza Barris | 0,54 | 223,24 | 0,02 | 10.983,94 | 764,17 | 0,22 | 0,02 | 0,59 |

Tabela 5 Estatística resumo dos perímetros irrigados

| Perímetro de irrigação | EF (R\$ R\$ ⁻¹) | ICHP (R\$ ha ⁻¹) | IVPNM (R\$ R\$ ⁻¹) | GRH (R\$ ha ⁻¹) | PAC (R\$ m ³) | CUT (ha ha ⁻¹) | ITP (R\$ R\$ ⁻¹) | Ad (R\$ R\$ ⁻¹) |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Média | 0,77 | 724,59 | 0,16 | 9.051,12 | 1.250,35 | 0,71 | 0,16 | 0,94 |
| Erro padrão | 0,11 | 108,10 | 0,05 | 1.213,45 | 500,33 | 0,16 | 0,05 | 0,11 |
| Mediana | 0,80 | 728,96 | 0,08 | 7.049,86 | 700,55 | 0,63 | 0,08 | 0,98 |
| Moda | 0,56 | - | 0,08 | - | - | 0,90 | 0,08 | 0,99 |
| Desvio padrão | 0,57 | 582,11 | 0,28 | 6.534,65 | 2.694,38 | 0,88 | 0,28 | 0,59 |
| Variância da amostra | 0,32 | 338.854,5 | 0,08 | 42.701.687,50 | 7.259.700,50 | 0,77 | 0,08 | 0,35 |
| Mínimo | 0,07 | 44,87 | 0,02 | 29,34 | 33,22 | 0,04 | 0,02 | 0,35 |
| Máximo | 2,94 | 2.848,84 | 1,53 | 23.106,25 | 14.812,93 | 4,98 | 1,53 | 3,20 |
| Soma | 22,23 | 21.013,13 | 4,57 | 262.482,41 | 36.260,20 | 20,67 | 4,57 | 27,31 |

aos outros Perímetros avaliados. Esse indicador dá indícios da capacidade do perímetro irrigado em gerar recursos necessários à sua Autogestão. O desejável é que este valor seja igual ou maior que 1,0 (um), representando assim, que o perímetro está conseguindo arrecadar valores suficientes para a cobertura total dos custos de O & M, ficando a inadimplência desta tarifa próxima de zero. Neste caso, o nível de organização da comunidade apresenta-se elevado e a autossustentabilidade financeira estaria possivelmente garantida (TCU, 2002). Valores maiores que 1,0 (um) indicam a presença de reservas financeiras por parte do Distrito de Irrigação.

Segundo Dourado et. al. (2006), o indicador de Autossuficiência Financeira permite visualizar a adequação da tarifa de água praticada no perímetro irrigado, entretanto, o emprego do capital gerado é determinante para o efetivo desempenho do perímetro. Costa et al. (2011) afirmam que esse indicador demonstra a manutenção do equilíbrio entre as despesas (custo de operação e manutenção) e as receitas (K_2 arrecadado) ao longo do tempo. A variação do indicador mostra a necessidade de melhorias na gestão do Perímetro.

Quanto ao custo da infraestrutura de uso comum para manter um hectare em produção, o perímetro Nupeba/Riacho Grande apresentou o maior valor. Este fato reflete a utilização ainda muito pequena da área irrigável e um alto custo de O & M. Do total disponível para a irrigação apenas 13,9% é utilizado. O menor custo para a produção de um hectare é observado no perímetro Tabuleiros São Bernardo. Apesar de apresentar apenas 9,7% do total da área irrigada, o seu custo com O & M é o menor dentre todos os perímetros estudados. Entretanto, apresenta os maiores valores com relação ao Percentual da Produção Necessária a O & M. Isso reflete o baixo valor da produção bruta para esse perímetro.

As maiores gerações de receitas por hectare são observadas nos perímetros Nilo Coelho e Curuçá I. Isso se deve ao reflexo direto da utilização máxima da área irrigável, proporcionando maior produção. Quando comparados com os outros perímetros avaliados, observam-se os maiores valores de produção bruta e área irrigada.

Quanto ao indicador Produtividade do Uso da Água Captada, o perímetro Tabuleiros Litorâneos e Tabuleiros de Russas demonstram os melhores resultados. Esse fato é justificado, tendo em vista que 81,4% do perímetro Tabuleiros Litorâneos utiliza irrigação localizada, apresentando como principais culturas adotadas: banana,

coco, milho verde e feijão. Acompanhando o mesmo desempenho, o perímetro irrigado Tabuleiros de Russas apresenta 100% de sua área irrigada por irrigação localizada (50% microaspersão e 50% gotejamento), entretanto, a diferença no volume de água utilizado é cerca de 96,5% para o perímetro Tabuleiros Litorâneos, fato este explicado pelas culturas adotadas no perímetro Tabuleiros de Russas (frutíferas) e uma área irrigada um pouco maior. O perímetro irrigado Curu Pentecoste apresentou o menor desempenho, provavelmente devido ao método utilizado nesse perímetro (Superfície) e às condições deploráveis dos equipamentos hidráulicos de uso comum do mesmo.

O perímetro Jaíba se destaca em relação ao coeficiente de utilização da terra, apresentando o valor de 4,98 ha ha⁻¹. O CUT pode apresentar variação conforme o ciclo da cultura explorada. Em culturas de ciclo longo ou perene, o coeficiente de ocupação anual pode ser de no máximo 1,0; exceto nos casos em que durante o período de crescimento da cultura exista algum tipo de consórcio ou culturas intercalares de ciclo curto. Culturas de ciclo curto, em uma área totalmente ocupada, faz com que esse coeficiente seja sempre maior ou igual a 1,0, tantas vezes quantos forem os ciclos da cultura no ano (COSTA et al., 2011). O coeficiente de utilização da terra constitui uma variável de avaliação da Assistência Técnica e Extensão Rural (TCU, 2002), refletindo a consciência do uso racional e intensivo da área irrigada como veículo de desenvolvimento e gerador de receita.

O perímetro Tabuleiros de São Bernardo apresentou os maiores valores no que se refere ao impacto da tarifa de água na produção. Isso se mostra evidente, pois a produção bruta desse perímetro é a menor dentre os demais avaliados. A água como insumo do processo de produção agrícola nos perímetros irrigados tem um custo representado pela tarifa de água. O indicador impacto da tarifa de água mede o percentual do valor bruto da produção necessário ao pagamento da tarifa de água.

Quanto à adimplência, os perímetros Tabuleiros Litorâneos e Platôs de Guadalupe se destacam com os maiores níveis de adimplência.

3.6 Modelo estatístico de desempenho e agrupamento dos perímetros

Na Tabela 6 são demonstrados os valores dos indicadores de desempenho para cada perímetro irrigado normalizados pela transformação *Box-Cox*.

Com base nos indicadores da Tabela 6 são apresentados na Tabela 7 os resultados do teste de igualdade de médias dos grupos que busca identificar qual (is) variável (is) é (são) a (s) melhor (es) discriminadora (s) para os grupos em estudo.

Em conformidade com os dados apresentados na Tabela 7, apenas o indicador GRH, apresentou-se com nível de significância inferior a 5%. As variáveis listadas na referida tabela estão em ordem decrescente de importância no processo de discriminação dos indicadores, conforme demonstrado nos resultados da estatística de Wilks' Lambda (quanto menor seu valor mais importante para discriminação dos grupos).

Na Tabela 8 visualiza-se a matriz de correlação dos indicadores de desempenho relativos aos perímetros irrigados. Essa informação possibilita identificar prováveis

Tabela 6 Indicadores de desempenho dos perímetros irrigados adimensionalizados e normalizados pela transformação *Box-Cox*

| Perímetro de irrigação | EF | GRH | PAC | CUT | Ad |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bebedouro | -1,83 | -1,60 | -3,87 | -3,64 | -3,32 |
| Boacica | -2,18 | -1,84 | -5,56 | -3,28 | -3,69 |
| Brumado | -1,84 | -1,84 | -4,77 | -3,47 | -3,33 |
| Caldeirão | -2,31 | -1,93 | -3,58 | -3,17 | -4,20 |
| Curaçá I | -1,85 | -1,45 | -2,86 | -3,14 | -3,42 |
| Curu-Pentecoste | -2,12 | -1,83 | -7,00 | -3,32 | -3,32 |
| Estreito | -2,10 | -1,78 | -3,66 | -4,20 | -4,17 |
| Formoso | -1,91 | -1,62 | -3,95 | -3,68 | -4,05 |
| Gorutuba | -2,00 | -1,58 | -3,58 | -3,42 | -3,12 |
| Itiúba | -2,28 | -1,80 | -5,30 | -3,13 | -3,23 |
| Jaguaribe-Apodi | -1,41 | -1,74 | -3,95 | -3,13 | -3,31 |
| Jaíba | -1,88 | -1,63 | -4,35 | -1,42 | -3,18 |
| Lagoa Grande | -1,79 | -1,55 | -3,55 | -6,20 | -3,29 |
| Mandacaru | -1,78 | -1,61 | -4,40 | -3,24 | -3,31 |
| Maniçoba | -1,75 | -1,49 | -3,62 | -3,30 | -3,32 |
| Mirorós | -1,99 | -1,59 | -3,33 | -3,48 | -3,34 |
| Morada Nova | -1,85 | -1,84 | -5,99 | -3,03 | -3,44 |
| Moxotó | -2,19 | -1,65 | -5,18 | -4,92 | -4,35 |
| Nilo Coelho | -1,85 | -1,43 | -3,00 | -3,01 | -3,39 |
| Nupeba/Riacho Gde. | -1,99 | -1,72 | -3,86 | -5,01 | -3,85 |
| Pirapora | -1,81 | -1,49 | -3,33 | -3,56 | -3,31 |
| Platôs de Guadalupe | -1,81 | -1,94 | -3,97 | -4,57 | -2,44 |
| São Desidério | -1,89 | -1,79 | -6,70 | -4,71 | -3,31 |
| São Gonçalo | -2,21 | -1,74 | -5,00 | -3,54 | -4,30 |
| Tabuleiro de Russas | -2,34 | -1,57 | -2,47 | -4,45 | -4,14 |
| Tabuleiro São Bernardo | -2,01 | -2,06 | -4,99 | -5,36 | -4,32 |
| Tabuleiros Litorâneos | -1,71 | -1,86 | -0,90 | -4,24 | -2,14 |
| Tourão | -1,82 | -1,76 | -5,31 | -3,14 | -3,30 |
| Vaza Barris | -2,00 | -1,63 | -3,86 | -4,56 | -3,84 |

Tabela 7 Teste de igualdade de médias univariada para os indicadores de desempenho dos perímetros irrigados

| Variáveis | Wilks' Lambda | Prob.>F |
|-----------|---------------|---------|
| GRH | 0,820 | 0,022 |
| EF | 0,907 | 0,108 |
| Ad | 0,971 | 0,378 |
| CUT | 0,996 | 0,731 |
| PAC | 0,996 | 0,733 |

casos de multicolinearidade e já antecipa as variáveis que podem afetar o processo de “Stepwise” e, conseqüentemente, deixar de compor a função discriminante.

A maioria dos indicadores apresentou correlações positivas fracas, inferiores a 0,5. Os indicadores CUT e GRH apresentaram as menores correlações,

Tabela 8 Matriz de correlação dos indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados

| Indicadores | EF | GRH | PAC | CUT | Ad |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| EF | 1,00 | 0,08 | 0,21 | 0,11 | 0,58 |
| GRH | 0,08 | 1,00 | 0,42 | 0,22 | -0,05 |
| PAC | 0,21 | 0,42 | 1,00 | -0,08 | 0,22 |
| CUT | 0,11 | 0,22 | -0,08 | 1,00 | 0,21 |
| Ad | 0,58 | -0,05 | 0,22 | 0,21 | 1,00 |

demonstrando assim a sua importância no processo discriminatório entre os perímetros irrigados.

Quanto ao *Teste M de Box* que permite avaliar uma das suposições da AMD (homogeneidade da matriz de covariâncias, em cada um dos grupos, para todos os cinco indicadores usadas), observou-se um valor de P igual a 0,536. Neste caso, a suposição não foi violada ($p > 0,05$).

Na Tabela 9 são apresentadas informações relativas ao processo passo a passo dos indicadores selecionados para a discriminação dos perímetros irrigados. Já na Tabela 9 apresentam-se os valores dos coeficientes que compõem a Função Discriminante Canônica. Essa função foi utilizada para classificar os perímetros irrigados conforme sua pontuação gerada a partir dos indicadores mais significativos no processo de discriminação.

Tabela 9 Indicador selecionado para compor a função discriminante

| Passos | Entrada | Wilks' Lambda | Prob. > F |
|--------|---------|---------------|-----------|
| 0 | EF | 0,907 | 0,108 |
| | GRH | 0,820 | 0,022 |
| | PAC | 0,996 | 0,733 |
| | CUT | 0,996 | 0,731 |
| | Ad | 0,971 | 0,378 |
| 1 | EF | 0,769 | 0,200 |
| | PAC | 0,807 | 0,521 |
| | CUT | 0,800 | 0,431 |
| | Ad | 0,795 | 0,373 |

A escolha desse indicador (Tabela 10) demonstra a importância do mesmo na diferenciação de performance dos perímetros . A ausência dos outros indicadores pode ser explicada pela semelhança entre seus valores em relação a cada perímetro irrigado e sua baixa significância estatística nos dois passos realizados, não sendo, portanto, descartada a sua importância, indicando dessa forma, ações mais eficientes e efetivas para a melhoria dos mesmos.

São demonstrados nas Tabelas 11 e 12 os centróides dos grupos e as respectivas probabilidades para a obtenção do ponto de corte ("*cut-off point*").

Tabela 10 Coeficientes que compõem a Função Discriminante Canônica

| Variáveis | Coeficientes da Função |
|-------------|------------------------|
| GRH | 6,907 |
| (Constante) | 11,756 |

Tabela 11 Classificação dos grupos por centróide

| Classificação | Pontos Centróide |
|---------------|------------------|
| Autogestão | 0,624 |
| Cogestão | -0,328 |

Tabela 12 Probabilidades para o ponto de corte

| Classificação | Probabilidade prévia | Casos usados na análise | |
|---------------|----------------------|-------------------------|-----------|
| | | Não ponderada | Ponderada |
| Autogestão | 0,345 | 10 | 10 |
| Cogestão | 0,655 | 19 | 19 |
| Total | 1 | 29 | 29 |

Quanto mais próxima estiver a pontuação de um determinado perímetro irrigado de um dos centróides, mais esse perímetro estará caracterizado pelo significado desse centróide. Esse fato proporciona a separação dos grupos em dois.

De acordo com a Tabela 12, que apresenta as probabilidades para divisão dos grupos em Autogestão e Cogestão, há uma probabilidade de 34,5% de existirem 10 perímetros irrigados no grupo Autogestão e 65,5% de probabilidade de 19 perímetros irrigados pertencerem ao grupo Cogestão. De forma geral existe uma probabilidade maior de perímetros irrigados pertencerem ao grupo Cogestão em relação ao grupo Autogestão.

Na Tabela 13 são apresentadas as separações dos grupos, as probabilidades de um perímetro pertencer ao grupo Autogestão ou Cogestão e a pontuação de cada perímetro.

Os perímetros Nilo Coelho, Curaçá I, Pirapora e Maniçoba apresentaram os melhores desempenhos, com probabilidades variando de 72,6% a 64,3% de chance de compor o grupo Autogestão. Os perímetros Lagoa Grande, Tabuleiros de Russas e Gortuba apresentam-se em uma zona de transição, entretanto, com uma probabilidade maior de pertencer o grupo Autogestão. Já o Perímetro Tabuleiro São Bernardo foi classificado no grupo Cogestão com uma probabilidade de 95,8%. Dourado et. al. (2006) menciona resultados semelhantes para o ano de 2004 avaliando os perímetros irrigados da Codevasf.

4 DETERMINAÇÃO DOS PESOS PARA REDE NEURAL ARTIFICIAL

A Rede Neural foi treinada utilizando um arquivo com 26 perímetros (linhas de dados) com informações correspondentes aos indicadores de desempenho (EF, GRH, PAC, CUT e Ad) dos perímetros irrigados (Tabela 14). Para o teste foi utilizado um

Tabela 13 Separações dos grupos, probabilidades de um Perímetro pertencer ao grupo Autogestão ou Cogestão e a pontuação de cada perímetro – ano 2010

| Perímetros irrigados | Agrupamento atual | Previsão agrupamento | Probabilidade | | f(d) |
|------------------------|-------------------|----------------------|---------------|----------|--------|
| | | | Autogestão | Cogestão | |
| Nilo Coelho | 2 | 1 | 0,726 | 0,274 | 1,847 |
| Curaçá I | 1 | 1 | 0,707 | 0,293 | 1,748 |
| Pirapora | 1 | 1 | 0,650 | 0,350 | 1,473 |
| Maniçoba | 1 | 1 | 0,643 | 0,357 | 1,441 |
| Lagoa Grande | 1 | 1 | 0,555 | 0,445 | 1,055 |
| Tabuleiro de Russas | 2 | 1 | 0,514 | 0,486 | 0,883 |
| Gorutuba | 1 | 1 | 0,503 | 0,497 | 0,833 |
| Mirorós | 2 | 2 | 0,496 | 0,504 | 0,806 |
| Bebedouro | 1 | 2 | 0,466 | 0,534 | 0,677 |
| Mandacaru | 1 | 2 | 0,448 | 0,552 | 0,603 |
| Formoso | 2 | 2 | 0,445 | 0,555 | 0,592 |
| Jaíba | 2 | 2 | 0,426 | 0,574 | 0,510 |
| Vaza Barris | 2 | 2 | 0,424 | 0,576 | 0,500 |
| Moxotó | 2 | 2 | 0,385 | 0,615 | 0,328 |
| Nupeba/Riacho Gde. | 2 | 2 | 0,293 | 0,707 | -0,101 |
| São Gonçalo | 2 | 2 | 0,269 | 0,731 | -0,230 |
| Jaguaribe-Apodi | 2 | 2 | 0,260 | 0,740 | -0,277 |
| Tourão | 1 | 2 | 0,236 | 0,764 | -0,414 |
| Estreito | 1 | 2 | 0,210 | 0,790 | -0,569 |
| São Desidério | 1 | 2 | 0,204 | 0,796 | -0,612 |
| Itiúba | 2 | 2 | 0,198 | 0,802 | -0,650 |
| Curu-Pentecoste | 2 | 2 | 0,167 | 0,833 | -0,869 |
| Brumado | 2 | 2 | 0,160 | 0,840 | -0,923 |
| Boacica | 2 | 2 | 0,159 | 0,841 | -0,925 |
| Morada Nova | 2 | 2 | 0,153 | 0,847 | -0,979 |
| Tabuleiros Litorâneos | 2 | 2 | 0,139 | 0,861 | -1,097 |
| Caldeirão | 2 | 2 | 0,095 | 0,905 | -1,548 |
| Platôs de Guadalupe | 2 | 2 | 0,087 | 0,913 | -1,645 |
| Tabuleiro São Bernardo | 2 | 2 | 0,042 | 0,958 | -2,457 |

arquivo com 03 linhas com informações sobre os Perímetros Bebedouro, Boacica e Curaçá I, para visualizar se os mesmos têm um perfil semelhante ao que a Rede Neural conseguiu aprender.

Obteve-se o melhor resultado para o teste realizado com seis neurônios de entrada mais um neurônio de saída, com taxa de aprendizado de 0,4 (controla a taxa à qual a rede aprende) e com momentum igual a 0,3 (este parâmetro controla a influência da última mudança de peso na atualização de peso atual. Normalmente, resulta em uma aprendizagem mais rápida, mas pode causar instabilidade em alguns casos se for muito grande) e critério de parada com 100.000 épocas de treinamento. Na Tabela 13 são demonstrados os resultados obtidos pela Rede Neural.

Do total de registros (3) submetidos ao teste, todos se encaixaram no perfil aprendido pela rede (Tabela 15).

Tabela 14 Arquivo de treinamento da Rede Neural Artificial (RNA)

| Perímetros irrigados | Indicadores | | | | | Alvo da RNA f(d) |
|------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| | EF | GRH | PAC | CUT | Ad | |
| Estreito | 0,015 | 0,018 | 0,026 | 0,015 | 0,015 | -0,569 |
| Formoso | 0,034 | 0,044 | 0,019 | 0,025 | 0,017 | 0,592 |
| Gorutuba | 0,024 | 0,052 | 0,028 | 0,033 | 0,044 | 0,833 |
| Itiúba | 0,005 | 0,016 | 0,005 | 0,044 | 0,039 | -0,650 |
| Jaíba | 0,037 | 0,042 | 0,013 | 0,241 | 0,041 | 0,510 |
| Lagoa Grande | 0,050 | 0,059 | 0,029 | 0,002 | 0,037 | 1,055 |
| Mandacaru | 0,052 | 0,045 | 0,012 | 0,039 | 0,036 | 0,603 |
| Maniçoba | 0,057 | 0,072 | 0,027 | 0,037 | 0,036 | 1,441 |
| Mirorós | 0,025 | 0,051 | 0,036 | 0,031 | 0,035 | 0,806 |
| Nilo Coelho | 0,041 | 0,088 | 0,050 | 0,049 | 0,034 | 1,847 |
| Nupeba/Riacho Gde. | 0,025 | 0,027 | 0,021 | 0,007 | 0,021 | -0,101 |
| Pirapora | 0,047 | 0,073 | 0,036 | 0,029 | 0,036 | 1,473 |
| São Desidério | 0,036 | 0,017 | 0,001 | 0,009 | 0,037 | -0,612 |
| Tourão | 0,045 | 0,020 | 0,005 | 0,043 | 0,037 | -0,414 |
| Tabuleiros Litorâneos | 0,063 | 0,010 | 0,409 | 0,014 | 0,117 | -1,097 |
| Tabuleiro São Bernardo | 0,023 | 0,000 | 0,007 | 0,005 | 0,013 | -2,457 |
| Caldeirão | 0,004 | 0,005 | 0,028 | 0,042 | 0,015 | -1,548 |
| Platôs de Guadalupe | 0,047 | 0,004 | 0,019 | 0,010 | 0,088 | -1,645 |
| São Gonçalo | 0,008 | 0,024 | 0,007 | 0,029 | 0,014 | -0,230 |
| Moxotó | 0,009 | 0,037 | 0,006 | 0,007 | 0,013 | 0,328 |
| Vaza Barris | 0,024 | 0,042 | 0,021 | 0,010 | 0,022 | 0,500 |
| Brumado | 0,043 | 0,012 | 0,009 | 0,031 | 0,036 | -0,923 |
| Curu-Pentecoste | 0,014 | 0,013 | 0,001 | 0,036 | 0,036 | -0,869 |
| Morada Nova | 0,041 | 0,011 | 0,002 | 0,048 | 0,032 | -0,979 |
| Tabuleiro de Russas | 0,003 | 0,053 | 0,084 | 0,012 | 0,016 | 0,883 |
| Jaguaribe-Apodi | 0,132 | 0,023 | 0,019 | 0,044 | 0,037 | -0,277 |

Tabela 15 Resultado estimado pela Rede Neural na classificação dos perímetros irrigados

| Perímetros irrigados | Desempenho perímetros f(d) (entrada) | Desempenho perímetros (saída) |
|----------------------|---|----------------------------------|
| Bebedouro | 0,677 | 0,664 |
| Boacica | -0,925 | -0,906 |
| Curaçá I | 1,748 | 1,735 |

Observa-se 100% de tendência ao acerto da rede em relação aos dados originais de classificação dos Perímetros utilizados para testar a Rede Neural. Na Figura 3 é mostrada a arquitetura e as faixas de pesos gerados para a Rede Neural. Observa-se para cada cor uma conexão correspondente aos seus respectivos pesos de ajuste, os quais foram gerados a partir do algoritmo utilizado e a correção dos valores de saída no processo de treinamento da RNA.

Na Figura 4 é demonstrado o processo gráfico do treinamento da Rede Neural. Observa-se na linha de cor azul a resposta da Rede Neural e em vermelho o alvo da

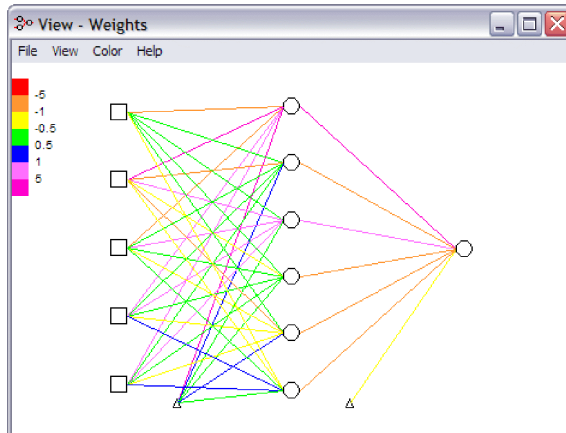


Figura 3 Arquitetura e os pesos gerados para a Rede Neural Artificial

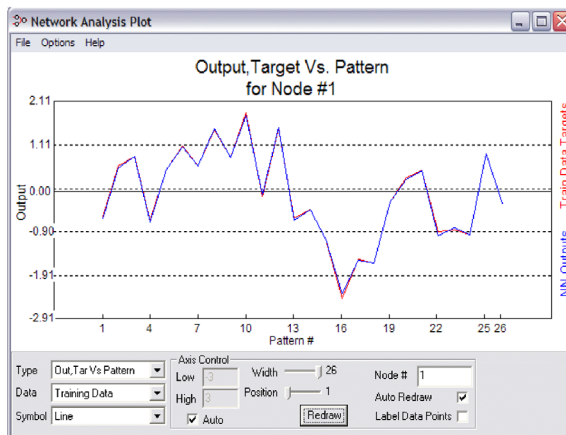


Figura 4 Treinamento da Rede Neural, alvo versus padrão

mesma. Praticamente as cores se sobrepõem, demonstrando, assim, um excelente resultado no treinamento.

Na Figura 5 observa-se graficamente o processo de treinamento e erro da Rede Neural conforme o número de épocas, apresentando parada baseada na margem de erro estabelecido (0,1), após 21.379 épocas.

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A aplicação dessa metodologia evidenciou a possibilidade de testar o desempenho dos Perímetros irrigados baseado nas variáveis que conseguiram melhor diferenciar os Perímetros em relação sua Autogestão.

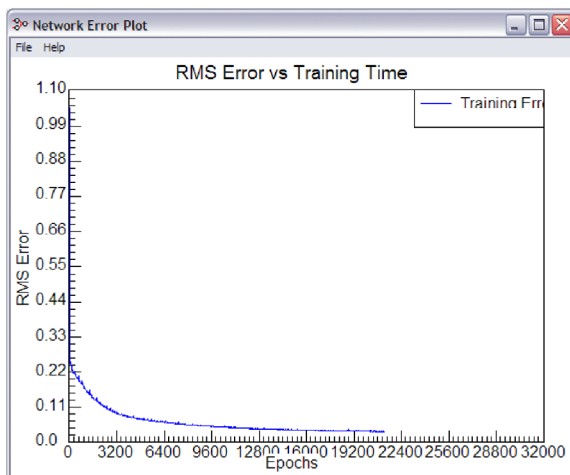


Figura 5 Relação entre erro e treinamento da Rede Neural artificial

A utilização da Análise Multivariada Discriminante possibilitou a obtenção de uma faixa de classificação dos Perímetros quanto a sua Autogestão que variou de 1,441 a 1,847 (intervalo de pontuação no qual estão inseridos os Perímetros irrigados com melhor desempenho, pertencentes ao grupo Autogestão), indicando também quais as variáveis (indicadores) que influenciaram de forma contundente esse processo.

A criação da Rede Neural Artificial possibilitou a inserção das variáveis com comportamento linear e não linear na classificação dos perímetros. O uso conjunto das duas técnicas estatísticas possibilitou relacionar a faixa de classificação dos perímetros quanto a sua Autogestão e as variáveis que constituíram ou não a função desempenho na primeira etapa de classificação dos perímetros. Por meio do aprendizado supervisionado a Rede Neural Artificial assimilou os padrões relacionados a cada variável dos perímetros estudados associando, dessa forma, a pontuação gerada pela função desempenho obtida pela Análise Multivariada Discriminante, classificando com precisão e automaticamente o grupo a que pertence cada perímetro irrigado.

Com a identificação das principais vulnerabilidades dos perímetros irrigados e a situação de desempenho individual de cada um torna-se possível traçar estratégias de alocação de recursos, sejam eles econômicos, sociais ou ambientais que estejam direta ou indiretamente relacionados com os indicadores estudados.

Bialoskorski Neto, Nagano e Moraes (2006), em estudo relacionado à avaliação de desempenho socioeconômico de cooperativas, propuseram o uso de redes neurais para avaliação de desempenho quanto à capacidade de honrar seus compromissos financeiros. Segundo os mesmos autores, a aplicação desse recurso proporcionou níveis de acerto próximos aos obtidos com outros métodos tradicionais. Os autores consideraram ainda que a utilização das redes neurais podem ser um recurso auxiliar para classificar empresas, principalmente as cooperativas agropecuárias e outros

modelos de gestão, e concluem que a classificação por meio de variáveis econômicas tem maior poder de explicação para o desempenho dessas entidades do que a utilização de variáveis sociais.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos na Análise Multivariada Discriminante, observou-se o indicador Geração de Receita por Hectare como o mais importante no processo discriminatório entre os perímetros irrigados quanto a Autogestão. A ausência dos outros indicadores demonstra o grau de semelhança dessas variáveis entre os perímetros irrigados.

Os perímetros com os melhores desempenhos em relação à Autogestão foram: Nilo Coelho, Curaçá I, Pirapora e Maniçoba (Codevasf). Fica evidente a necessidade de se reavaliar a gestão dos perímetros irrigados que estão administrativamente sob a responsabilidade do Dnocs, pois dos 29 perímetros avaliados apenas o perímetro Tabuleiros de Russas foi classificado como apto a Autogestão, com probabilidade de apenas 51,4% de pertencer a esse grupo.

A Rede Neural Artificial criada a partir dos valores da função desempenho originada por meio da Análise Multivariada Discriminante mostrou-se apta a avaliação do desempenho dos perímetros irrigados no decorrer do tempo. Podendo servir como uma ferramenta de alocação de recursos financeiros e avaliação dos mesmos independente do padrão linear conforme o seu nível de Autogestão, localizado no intervalo de pontuação de 1,441 a. 1,847

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIALOSKORSKI NETO, S.; NAGANO, M. S.; MORAES, M. B. da C. **Utilização de redes neurais artificiais para avaliação sócio-econômica: uma aplicação em cooperativas.** Revista de Administração (USP), São Paulo/SP, v. 41, n. 1, p. 59-68, 2006.
- CODEVASF. **Programas e ações.** Disponível em: http://www.codevasf.gov.br/programas_acoas. Acesso em: 15 de jul 2011.
- CORRAR, et. al. **Análise Multivariada para os cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia.** São Paulo: Atlas, 2007.
- COSTA, R. N. T.; OLIVEIRA, V. R. de; ARAÚJO, D. F. de. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas.** Cap 4. Planejamento, gerenciamento e uso racional de águas em perímetros públicos de irrigação. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p.88-110.
- DOURADO, A. et. al. **Perímetros públicos de irrigação: propostas para o modelo de transferência da gestão.** MBA Gestão Pública, 2006.

- GÓMEZ-LIMÓN, J. A.; L. RIESGO. “**Alternative approaches to the construction of a composite indicator of agricultural sustainability: An application to irrigated agriculture in the Duero basin in Spain.**” *Journal of Environmental Management*. 2009.
- HAIR, J. F. et al. *Análise Multivariada de Dados*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- KAMARA, A. B.; KOPPEN, B. VAN; MAGINGXAL. **Economic viability of small-scale irrigation systems in the context of state withdrawal: the Arabie Scheme in the Northern Province of South Africa.** *Physics and Chemistry of the Earth* 27 (2002) 815–823.
- MEINZEN-DICK, R.; RAJU, K. V. **What Affects Organization and Collective Action for Managing Resources? Evidence from Canal Irrigation Systems in India.** *World Development* Vol. 30, No. 4, pp. 649–666, 2002.
- OECD. **Environmental indicators for agriculture.** Volume 3 – Methods and Results. OECD. Paris. Riesgo, L., 2004. Sostenibilidad del regadío en la cuenca del Duero ante los retos de la DMA y la reforma de la PAC. Unpublished Ph.D. University of Oviedo. 2001
- RUMELHART et al. **Learning representations by backpropagation errors.** *Nature*, 323:533–536. 1986.
- SHAH, T., van Koppen, B., Merrey, D., de Lange, M., Samad, M. **Institutional Alternatives in African Smallholder Irrigation: lessons from international experience with irrigation management transfer.** IWMI Research Report 60, Colombo, Sri Lanka. 2002.
- Tribunal de Contas da União. **Relatório de Auditoria de Natureza Operacional.** Secretaria de Fiscalização e Avaliação de Programas de Governo - Programa de Irrigação e Drenagem. Brasília, 2002.
- UYSAL, Ö. K.; ATIS, E. **Assessing the performance of participatory irrigation management over time: A case study from Turkey.** *Agricultural Water Management* 97 (2010) 1017–1025.
- VERMILLION, D. L. **Property rights and collective action in the devolution of irrigation system management.** In R. S. Meinzen-Dick, A. Knox, & M. Di Gregorio (Eds.), *Collective action, property rights, and devolution of natural resource management: Exchange of knowledge and implications for policy* (pp. 182–218). Feldafing, Germany: Zentralstelle für Ernährung und Landwirtschaft. 2001.

Eficiência e Uniformidade da Irrigação: Possibilidades Técnicas e Econômicas para Melhoria

José A. Frizzone¹

¹ ESALQ/USP

- 1 Introdução
 - 2 Balanço hídrico em campos irrigados
 - 3 Partição da água aplicada por irrigação
 - 4 Necessidade de água de ecossistemas cultivados
 - 5 Medidas de desempenho da irrigação
 - 5.1 Indicadores de eficiência
 - 5.2 Indicadores de uniformidade
 - 5.3 Grau de adequação
 - 6 Fatores que afetam o desempenho do sistema de irrigação
 - 6.1 Sistemas de irrigação por aspersão
 - 6.2 Sistemas de microirrigação
 - 6.3 Sistemas de irrigação por superfície
 - 7 Indicadores de produtividade da água
 - 7.1 Produtividade da água – Conceitos
 - 7.2 Fatores que afetam a produtividade da água
 - 7.3 Técnicas para aumentar a produtividade da água
 - 7.4 Irrigação com déficit em condições de água escassa
 - 8 Conclusões e perspectivas futuras
- Referências bibliográficas

Irrigação da Conservação de Água e Solo
à Sustentabilidade com Vistas à Autogestão
ISBN 978-85-67668-05-5

INOVAGRI
INSTITUTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO NA AGRICULTURA IRRIGADA

Fortaleza - CE
2014

2

Eficiência e Uniformidade da Irrigação: Possibilidades Técnicas e Econômicas para Melhoria

1 INTRODUÇÃO

A melhoria da eficiência da irrigação deve atender a uma análise holística das fases pelas quais se passa o processo (Burton et al. 1999). 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.

Para entender o que acontece em um sistema de irrigação é necessário realizar análise de diagnóstico para identificar as causas e os efeitos. A maior dificuldade com agricultura irrigada é a complexidade e a natureza das especificidades locais para muitos problemas e seu potencial de soluções. Problemas e soluções são melhores considerados como 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 e desperdício de água. O problema 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 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 somente é possível se as pessoas envolvidas aplicarem o treinamento. Eles devem, portanto, ser motivados e ter as facilidades necessárias.

Importantes restrições ao uso eficiente da água nos projetos de irrigação estão associadas às dificuldades com sua medida e quantificação. 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 quanto a água é produtiva, mas sim qual a produtividade potencial está sendo perdida pelo manejo pobre ou inadequado uso do recurso. 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 de uso da água em sistemas de irrigação e drenagem têm questionado a validade da preocupação com as baixas eficiências de condução e aplicação quando a água resultante da drenagem é reusada à jusante do sistema. Então, a questão que surge é a seguinte: é mais conveniente focar o reuso 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 dos 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 sistemas de irrigação. 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 podem ser transferidas.

Uma das mais surpreendentes características do manejo dos sistemas de irrigação públicos é a aceitação tácita que pouco ou nada pode ser feito em muitos 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 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 conservação da energia (sistematização do terreno a laser para irrigação por superfície; irrigação por superfície com vazão intermitente; sistema de reuso da água escoada no final da parcela; substituição de sistemas de irrigação menos eficientes por mais eficientes). Estes aprimoramentos têm seguido aproximações passo-a-passo e, enquanto as restrições têm sido atenuadas, novos desafios têm sido encontrados. É valioso observar se existem caminhos e modelos no processo de desenvolvimento em diferentes países.

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 sintetizar os conceitos de eficiência técnica da irrigação, uniformidade de distribuição de água e produtividade da água e indicar estratégias para melhoria do desempenho da irrigação, visando o manejo eficiente dos recursos hídricos na agricultura irrigada. Também é dado um enfoque geral sobre irrigação com déficit em condições de escassez de água, visando à maximização do lucro da atividade agrícola.

2 BALANÇO HÍDRICO EM CAMPOS IRRIGADOS

Todos os aspectos do manejo da irrigação e, especialmente, do calendário de irrigação, requerem um entendimento do balanço hídrico no solo (ou balanço de água). O uso do balanço hídrico para manejar a irrigação envolve a estimativa da quantidade de água armazenada na zona radicular da cultura em um determinado

tempo. Os principais componentes do balanço hídrico no solo são: PE (precipitação), IR (irrigação), AC (ascensão capilar), RE (escoamento superficial de entrada), ET (evapotranspiração), DP (drenagem profunda) e RS (escoamento superficial de saída). Para descrever a variação na quantidade de água armazenada na zona radicular da cultura em um determinado período contabilizam-se as entradas e saídas de água no volume de controle, conforme se expressa pela Eq. 1. O volume de solo considerado depende da cultura em estudo, pois ele deve englobar seu sistema radicular. Assim é que se considera como limite superior a superfície do dossel e como limite inferior a profundidade do sistema radicular da cultura.

$$A_i - A_f = (PE + IR + AC + RE) - (ET + DP + RS) \quad (1)$$

Os termos A_i e A_f representam as quantidades de água armazenadas na zona radicular (mm) no início e no final do período; respectivamente. A diferença entre estas duas quantidades representa a variação do armazenamento de água no solo (ΔA) no período considerado. Os componentes PE, IR, AC e RE representam as entradas de água no sistema, ambos em mm. Os componentes ET, DP e RS representam os fluxos de saída por evapotranspiração, drenagem profunda e escoamento superficial, ambos em mm. Os componentes T (transpiração) e E (evaporação do solo e da superfície das plantas), para muitos estudos práticos, não são separados, sendo a combinação deles denominada evapotranspiração (ET). Os fluxos de saída por drenagem profunda e por escoamento superficial frequentemente contribuem com o suprimento de água para áreas à jusante, dentro da unidade hidrológica, ou retornam para a fonte original (superficial ou subterrânea). A quantidade de água que é incorporada nos tecidos das plantas ou no produto colhido é, geralmente, muito pequena em relação aos demais componentes do balanço hídrico e, por isso, é desconsiderada. A entrada de água no volume de solo por ascensão capilar, na maioria das vezes, representa uma pequena contribuição em campos irrigados e o escoamento superficial deve ser minimizado utilizando-se boas práticas de manejo da irrigação e de conservação do solo.

Para irrigação, é mais conveniente contabilizar a quantidade de água usada na zona radicular do que a quantidade de água nela remanescente. O limite superior de água armazenada no solo (capacidade de campo) é considerado uma referência para uso de água pelas culturas. Os termos utilizados para expressar a quantidade de água usada pelas culturas são depleção de água no solo e déficit de água no solo. A depleção ou o déficit, em algum momento, é igual à quantidade de água necessária para restabelecer a capacidade de campo na zona radicular da cultura.

3 PARTIÇÃO DA ÁGUA APLICADA POR IRRIGAÇÃO

As várias formas de particionar a água de irrigação aplicada são descritas a seguir, conforme apresentado por Burt et al. (1997):

(1) Quanto à possibilidade de recuperação

(a) **Uso consuntivo** – É a quantidade total de água absorvida pela vegetação que é usada para transpiração ou para constituição dos tecidos vegetais, mais a inevitável evaporação da água do solo, da neve e da precipitação interceptada pela vegetação (Jensen, 2007). A água de irrigação que se perde para a atmosfera (E + T) ou que fica contida nos tecidos das plantas colhidas (ou como água molecular nos produtos colhidos, ou em compostos orgânicos) é considerada irrecuperável, ou seja, é consumida. Assim, uso consuntivo refere-se à quantidade total de água em trânsito para a atmosfera, pelos processos de evaporação (E) e transpiração (T) ou que permanece nos tecidos das plantas e dos produtos colhidos. Evaporação e transpiração representam os processos em que a água na fase líquida sai do sistema hidrológico local sob a forma de vapor para retornar via precipitação em algum outro local, e em outro momento. Devido à sua grandeza, a ET é uma parte importante do ciclo hidrológico e do balanço hídrico. Compreender, avaliar e controlar a ET constitui elemento chave na gestão dos recursos hídricos.

Exemplos de usos consuntivos são: evapotranspiração das culturas; evapotranspiração das plantas daninhas; evaporação da água aspergida pelos aspersores; evaporação de reservatórios; evaporação do solo úmido; água exportada com o produto colhido etc.

(b) **Uso não consuntivo** – São quantidades de água que, de alguma forma, transita para fora da área de cultivo, mas não se perde para a atmosfera na forma de vapor. Frações da água de uso não consuntivo pode ser reutilizada na própria área, ou em outros lugares da bacia hidrográfica ou retornar à fonte, embora às vezes degradada em qualidade durante o seu movimento dentro dos limites da área cultivada. Está relacionada com a água que drena abaixo da zona radicular, que escoar superficialmente e que infiltra ou derrama nos canais. Alguns usos não consuntivos são: água para lixiviação de sais no perfil do solo; percolação profunda em excesso; escoamento superficial; infiltração em canais e vazamento em tubulações etc.

(2) Quanto aos benefícios agrônômicos

(a) **Usos benéficos** – O uso benéfico de água pressupõe a água consumida para atingir um determinado objetivo agrônômico como, por exemplo, a produção das culturas (alimentos, fibras, óleo, gramado, plantas ornamentais, forragem). Os principais usos benéficos são ET da cultura e água necessária para a remoção de sais com o objetivo de melhorar ou manter a produtividade do solo. A evaporação da superfície do solo úmido decorrente das irrigações necessárias para lixiviação de sais e recuperação do solo também é considerada como uso benéfico, desde que o objetivo agrônômico seja alcançado durante essas irrigações (Burt et al. 1997; Solomon; Burt, 1999; Perry et al., 2009). A evaporação do solo umedecido pela irrigação poderia ser

considerada como uso não benéfico, entretanto, a ET tradicionalmente combina E e T em virtude de dificuldades inerentes em separá-los. Pela incapacidade prática de separar e quantificar exatamente o quanto a evaporação é inevitável, tem-se incluído a componente evaporação e considerado ET como uso benéfico. São exemplos de usos benéficos: evapotranspiração das culturas; evapotranspiração de plantas benéficas (quebra-ventos, cobertura e proteção do solo, habitat para insetos benéficos); água contida no produto colhido e nos tecidos vegetais; água utilizada para remoção de sais do solo; água utilizada para controle do clima (arrefecimento ou proteção contra geadas); água utilizada para preparação do solo, plantio e germinação de sementes; água utilizada para quebrar a crosta superficial do solo e facilitar a emergência; água utilizada para aplicação de pesticidas e fertilizantes etc.

A água armazenada no solo, na zona radicular, após a colheita, não é considerada para uso benéfico, a menos que esteja disponível para culturas subseqüentes. Esta água deve ser considerada neutra (Burt et al. 1997) até que ela deixe a área objeto e segue outro destino. O intervalo de tempo selecionado para a partição da água influencia a magnitude da fração considerada para os vários destinos. Também, o uso da água proveniente da precipitação não é considerado como um uso benéfico da água de irrigação.

(b) **Usos não benéficos** – Uso não benéfico refere-se à fração da água aplicada que não tem objetivo agrônomico (Burt et al. 1997). São exemplos: excesso de percolação profunda em relação à necessária para remoção de sais; excesso de escoamento superficial, evapotranspiração de ervas daninhas, evaporação desnecessária da água na superfície de solo úmido de áreas vizinhas à área cultivada, deriva pelo vento além dos limites da área cultivada. A aplicação de água não é perfeitamente uniforme, e por isso em alguma fração da área irrigada ocorre excesso de água e percolação; todo excesso além da necessidade de irrigação é considerado uso não benéfico.

Todos os usos benéficos da água são considerados razoáveis, entretanto, os usos não benéficos podem ser considerados razoáveis e não razoáveis. Os usos não benéficos razoáveis são aqueles que podem ser justificados em condições, lugares e momentos particulares. Os usos não benéficos não razoáveis são aqueles que não possuem justificativas técnica, econômica, social e ambiental e poderiam ser evitados.

Muitas vezes, existe um problema prático para delimitar entre usos benéficos e não benéficos. Por exemplo, é compreensível alguma não uniformidade da irrigação, mas não é prático determinar exatamente quanto desta não uniformidade é inevitável. Assim, algum excesso de água decorrente da não uniformidade é considerado uso não benéfico. Embora o escoamento de água no final das parcelas seja comum em alguns sistemas de irrigação por superfície, não é prático determinar exatamente quanto desse escoamento é inevitável. Assim, o escoamento não coletado e não reusado é considerado um uso não benéfico na escala de campo. Por outro lado, é prático

calcular, embora com incerteza, a quantidade de percolação profunda necessária para a remoção de sais. Daí, percolação profunda superior esta, quando associada à irrigação regular, tem sido tradicionalmente considerada como um uso não benéfico na escala de campo.

A evaporação do solo molhado desnecessariamente fora da área cultivada e deriva de água de irrigação para além dos limites da área cultivada são considerados usos não benéficos. Uma vez que nenhum objetivo agronômico é alcançado por irrigações mais frequentes do que o necessário, considera-se uso não benéfico a evaporação associada a estas irrigações. Exemplos de usos não benéficos razoáveis são: evaporação de reservatórios e canais; alguma evaporação de solo úmido; alguma evaporação da água aplicada por aspersão; alguma água utilizada em lavagem de filtros; água para satisfazer algum propósito ambiental; água necessária para manter o padrão de qualidade de drenos; alguma percolação por incertezas no manejo da irrigação; alguma percolação pela não uniformidade de aplicação do sistema de irrigação; perdas que podem ser antieconômicas de serem evitadas etc. Exemplos de usos não benéficos não razoáveis são: percolação profunda excessiva; deflúvio superficial excessivo; evaporação de solo úmido irrigado fora dos limites da área cultivada; evaporação de solo úmido associada com irrigações excessivamente frequentes; vazamentos em tubulações; vazamentos e infiltração em canais.

4 NECESSIDADE DE ÁGUA DE ECOSISTEMAS CULTIVADOS

Em condições naturais, no campo, considerando as plantas e o volume de solo ocupado pelas raízes, um ecossistema cultivado apresenta a seguinte necessidade de água:

$$WTN = WET + WLS + \Delta A + \dots \quad (2)$$

sendo:

WTN - necessidade total de água do cultivo;

WET - necessidade de água para a evapotranspiração (uso benéfico);

WLS - quantidade mínima de água que deve passar através zona radicular para manter um balanço de sais favorável no perfil do solo (uso benéfico).

+... - água de irrigação para outros usos benéficos e não benéficos razoáveis

No campo, a irrigação real necessária (IRN) deve satisfazer a diferença entre a necessidade total de água da cultura (WTN) e a precipitação (PE). Assim:

$$ITN = WTN - PE \quad (3)$$

$$IRN = WET + WLS - PE + \Delta A + \dots \quad (4)$$

5 MEDIDAS DE DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO

A Irrigação pode constituir a maior parte do consumo regional de água. A necessidade de água para finalidades competitivas, como uso municipal, industrial e ambiental, cria uma tensão que afeta toda tomada de decisão política sobre a água. É importante que todos os usuários não somente façam uso inteligente e eficaz de suas águas, mas também sejam capazes de justificar a sua utilização racional e eficaz para competir por água. Os parâmetros de desempenho da irrigação são ferramentas que podem ajudar neste caso (Burt et al. 1997).

Mesmo dentro da comunidade de irrigação, é a competição e, muitas vezes a escassez da oferta, que enfatiza a necessidade do uso eficiente da água. Diferentes equipamentos, sistemas e práticas de irrigação, competem um com o outro no que diz respeito ao consumo de água, custo de capital, custos operacionais e custos de manutenção e de outros fatores. Os indicadores de desempenho da Irrigação podem servir de base para essas comparações e para a seleção de atividades em competição.

Para avaliar os sistemas de irrigação, as práticas e os usos competitivos de água, e compará-los entre si, ou com os objetivos desejados, os engenheiros precisam de indicadores de desempenho da irrigação que incorporam os padrões razoáveis e benéficos.

Tem-se expressado a qualidade da irrigação por alguns indicadores de desempenho nomeados, basicamente, por três palavras-chave: uniformidade, eficiência e grau de adequação. O termo uniformidade refere-se aos indicadores associados à variabilidade da lâmina de irrigação aplicada. É uma grandeza que caracteriza todo o sistema de irrigação e intervém no seu projeto, tanto agrônômico, pois afeta o cálculo da quantidade de água necessária à irrigação, quanto no hidráulico, pois, em função dela, define-se o espaçamento entre emissores de água, a vazão do sistema e o tempo de irrigação.

O termo eficiência é utilizado para identificar indicadores que, através de uma razão entre quantidades de água envolvidas no processo de irrigação, expressam um balanço entre os seguintes volumes de água: (a) derivado da fonte de suprimento; (b) aplicado à parcela; (c) armazenado no solo à profundidade efetiva das raízes para contribuir com o objetivo desejado, (d) evaporado e derivado pelo vento, (e) percolado e escoado superficialmente para fora dos limites da área cultivada, (f) benéficamente ou razoavelmente usado na área cultivada.

O grau de adequação foi proposto para expressar o quanto o sistema de irrigação satisfaz, em termos de fração de área que está recebendo água, a condição de achar-se em conformidade com as necessidades da lavoura, para manter a qualidade do produto e a produtividade vegetal em um nível econômico.

5.1 Indicadores de eficiência

A partição da água aplicada por irrigação é a base para a definição de certos parâmetros de desempenho, especialmente os indicadores de eficiência. Os diferentes

indicadores têm diferentes propósitos e devem ser cuidadosamente diferenciados. Expressos como porcentagens, eles representam frações do volume de água de irrigação destinadas a certas funções. É impossível definir alguns indicadores sem especificar cuidadosamente o período de tempo e os limites da região analisada. Já outros, pelos seus pressupostos, podem evitar esses problemas.

• Eficiência de irrigação – EI

Jensen (2007) afirma que o tradicional termo **eficiência da irrigação** (razão entre água consumida pelo processo de ET do cultivo e água derivada de um rio ou outra fonte natural de água), conforme definido por Israelsen (1950), é parcialmente aplicável ao considerar a água consumida (ET da cultura) na produção do efeito desejado (produção da cultura).

Um sistema ou um projeto de irrigação pode servir a outras necessidades agrícolas além de satisfazer a demanda por ET das culturas (Heermann et al., 1992). A eficiência de irrigação como definida por Burt et al. (1997) representa a razão entre o volume de irrigação que é benéficamente usado e o volume total de água de irrigação (uso benéfico mais uso não benéfico) que deixa os limites da área considerada (Eq. 5):

$$EI = \frac{\text{Vol. de irrigação benéficamente usado}}{\text{Vol. de irrigação aplicado} - \Delta \text{arm. da água de irrigação}} \times 100 \quad (5)$$

O numerador da Eq. (5) representa os usos benéficos da água de irrigação para múltiplos propósitos, incluindo água para ET da cultura, lixiviação de sais, proteção contra geadas, controle de temperatura ambiente, aplicação de fertilizantes e pesticidas, preparação do solo, quebra de crosta superficial do solo para facilitar a emergência entre outros (WET + WLS + ... – PE). A água que se destina à percolação profunda excessiva, ao escoamento superficial, à deriva pelo vento, à evaporação após ser aspergida no ar e usada pelas plantas daninhas tenderá a reduzir a eficiência de irrigação. Estes usos são não benéficos.

O denominador da Eq. (5) corresponde ao volume total de água de irrigação (usos benéficos + usos não benéficos) que deixou os limites do campo (saída = volume aplicado – variação de armazenamento da água de irrigação no solo). Estes volumes de água deixam a área em um intervalo de tempo especificado (por exemplo, intervalo de imediatamente antes de uma irrigação até imediatamente antes da próxima irrigação; ou durante uma estação de cultivo). Se, ao final do período, o volume de água armazenado no solo é o mesmo do início, então a variação de armazenamento da água de irrigação é zero ($\Delta \text{arm. da água de irrigação} = 0$) e toda água aplicada deixou o campo por ET, escoamento, percolação profunda, etc. Dessa forma, a água armazenada temporariamente na zona radicular para uso fora do intervalo de tempo especificado não é contabilizada – nem adicionada ao uso benéfico nem subtraída dele. A eficiência de irrigação é definida entre duas datas, geralmente compreendendo o

ciclo completo da cultura. É determinada somente a *posteriore* e não pressupõe usos benéficos futuros. Para o intervalo de tempo definido, exige uma avaliação acurada da fração da água de irrigação que foi benéficamente usada. Não exige que a água seja requerida e usada uniformemente em toda a área. Os valores dependem da escolha do intervalo de tempo.

• Coeficiente de Uso Consuntivo da Irrigação – ICUC

O coeficiente de uso consuntivo é definido por Burt et al. (1997) como a razão entre o volume de água de irrigação consuntivamente usado e o volume de água de irrigação que deixou o campo, ambos em um intervalo de tempo específico (Eq. 6). Quantifica, portanto, a água não recuperada.

$$ICUC = \frac{\text{Vol. de irrigação consuntivamente usado}}{\text{Vol. de irrigação aplicado} - \Delta \text{arm. da água de irrigação}} \times 100 \quad (6)$$

Da mesma forma que EI, ICUC pode ser usado na escala de campo, de fazenda, de projeto, de distrito de irrigação ou de bacia hidrográfica. Na escala de projeto, por exemplo, a saída total de água líquida da área do projeto (superficial e subsuperficial), em um período de tempo especificado, originada pela irrigação, é $(100 - ICUC)\%$ da água de irrigação suprida ao projeto menos a variação de armazenamento da água de irrigação no solo.

• Eficiência de Aplicação – EA

A irrigação de campos individuais é realizada por diferentes sistemas de irrigação. A meta é armazenar no perfil do solo uma quantidade suficiente de água para suprir a demanda das culturas (o déficit admissível de água no solo - SMD) e outros usos benéficos como, por exemplo, uma fração para lixiviação dos sais. A definição de eficiência de aplicação de água de irrigação, de acordo com Burt et al. (1997), é dada pela Eq. (7):

$$EA = \frac{\text{Lâmina média de irrigação que contribui com a meta}}{\text{Lâmina média de irrigação aplicada}} \times 100 \quad (7)$$

O numerador da Eq. (7) representa a lâmina média de irrigação armazenada no perfil do solo que contribuiu com o objetivo de satisfazer a necessidade de água da cultura (SMD ou WET) e para lixiviar o excesso de sais do perfil do solo (WLS) e outros usos benéficos.

A eficiência de aplicação é uma medida de desempenho aplicável em escala de campo ou a unidades menores e se refere a um evento de irrigação. Normalmente assume que a irrigação real necessária é uniforme em todo o campo. Está implícito o pressuposto de que toda a água destinada para o uso benéfico será usada benéficamente.

A EA descreve quão bem o sistema de irrigação satisfaz a necessidade real de irrigação, cuja base é o conceito de atingir uma quantidade meta de irrigação. É usada para estimar o que acontece durante um simples evento de irrigação, embora a água ainda não tenha sido usada pela cultura. A escolha da quantidade meta de irrigação pode ser o déficit de água no solo (SMD), a ET ou outra quantidade que prevê a manutenção de uma fração de lixiviação ou algum outro uso benéfico.

Na Figura 1 apresenta-se a distribuição de água para um sistema de irrigação por aspersão. A lâmina média aplicada na área (WIA) é 27 mm e lâmina média infiltrada (WINF) é 23,4 mm para satisfazer uma meta IRN = 20 mm (SMD = 15 mm e WLS = 5 mm). Verifica-se que, em aproximadamente 87% da área infiltraram lâminas superiores à meta (área de excesso) e em 13% inferior (área de déficit). Uma aproximação para a lâmina média infiltrada e armazenada no perfil do solo e disponível para satisfazer a meta é: $0,87 \times 20 + 0,13 [(20+15)/2] = 19,7$ mm. Nestas condições, $EA = 100 (19,7/27) = 73\%$. Isto significa que 27% da lâmina aplicada não contribuíram com a meta, isto é, destinou-se à percolação profunda, evaporação e deriva durante a aplicação.

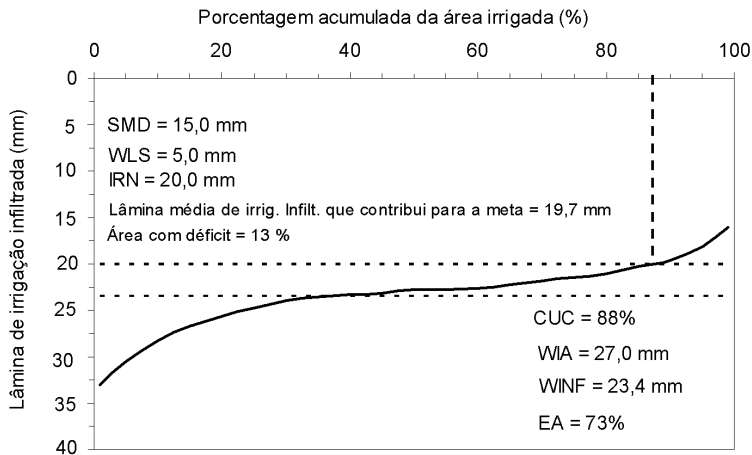


Figura 1 Perfil de distribuição da água infiltrada, em um sistema de irrigação por aspersão após um evento de irrigação

A EA pode ser igual a 1 quando todo o perfil do solo está em déficit após um evento de irrigação. Neste caso, toda a água infiltrada está disponível apenas para uso pela cultura (ET). Dessa forma, quando o perfil do solo não está completamente cheio com água ou a aplicação por irrigação não é completamente uniforme, a cultura pode exibir estresse de água em alguma fração da área cultivada que recebe déficit de água e estresse por falta de oxigênio na fração da área que recebe excesso de água. O excesso de água aplicada em relação à necessidade de irrigação pode contribuir com o escoamento superficial e com a percolação profunda. A deriva de água pelo vento para fora da área cultivada, o escoamento superficial e a evaporação da água aspergida

pelos aspersores tendem a reduzir a eficiência de aplicação. Estes volumes de água representam usos não benéficos e são difíceis de serem quantificados.

● **Eficiência de Distribuição – ED**

A distribuição de água pelos sistemas de irrigação não é completamente uniforme e, por isso, ao se irrigar uma área infiltram-se lâminas de irrigação maiores que a lâmina média meta (IRN) em uma fração da área e lâminas menores em outra fração da área (Figura 1). Se as lâminas infiltradas na área forem sempre menores que IRN diz-se que a irrigação é insuficiente e ocorre déficit de água em toda a área, não se verificando percolação profunda. Se as lâminas infiltradas superarem IRN em toda a área, a irrigação será excessiva e ocorrerá percolação profunda em área total. Diz-se que a irrigação é equilibrada quando as lâminas infiltradas são maiores que IRN em uma fração da área e menores em outra (Figura 1). Para descrever a relação entre a lâmina média de irrigação infiltrada que contribui com a meta e a lâmina média de irrigação infiltrada durante o evento de irrigação, Hart et al. (1979) e Wang et al. (1996) propuseram um indicador de desempenho denominado eficiência de distribuição [Eq. (8)]:

$$ED = \frac{\text{Lâmina média de irrigação que contribui com a meta}}{\text{Lâmina média de irrigação infiltrada}} \times 100 \quad (8)$$

A ED pode ser igual a 1 se a irrigação for deficitária em toda a área; caso a irrigação seja excessiva ela é muito baixa. Valores de ED são sugeridos por Hart et al. (1979): excelente: superior a 0,8; satisfatório: entre 0,5 e 0,8 e, insatisfatório: inferior a 0,5. A eficiência de distribuição reflete o impacto da irrigação excessiva; o seu complemento representa a percolação profunda. A eficiência de distribuição depende da uniformidade de distribuição de água pelo sistema de irrigação e dos critérios de manejo da irrigação. No exemplo da Figura 1 tem-se que a lâmina objetivo (IRN) é 20 mm, porém a lâmina útil infiltrada que contribuiu para atingir esse objetivo é 19,7 mm e, para isso, foi infiltrada uma lâmina média (WINF) de 23,4 mm. Portanto, $ED = 100 (19,7/23,4) = 84,2\%$. Isto significa que a percolação foi 15,8% da água infiltrada. Por não ser completamente uniforme a distribuição de água, na área com déficit a lâmina de irrigação infiltrada não é suficiente para atender a fração mínima de lixiviação, podendo esta área estar sujeita ao excesso de sais.

● **Eficiência de aplicação em potencial – EAP**

A eficiência de aplicação em potencial, também denominada por Hart et al. (1979) como razão efetiva de aplicação, é definida pela Eq. (9). O conceito de EAP é usado como uma medida de desempenho para um simples evento de irrigação. Ao se prevenir o escoamento, representa a fração da água aplicada disponível para infiltração na parcela.

$$EAP = \frac{\text{Lâmina de irrigação disponível para infiltração}}{\text{Lâmina de irrigação aplicada}} \times 100 \quad (9)$$

O seu complemento é uma medida da água de irrigação aplicada que deixou a área cultivada por arrastamento pelo vento e por evaporação antes de atingir a superfície do solo. O numerador da Eq. 9 representa a lâmina ou volume de água que pode ser coletada sobre a superfície de um solo irrigado. Para a aplicação de água representada na Figura 1, $EAP = (23,4/27) \times 100 = 86,7\%$. Isto significa que a evaporação antes da água atingir a superfície do solo mais o arrastamento pelo vento foi 13,3% da água aplicada. Deve-se observar que EA é o produto de ED por EAP quando se despreza o escoamento superficial.

5.2 Indicadores de uniformidade

As medidas de uniformidade de distribuição de água expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo em relação ao valor médio. Uma forma usual de obtê-las é por coeficientes de uniformidade que utilizam medidas de dispersão, expressas de forma adimensional. Para sistemas de aspersão muitos coeficientes de uniformidade foram propostos desde Christiansen (1942).

• Coeficiente de Uniformidade de Christiansen – CUC %

Christiansen (1942) adotou o desvio médio absoluto como medida de dispersão. O desvio médio corresponde à média aritmética do valor absoluto da diferença entre cada lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo e a lâmina média. A expressão de CUC é a seguinte:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N |W_i - \bar{W}|}{N \bar{W}} \right) \quad (10)$$

sendo:

N - o número de observações

W_i - lâmina de água aplicada no ponto i, sobre a superfície do solo

W - lâmina média aplicada.

Esse coeficiente é o mais conhecido e largamente utilizado em sistemas de irrigação por aspersão, sendo que em geral, 80% é seu valor mínimo aceitável. Valores inferiores podem ser admitidos se a precipitação pluvial tem um valor significativo durante a estação de cultivo, ou se os custos do sistema são suficientemente reduzidos com a redução da uniformidade, compensando a diminuição do lucro devido à redução da produção da cultura. Quando CUC é utilizado em sistemas irrigação por superfície ou

em microirrigação, as lâminas de água aplicadas na superfície do solo (W_i) e a lâmina média são substituídas por lâminas infiltradas no solo ou por vazões dos emissores, respectivamente.

Para calcular o CUC em sistemas de irrigação tipo pivô central é usual ponderar as lâminas de água coletadas nos pluviômetros, uma vez que cada coletor representa áreas progressivamente maiores, à partir do centro do pivô. Heermann e Hein (1968) propuseram como fator de ponderação a distância R_i do coletor i ao ponto do pivô. Assim, a equação proposta por Christiansen (1942) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N R_i |W_i - \bar{W}_p|}{\sum_{i=1}^N W_i R_i} \right) \quad (11)$$

$$\bar{W}_p = \frac{\sum_{i=1}^N W_i R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \text{ a lâmina média ponderada} \quad (12)$$

- **Coefficiente de Uniformidade de Wilcox-Swales – CUE %**

Wilcox e Swales (1947) utilizaram o desvio padrão como medida de dispersão e propuseram outro coeficiente de uniformidade, denominado coeficiente de uniformidade estatístico, com uso em aspersão e microirrigação (Eq. 13):

$$CUE = 100 \left(1 - \frac{s}{W} \right) \quad (13)$$

sendo s o desvio padrão da média e W a lâmina média aplicada por aspersão ou a vazão média dos emissores em microirrigação. Valores adequados de CUE são superiores a 75% para aspersão e 85% para microirrigação.

Marek et al. (1986) relatam que o CUC não é sensível ao efeito das lâminas de irrigação muito dispersas em relação à média por utilizar o desvio absoluto médio como medida de dispersão. Os autores sugerem o uso do desvio padrão conforme a equação proposta por Wilcox e Swales (1947), pois essa medida de dispersão permite enfatizar os desvios maiores em relação à média, aumentando a sensibilidade do coeficiente de uniformidade, sendo útil especialmente para sistema de irrigação pivô central quando apresenta problemas de obstrução ou danos mecânicos em emissores. Para pivô central o CUE deve ser calculado utilizando a lâmina média ponderada (Eq. 12) e desvio padrão ponderado (Eq. 14):

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N R_i (W_i - \bar{W}_p)^2}{\sum_{i=1}^N R_i}} \quad (14)$$

• Uniformidade de Distribuição da Água Aplicada– UD %

É definida pela razão entre a lâmina de irrigação média do menor quartil (W_{lq}) e a lâmina média geral (Eq. 15). A média do menor quartil representa a média das lâminas de irrigação aplicadas em de 25 % da área menos irrigada. Sua origem é creditada ao SCS-USDA quando foi nomeada por eficiência padrão. A UD tem sido aplicada em irrigação por superfície, irrigação por aspersão e microirrigação. Na irrigação por superfície consideram-se as lâminas de irrigação infiltradas e na microirrigação a vazão dos emissores.

$$UD = 100 \frac{W_{lq}}{W} \quad (15)$$

A UD é utilizada como indicador dos problemas de distribuição da irrigação. Baixo valor de UD indica percolação profunda excessiva. Isso ocorre quando a lâmina média infiltrada em 25% da área menos irrigada é maior que SMD. Considerando uma distribuição normal para W_p , os valores de UD são relacionados com CUC pela Eq. (16), segundo Keller e Bliesner (1990):

$$UD = 100 - 1,59(100 - CUC) \quad (16)$$

Considerando uma distribuição normal para W_p , Hart (1961) propôs o cálculo de UD pela seguinte expressão:

$$UDH = 100 \left(1 - 1,27 \frac{s}{W} \right) \quad (17)$$

sendo $UD = UDH$ quando as lâminas de irrigação aplicadas têm distribuição normal. O coeficiente 1,27 significa que, em uma distribuição normal, a média do menor quartil ocorre a 1,27 s abaixo da média aritmética de todas as observações. Decorre desse valor que 10,22% da área recebem lâminas de irrigação inferiores à W_{lq} . Para pivô central devem-se utilizar valores ponderados de desvio padrão e lâminas médias. Hart (1979) e Hsiao et al. (2007) propuseram intervalos de valores para alguns índices de desempenho da irrigação na parcela. Na Tabela 1 são apresentadas adaptações desses valores.

Tabela 1 Índices de desempenho sugeridos, adaptados de Hart (1979) e Hsiao et al. (2007)

| Parâmetro | Excelente | Satisfatório | Não satisfatório |
|-----------|-----------|---------------|------------------|
| ED | ≥ 0,80 | ≥ 0,50 < 0,80 | < 0,50 |
| UD | ≥ 0,90 | ≥ 0,70 < 0,90 | < 0,70 |
| EAP | ≥ 0,90 | ≥ 0,80 < 0,90 | < 0,80 |
| EA | ≥ 0,72 | ≥ 0,40 < 0,72 | < 0,40 |

5.3 Grau de adequação

O grau de adequação refere-se à fração da área que recebe um volume de água capaz de manter a qualidade do produto e a produtividade vegetal no nível econômico desejado pelo produtor. Ou seja, é a parte da área abrangida pelo sistema de irrigação que apresenta conformidade às necessidades do sistema de produção agrícola. Como essa definição é muito ampla e requer especificações da cultura, do solo e das condições de mercado, o grau de adequação é normalmente definido em relação à porcentagem da área que recebe no mínimo a lâmina de irrigação necessária para satisfazer o déficit.

A avaliação do grau de adequação é feita utilizando-se uma distribuição de freqüências acumuladas (Figura 4). Nessa figura mostra-se a porcentagem da área que recebe déficit ou excesso de água. A linha pontilhada representa a lâmina de irrigação que recebe a lâmina real necessária (SMD). Nesse caso, o grau de adequação é 70% para SMD = 17 mm, WINF = 18,8 mm, CUC = 85% e $s = 3,4$ mm. A curva de distribuição de freqüências é construída a partir das lâminas de irrigação coletadas durante os ensaios de distribuição de água do sistema.

Segundo Merriam e Keller (1978), para culturas de alto valor econômico, com raízes pouco profundas, o sistema de irrigação mais econômico geralmente é aquele que proporciona alta uniformidade de distribuição de água: UD superior a 80% ou CUC superior a 88%. Para frutíferas, com raízes profundas, sob irrigação suplementar, pode-se admitir UD entre 50% e 70% ou CUC entre 70% e 82%. Para culturas com profundidade de sistema radicular média, os valores recomendados são: UD de 70% a 80% ou CUC de 82% a 88%.

Já Cuenca (1989) propõe valores de CUC com base na área adequadamente irrigada (A_R): culturas anuais extensivas – CUC = 80% e $A_R = 75\%$; frutíferas: CUC = 70% e $A_R = 50\%$; olerícolas: CUC = 85% e $A_R = 90\%$. Esse critério procura refletir o valor econômico da cultura; o custo do sistema de irrigação e a redistribuição de água no perfil do solo. Assim, os níveis de eficiência preconizados na irrigação planejada para satisfazer plenamente a demanda de água da cultura são aqueles possíveis de obter com grau mínimo de adequação de 90%, para culturas com sistema radicular pouco profundo e de alta rentabilidade, 80% para culturas com profundidade média de sistema radicular e de médio valor econômico, ou de 75% para culturas com sistema radicular profundo. Desse modo, a irrigação tradicional é definida em termos da quantidade de água a ser aplicada para evitar déficit hídrico em 90%, 80% ou 75% da área. No

manejo tradicional da irrigação, as eficiências a serem atingidas são aquelas possíveis de serem obtidas com o grau de adequação e a uniformidade de distribuição de água especificadas.

A relação entre uniformidade de distribuição de água e perda por percolação, para $A_R = 50\%$, é esquematizada na Figura 2. Para $CUC = 75\%$ os volumes de excesso e de déficit são maiores que para $CUC = 90\%$. Quando a uniformidade de distribuição é alta, mesmo que o grau de adequação seja apenas 50%, os volumes de excesso e de déficit não são elevados, resultando efeitos menos adversos sobre a produção das culturas e à economia da irrigação.

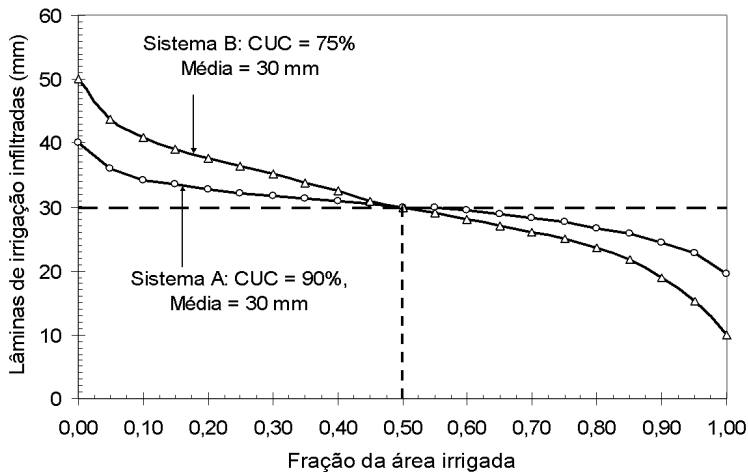


Figura 2 Distribuição de água para um grau de adequação de 50% e dois níveis de uniformidade (CUC) com lâmina média infiltrada de 30 mm

Em uma irrigação com alto grau de adequação a perda por percolação é maior para o sistema com $CUC = 75\%$, resultando menor eficiência de distribuição comparada com $CUC = 90\%$. Dessa forma, os critérios de projeto e as estratégias de irrigação que visam elevados índices de uniformidade têm possibilidade de atingir alta eficiência de distribuição mesmo quando a irrigação é realizada com alto grau de adequação. Contudo, mesmo para irrigações com alta uniformidade, a ED depende da quantidade de água aplicada.

A importância da uniformidade na determinação da lâmina ótima tem sido amplamente reconhecida, mas análise quantitativa universal ainda não foi desenvolvida. A lâmina ótima é influenciada pelo custo da água, custo do capital investido no sistema, uniformidade de distribuição, eficiência de aplicação e valor econômico da cultura.

A relação entre A_R e ED está esquematizada na Figura 3. Observa-se que se o sistema aplica água de acordo com a curva A e a lâmina de irrigação necessária é 27

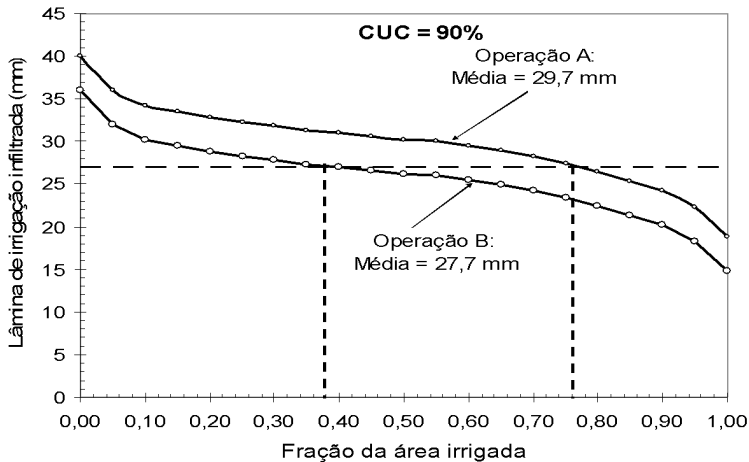


Figura 3 Relação entre grau de adequação e eficiência de distribuição

mm, o grau de adequação é 76%. Se esse mesmo sistema opera segundo a curva B, com a mesma uniformidade, para satisfazer 27 mm o grau de adequação é 38%. Nesse caso, com grau de adequação de 76% o sistema B satisfaz apenas uma necessidade de irrigação de 23 mm.

A redução do grau de adequação possibilita um aumento na eficiência de distribuição. Esse aumento decorre do aumento da área deficientemente irrigada. Irrigação com déficit em geral resultar diminuição da produtividade, mas pode ser mais econômica, caso não ocorra problemas de acúmulo de sais no perfil do solo. Entretanto, elevado grau de déficit, além de reduzir a produtividade pode afetar a qualidade do produto e ser antieconômico. Portanto, para maximizar o retorno econômico é necessário estabelecer um equilíbrio entre os benefícios associados à alta ED e a redução da receita bruta pela menor produtividade e qualidade do produto.

De acordo com Duke et al. (1992) o aumento do CUC de 81,8% para 96,8% equivale a reduzir a vazão em 27% quando se usa a estratégia de manejo com grau de adequação de 75%. Heinemann e Frizzone (1995) mostraram que o aumento do CUC, em sistema pivô central, de 81,2% para 94,0% para os graus de adequação de 75%, 80% e 85% foi responsável por uma economia no volume de água aplicada de 11,9%, 14,2% e 16,7%, respectivamente.

Paz et al. (1997) mostraram a importância de elevados valores de uniformidade de distribuição de água na irrigação do feijoeiro (Figuras 4 e 5): (a) com alta uniformidade, a redução da receita líquida causada pelo déficit de água é pequena e pouco influenciada pelo custo da água (b) com baixa uniformidade a redução da receita líquida por déficit de água diminui com o aumento do preço da água; (c) para qualquer preço da água, quanto menor a uniformidade maior é o efeito do déficit de água sobre a redução da receita líquida; (d) o excesso de irrigação acarreta maiores reduções da receita líquida

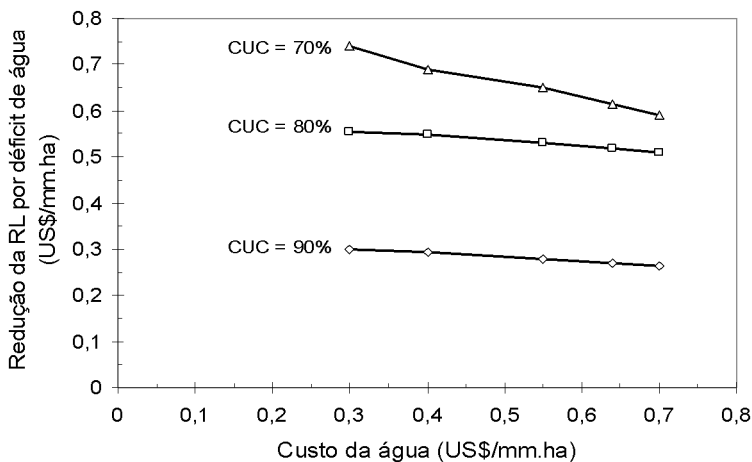


Figura 4 Redução da receita líquida do feijoeiro por déficit de água aplicada, em função do custo da água, para um preço do produto de US\$ 0,44/kg. (Fonte: Paz et al., 1997)

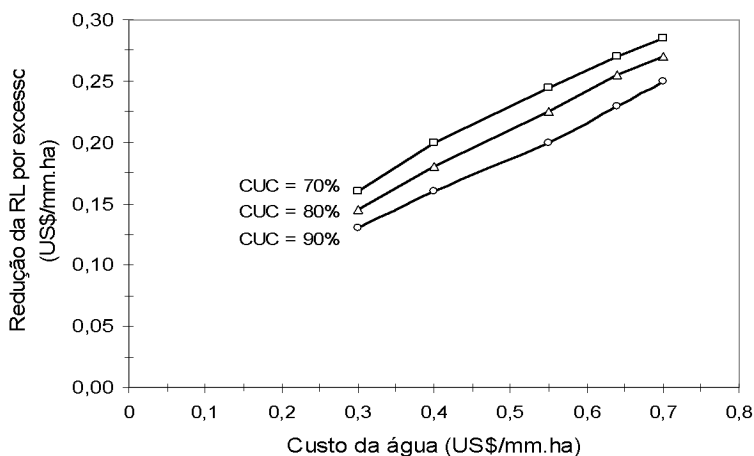


Figura 5 Redução da receita líquida do feijoeiro por excesso de água aplicada, em função do custo da água, para um preço do produto de US\$ 0,44/kg. (Fonte: Paz et al., 1997)

em menores uniformidades de distribuição de água; (e) a redução da receita líquida por excesso de irrigação aumenta com o aumento do custo da água.

Heermann et al. (1992) salientam que elevados valores de uniformidade de distribuição de água e de grau de adequação podem estar associados a elevados investimentos e custos operacionais e, nesse caso, nem sempre se obtém os maiores retornos econômicos. Quando a água não é escassa e a cultura tem alto valor econômico, é possível compensar a baixa uniformidade de distribuição pela aplicação

de uma lâmina adicional à necessidade da cultura para reduzir a área de déficit (Duke et al., 1992 e Mantovani et al., 1996). Entretanto deve-se considerar que o aumento da lâmina de irrigação eleva os custos operacionais do sistema e aumenta as perdas de nutrientes por lixiviação. Esta representa não só uma perda econômica direta como também reduz a produção e pode contaminar o lençol freático. Como os gastos com recursos aumentam com a quantidade de água aplicada e a responsabilidade ambiental justifica um manejo reacional da irrigação pode não ser prudente irrigar com elevado grau de adequação.

6 FATORES QUE AFETAM O DESEMPENHO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Em irrigação, a água aplicada deve atender, preferencialmente, aos usos benéficos. Uma condição necessária a um desempenho satisfatório do sistema de irrigação é a obtenção de elevados níveis de uniformidade de distribuição de água e de eficiência de aplicação. Os fatores relacionados a estes índices de desempenho devem ser considerados no manejo da irrigação resultante de qualquer sistema e as práticas a serem adotadas dependem do sistema de irrigação considerado. Somente depois de uma avaliação criteriosa é possível identificar as prováveis causas de um desempenho insatisfatório e existem procedimentos normatizados para se proceder a esta avaliação.

6.1 Sistemas de irrigação por aspersão

(a) **Pressão de operação** – A água chega ao bocal do aspersor com certa carga de pressão que é transformada em carga de velocidade. O jato de água, lançado através do bocal, pulveriza-se em gotas de diferentes tamanhos e precipitam em uma área ao redor do aspersor. A área molhada, a pulverização do jato e a distribuição da água dependem principalmente da pressão de operação, do tipo de bocal e do ângulo de saída do jato. Para um determinado diâmetro dos bocais, pressões elevadas ocasionam maior pulverização do jato, formando gotas de pequenos diâmetros que apresentam menor energia cinética e atrito com o ar proporcionalmente maior, resultando menor alcance final, além de possibilitar um aumento das perdas por evaporação e deriva pelo vento, reduzindo a eficiência de aplicação em potencial. No caso de pressões de operação elevadas, ocorre maior concentração de água próximo ao aspersor e menor uniformidade de distribuição.

Por outro lado, pressões baixas fazem com que o jato emergente do bocal se mantenha mais íntegro, resultando gotas de maiores diâmetros, as quais apresentam maior energia cinética e menor atrito com o ar, alcançando maiores distâncias, podendo se acumular na periferia do círculo molhado, causando também baixa uniformidade de distribuição.

Pressão de operação inadequada pode ser resultante de dimensionamento inadequado do conjunto motobomba, do diâmetro e do comprimento das tubulações, não prevendo corretamente as variações de pressão causadas pela perda de carga e

pelo desnível geométrico do terreno. O envelhecimento das tubulações pode causar aumento da perda de carga e redução da pressão nos aspersores, assim como a falta de manutenção do conjunto motobomba pode reduzir a vazão recalçada e a altura manométrica. Com frequência a deficiência de pressão no sistema está associada a problemas no bombeamento (motobomba, tubulações de sucção e recalque).

Não sendo prático e nem econômico a manutenção de pressão constante em todos os aspersores ao longo da linha lateral, deve-se permitir um limite de variação aceitável ao longo dessa linha, dimensionando adequadamente seu comprimento e diâmetro. Em geral se aceita uma variação máxima de 20% da pressão de serviço, o que resulta, aproximadamente, 10% de variação de vazão.

(b) **Espaçamento entre aspersores** – Para se manter boa uniformidade de distribuição de água deve haver suficiente sobreposição dos perfis de distribuição dos aspersores. O grau de sobreposição depende das características do perfil de distribuição que, por sua vez, é função do tipo de aspersor, da pressão de operação e das condições de vento. Espaçamentos maiores que os recomendados reduzem a uniformidade de distribuição e aumenta os volumes de déficit e de excesso de água, com redução na eficiência de aplicação, aumento das perdas por percolação, aumento dos custos da irrigação e redução da produtividade. É comum adotar arranjo retangular entre aspersores, com o maior espaçamento entre linhas laterais. Nesse caso, quando o perfil de distribuição é aproximadamente triangular e os ventos são fracos, espera-se um grau de uniformidade aceitável quando o espaçamento entre laterais é aproximadamente 60% a 65% do diâmetro molhado. Casos os aspersores tenham um perfil de distribuição tipicamente trapezoidal, o grau de sobreposição necessário é normalmente menor (espaçamento entre laterais de 70% a 75% do diâmetro molhado).

(c) **Vento** – O vento exerce grande influência sobre a distribuição de água dos aspersores. Em condições de vento, a área molhada sofre um desvio na forma, alongando-se no sentido da ação do vento e diminuindo no sentido oposto. A grandeza da distorção no padrão de distribuição dos aspersores é função da velocidade do vento, do tamanho das gotas e do espaçamento entre aspersores. Velocidades maiores e gotas de menores diâmetros favorecem a distorção do perfil de distribuição, resultando menor uniformidade. O efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição de água pode ser reduzido quando se diminuem os espaçamentos dos aspersores, tanto ao longo das linhas laterais quanto entre elas.

Para Scaloppi (1986) a uniformidade de distribuição é mais influenciada pelo vento nos sistemas de irrigação cujos emissores operam estacionados, como na aspersão convencional, ou então operam em faixas, como nos sistemas autopropelidos. O sistema do tipo pivô central, dotado de emissores proximamente instalados, apresentam desempenho menos influenciado pelo vento.

(d) **Altura do aspersor** – Os tubos de elevação se prestam para manter o aspersor a uma altura adequada em relação à copa das plantas e para eliminar ou reduzir a turbulência da água que chega ao aspersor, assegurando uma irrigação mais uniforme e eficiente. O tubo de elevação deve estar perpendicular à superfície do solo e bem acoplado à linha lateral para evitar instabilidade. Em geral é suspenso por tripé e sua altura depende do porte da cultura. Recomenda-se que o aspersor deve ser posicionado a uma altura de 0,30 a 0,50 m acima da copa das plantas. Em condições de vento fraco ou nulo o aumento da altura do aspersor promove aumento da uniformidade de distribuição de água em sistemas convencionais de irrigação por aspersão (segundo Gomide, 1978, em média 2,2% para cada metro de altura). Entretanto, com o aumento da velocidade do vento podem ser esperadas maiores perdas de água por evaporação e deriva e menor uniformidade de distribuição, principalmente em regiões quentes e secas. Além disso, tubos de elevação maiores aumentam o custo do sistema.

Em sistemas pivô central e linear móvel utiliza-se a colocação de tubos de descida para reduzir a altura do emissor em relação ao solo e reduzir a deriva de água pelo vento e a evaporação, permitindo aumentar a eficiência de aplicação (Abo-Ghobar, 1992). Embora essa seja uma estratégia comumente empregada, emissores muito próximos ao solo podem proporcionar alta intensidade de aplicação de água e, portanto, aumentar o potencial para escoamento superficial, além de reduzir a sobreposição dos jatos e favorecer a redução da uniformidade de distribuição (James e Blair, 1984, Furukawa, 1991; Teixeira, 1992; Miranda et al, 1994). Nesse caso, a manutenção de alta uniformidade de distribuição de água depende da combinação entre o comprimento do tubo de descida e o tipo de placa difusora utilizada no emissor. Se tal combinação não for adequada poderá haver problemas de recobrimento e colisão de gotas (Silva, 1989).

(d) **Velocidade de rotação do aspersor** – O aumento da velocidade de rotação de aspersores rotativos de impacto promove redução do alcance do jato. Keller e Bliesner (1990) recomendam que a velocidade periférica de um aspersor deva estar entre 1 e 2 m s⁻¹. Por exemplo, um aspersor com 18 m de raio de alcance percorre 113 m de perímetro e o tempo ideal para uma rotação deve estar entre 57 e 113 s. Velocidade inferior a 1 m s⁻¹ geralmente resultam irregularidades no tempo de rotação do aspersor e, superior a 2 m s⁻¹, diminui o alcance do jato e proporciona desgaste prematuro do mancal do aspersor.

(e) **Tensão da mola do aspersor** – Altos níveis de tensão da mola resultam menores valores de uniformidade de distribuição de água (Coelho, 1990), além de aumentar o desgaste dos mecanismos envolvidos. O desempenho insatisfatório com elevadas tensões da mola está relacionado com a maior porcentagem de água desviada para próximo do aspersor, ocorrendo também maior pulverização do jato no momento do impacto com o defletor do jato. A ação do defletor no desvio da água é relativamente mais significativa em bocais de menores diâmetros.

(f) Velocidade e alinhamento da linha lateral em pivô central e linear móvel

– O fato de os sistemas de irrigação pivô central e linear móvel não possuírem um movimento contínuo e uniforme de suas torres, devido às variações da velocidade, proporcionam uma redução da uniformidade de distribuição de água ao longo do seu deslocamento. Hanson e Wallender (1986) mediram essa variação da uniformidade em pivô central e linear móvel e relatam que a redução da uniformidade é mais pronunciada quando os sistemas são de baixa pressão.

6.2 Sistemas de microirrigação

Os sistemas de microirrigação incluem vários tipos de emissores de baixa pressão que diferem, principalmente, quanto à forma de descarregar a vazão. Muitos dos sistemas aplicam a água através de gotejadores ou microaspersores individuais. Os gotejadores são inseridos dentro dos tubos ou sobre os tubos. Alguns sistemas de gotejamento possuem orifícios em tubos de paredes duplas e outros tubos gotejadores possuem labirintos impressos no próprio tubo, por onde a água percorre, dissipa a pressão e sai por um orifício. Existe uma diferença fundamental na avaliação de sistemas de microirrigação. O conceito de aplicar uma lâmina de água uniforme em toda a área é conflitante com as vantagens da microirrigação. Um princípio da microirrigação é reduzir a área molhada para minimizar as perdas por evaporação da superfície do solo e por transpiração de plantas daninhas. Como a água é aplicada nas proximidades das plantas, reduz o desenvolvimento de plantas daninhas entre as fileiras da cultura.

As principais causas do desempenho inadequado dos sistemas de microirrigação são:

(a) Pressão de operação – A vazão dos emissores é pequena uma vez que a seção de passagem da água é muito reduzida. Dessa forma, a vazão de um emissor não autocompensante é muito sensível à variação de pressão no sistema, sendo necessário o uso correto de reguladores de pressão na entrada das linhas de derivação. A operação do sistema com pressão incorreta pode resultar aplicação de quantidades de água muito diferentes das requeridas pela cultura. Diferenças de pressão em relação à necessária podem ser resultantes de projetos inadequados das tubulações e da motobomba, da seleção inadequada dos dispositivos de regulação de pressão, da obstrução do sistema de filtragem e do funcionamento deficiente dos reguladores de pressão. Excesso de variação de pressão no sistema, causados por perda de carga nas tubulações e por variação de nível do terreno decorre de um projeto mal dimensionado. Tubulações antigas podem ter a seção de escoamento reduzida por processos físicos ou químicos e aumentar a perda de carga, reduzindo a uniformidade de distribuição de água e a eficiência de aplicação. Recomenda-se que a variação máxima de pressão em uma subunidade de irrigação seja aquela que proporcione uma variação máxima de vazão entre os emissores igual a 10%.

(b) **Qualidade do emissor** – A seleção do emissor requer uma combinação de critérios objetivos e subjetivos. O procedimento de seleção consiste em se tomar decisão sobre a vazão do emissor, o espaçamento entre emissores, o número de emissores por planta e o tipo de emissor a ser selecionado. A qualidade da irrigação e a segurança do sistema dependem da seleção do emissor. Os emissores devem apresentar um conjunto de características de qualidade, de forma a atender os seguintes requisitos gerais: (i) apresentar vazão pequena e pouco sensível às variações de pressão; (ii) apresentar pequena sensibilidade à obstrução, (iii) apresentar resistência à ação química e do ambiente; (iv) apresentar estabilidade temporal da relação vazão-pressão; (v) apresentar pequena variação de fabricação, (vi) apresentar pequena sensibilidade às variações de temperatura, (vii) produzir pequena perda de carga localizada no sistema de conexão emissor-lateral, (viii) possuir baixo custo. Esses objetivos não são atingidos facilmente no projeto de um emissor porque, de certa forma, eles são paradoxais. Por mais cuidadoso que seja o processo de fabricação, dificilmente se obtém emissores iguais e, portanto, uma amostra de emissores terá um coeficiente de variação de vazão, que irá refletir na uniformidade e eficiência da irrigação no campo. Para emissores novos, regulados e não regulados, recomenda-se que o coeficiente de variação de fabricação não exceda 7%, assim como a vazão média de uma amostra não deve divergir de $\pm 7\%$ da vazão nominal.

(c) **Obstrução dos emissores** – A obstrução dos emissores, por processos químicos, físicos ou biológicos, é considerada o mais sério problema em microirrigação, exigindo medidas preventivas. A obstrução afeta a taxa de aplicação e a uniformidade de distribuição de água, aumentando os custos de manutenção, reposição de peças e recuperação, e com inspeção, exigindo avaliações periódicas do desempenho dos sistemas em campo. Pode ocorrer diminuição da produção e danos às culturas se a obstrução não for detectada e eliminada em tempo hábil. Duas alternativas têm sido apresentadas para minimizar o problema. A primeira é o desenvolvimento de emissores menos sensíveis à obstrução e a segunda é melhorar a qualidade da água de irrigação. A manutenção preventiva incluindo filtragem da água, tratamento químico, lavagem das linhas laterais e inspeções de campo, é provavelmente a solução mais efetiva para evitar os danos da obstrução dos emissores.

Para um emissor aplicar pequenas vazões é necessário que a seção de passagem da água seja pequena. Em geral as dimensões das seções de passagem estão entre 0,2 mm e 2,5 mm. Estas pequenas seções tornam todos os emissores susceptíveis à obstrução e requerem cuidados na filtragem da água de irrigação. Um dos mais importantes problemas encontrados na microirrigação, principalmente gotejamento, é a obstrução dos emissores, causada por processos físicos (sedimentação de partículas suspensas na água), por processos químicos (precipitação de substâncias diluídas na água) e por processos biológicos (desenvolvimento de microorganismos no interior do sistema). A qualidade da água deve, portanto, ser analisada, pois, o escoamento

em seções de pequenas dimensões com baixa velocidade, pode causar obstrução por deposição do material que carrega em suspensão.

O entupimento de emissores dificulta a operação do sistema, sendo de difícil detecção, e a limpeza ou a substituição dos emissores entupidos é onerosa. A determinação exata da causa de obstrução pode ser complexa ao se considerar que os vários agentes causadores presentes na água podem interagir, agravando o problema, sobretudo pela natureza dinâmica dos parâmetros de qualidade de muitas águas (Ravina et al., 1992).

A maior parte dos sedimentos que acumula dentro das tubulações de distribuição do sistema começa com partículas pequenas que se unem para causar problemas de entupimento. Estas partículas pequenas são suficientemente leves para serem suspensas e transportadas pela água nos trechos da tubulação onde a velocidade de escoamento é alta. Porém, a velocidade diminui ao longo da linha lateral devido à redução da vazão, contribuindo para a sedimentação das partículas suspensas e aumento do potencial de obstrução dos emissores. Como resultado, o problema de entupimento é mais evidente no final das linhas laterais (Teixeira, 2006).

Para minimizar o potencial de entupimento em irrigação por gotejamento, são feitas recomendações típicas de filtragem para remover partículas com dimensões inferiores a 1/10 do diâmetro da seção mínima de passagem do emissor. Já para microaspersor e difusor este critério pode ser reduzido para 1/5 uma vez que a velocidade da água na seção de passagem é maior. Os emissores regulados são muito sensíveis à obstrução, pois a membrana de material flexível pode reduzir drasticamente a seção de passagem da água.

Para tratamento de recuperação de emissores entupidos existem produtos químicos que removem o limo (biofilme) aderido às paredes das tubulações e dos emissores. De modo geral, uma das medidas mais utilizadas é o tratamento químico da água com uso de acidificação e cloração para controlar entupimento de origem biológica. A cloração pode ser contínua ou intermitente. No entanto deve-se selecionar um método adequado à necessidade de cada sistema. A aplicação contínua é feita utilizando-se baixas dosagens de cloro (1 a 10 mg L⁻¹ de cloro livre), e na intermitente utilizam-se dosagens maiores (acima de 100 mg L⁻¹) na última meia hora ou 1 hora de irrigação, deixando o sistema de microirrigação desativado por pelo menos 12 horas (Nakayama e Bucks, 1991). De modo geral, o tratamento com combinação de ácido e cloro apresenta vantagens em relação ao uso exclusivo de ácido ou de cloro, tanto em termos de efetividade como de economicidade, uma vez que o tratamento com ácido é normalmente efetuado com frequência semanal, utilizando-se o mesmo tempo de aplicação do cloro (Teixeira, 2006).

O efeito combinado das variações hidráulicas, de fabricação e por entupimento sobre o coeficiente de variação de vazão de gotejadores (CV) foi avaliado por Bralts et al. (1981) e verificado através de simulação por Wu (1997). Os estudos mostraram que a obstrução é o fator mais importante que afeta o coeficiente de variação de vazão dos emissores em campo. A obstrução total de 5 a 10% dos emissores resultará um

coeficiente de variação de vazão da ordem de 23 a 33%, que é muito maior que o valor de CV para variações hidráulicas e de fabricação. Dessa forma, o efeito hidráulico no coeficiente de variação de vazão poderá ser insignificante na presença de emissores obstruídos.

6.3 Sistemas de irrigação por superfície

Os problemas de uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação resultam de variações da quantidade de água infiltrada na área irrigada que estão relacionados ao tempo de avanço, ao tempo de reposição da lâmina de irrigação, à vazão derivada à parcela, à taxa de infiltração do solo, à declividade da superfície de escoamento, etc. Alguns fatores que afetam o desempenho da irrigação por superfície são discutidos a seguir, com base nos relatos de Scaloppi (1986).

Os fatores que afetam a uniformidade de distribuição de água pertencem a diversas categorias: (a) Dimensionais - comprimento excessivo das parcelas; sistematização grosseira do terreno; vazão derivada à parcela muito pequena e tempo de aplicação de água muito reduzido; (b) Solo - variações na textura e estrutura do solo, na condição superficial de escoamento, no ter de água, na compactação do solo ao longo da parcela (natural ou provocada por tráfego de veículos, máquinas e implementos); (c) Variação da seção de escoamento superficial - por erosão ou por tratos culturais manuais ou mecanizados; por ocorrência de erosão superficial decorrente da própria irrigação ou chuvas; (d) Variação da resistência ao escoamento superficial - por desenvolvimento de plantas na superfície de escoamento ou por tratos culturais. Já a eficiência de aplicação de água é influenciada pelos seguintes fatores: (a) Dimensionais - comprimento da parcela muito reduzido ou muito longo; vazão muito reduzida ou muito elevada; tempo de aplicação muito reduzido ou muito elevado; (b) Variação das características de infiltração - pelo desenvolvimento normal das irrigações; decorrente dos tratos culturais; por tráfego de veículos, máquinas e implementos; por variações espaciais das características do solo.

As práticas de manejo a serem adotadas para melhorar o desempenho do sistema dependem da natureza do problema e são resumidas a seguir: Para aumentar a uniformidade de distribuição recomenda-se uma ou mais das seguintes práticas: aumentar a vazão de avanço e aumentar o tempo de aplicação; reduzir o comprimento da parcela; aumentar o gradiente de declive; aumentar a taxa de infiltração no final das parcelas através da incorporação de material orgânico ou revolvimento da superfície do solo; construir diques para contenção de água no final das parcelas; compactar de maneira diferenciada a superfície de escoamento, decrescente em direção ao final da parcela; adotar um sistema de fluxo pulsante, pois a aplicação de água à parcela em períodos curtos e alternados tem mostrado maiores taxas de avanço que a aplicação contínua da vazão.

Para aumentar a eficiência de aplicação deve-se: (a) reduzir as perdas por percolação profunda através das seguintes práticas: aumentar a vazão para reduzir o tempo de

avanço; reduzir o tempo de aplicação de água para reduzir o tempo de oportunidade infiltração; reduzir o comprimento das parcelas; reduzir o perímetro molhado da seção de escoamento modificando a forma da seção transversal dos sulcos; aumentar o gradiente de declive da parcela; (b) reduzir o escoamento no final das parcelas através das seguintes práticas: reduzir o tempo de aplicação de água; aumentar o comprimento das parcelas; reduzir o gradiente de declive; aumentar a taxa de infiltração através da incorporação de material orgânico ou revolvimento da superfície do solo; aumentar o perímetro molhado da seção de escoamento, modificando a forma da seção transversal de escoamento; construir diques para contenção da água no final das parcelas; adotar um sistema de reutilização da água de deflúvio no final das parcelas.

7 INDICADORES DE PRODUTIVIDADE DA ÁGUA

As estatísticas de irrigação demonstram o importante papel da agricultura irrigada no mundo e a necessidade de aumentar a eficiência de uso de água nesta atividade agrícola. Embora a espécie cultivada e o genótipo, juntamente com a energia solar disponível, são de vital importância para a eficiência de uso de água, a disponibilidade de água é frequentemente o elemento crítico mais importante na agricultura. Viets (1962) definiu o termo eficiência de uso de água (EUA) e mais tarde, aproximadamente à partir da década de 90, os especialistas passaram a utilizar um termo substituto, importado da economia, denominado produtividade da água (PA).

Os indicadores PA expressam os benefícios derivados do consumo de água pelas culturas e podem ser usados para avaliar o impacto das estratégias de exploração agrícola em condições de escassez de água. Eles fornecem uma visão adequada de onde e quando a água poderia ser economizada. Estes indicadores também são úteis para inferir sobre o potencial aumento da produtividade das culturas que pode resultar do aumento da disponibilidade de água. Informações quantitativas sobre os indicadores PA são necessárias para planejar um manejo eficiente da irrigação sob condições de escassez de água. Para tomar decisão sobre quais estratégias de cultivo nos ajudarão a alcançar a maior produção por unidade de volume de água, precisamos entender as interações entre solo, clima, cultura e água. Considerando a variabilidade espacial do solo e as propriedades de uso da terra, bem como o desenvolvimento vegetativo das culturas, a simulação dos componentes do balanço hídrico certamente aumentará a nossa capacidade de melhorar a produtividade da água em condições de escassez hídrica.

7.1 Produtividade da água – Conceitos

Em condições de escassez de recurso hídrico, a limitada quantidade de água disponível usada mais eficientemente na produção agrícola. Considerando a produção de matéria seca (fotossíntese) e transpiração estão relacionadas aos processos de difusão de CO₂ e de água, a EUA pode ser definida como (Viets, 1962):

$$EUA = \frac{\text{Taxa de produção de matéria seca}}{\text{Taxa de transpiração}} \rightarrow \frac{y \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}\text{)}}{t \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}\text{)}} \quad (18)$$

Nas práticas diárias de irrigação, a produtividade da água (PA) é um termo mais relevante que EUA cujo significado depende da aplicação. Integrando-se as taxas de produção de matéria seca e de transpiração ao longo do tempo, isto é, no ciclo da cultura, temos Y (kg ha⁻¹) e T (mm), e a eficiência de uso de água (EUA) passa a ser expressa pela produtividade física da água, mais comumente denominada produtividade da água (PA_T) (Vazifedoust et. al. 2008), conforme Eq. (19):

$$PA_T = \frac{\text{Rendimento de biomassa}}{\text{Transpiração acumulada}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}}{T \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg)}}{T \text{ (m}^3\text{)}} \quad (19)$$

Quando a irrigação é realizada em escala de campo, é geralmente difícil distinguir transpiração das plantas (T) de evaporação das superfícies do solo e das plantas (E). Daí, ao invés de usar T como base para definir PA, utiliza-se a evapotranspiração de cultura (ET) (Vazifedoust et. al. 2008; Perry et al. 2009), Eq. (20):

$$PA_{ET} = \frac{\text{Rendimento de biomassa}}{\text{Evapotranspiração acumulada}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}}{ET \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1}\text{)}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg)}}{ET \text{ (m}^3\text{)}} \quad (20)$$

Nos sistemas de produção agrícola a produtividade da água é usada para definir a relação entre produção comercial das culturas e a quantidade de água consumida nesta produção e tem servido como um indicador para quantificar o impacto dos calendários de irrigação com relação ao manejo da água. Dessa forma, a produção total de biomassa (matéria seca) é transformada em produção comercial da cultura (Vazifedoust et. al. 2008; Geerts e Raes, 2009; Perry et al. 2009) [Eqs. (21) e (22)]. A PA_{ET} constitui a chave para avaliação das estratégias de irrigação com déficit.

$$PA_T = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura}}{\text{Transpiração acumulada}} \rightarrow \frac{Y_c \text{ (kg)}}{T \text{ (m}^3\text{)}} \quad (21)$$

$$PA_{ET} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura}}{\text{Evapotranspiração acumulada}} \rightarrow \frac{Y_c \text{ (kg)}}{ET \text{ (m}^3\text{)}} \quad (22)$$

Na escala de campo, muitas vezes, o uso de água representado no denominador das Eqs. (21) e (22) é difícil de ser determinado com precisão. Assim, em algumas situações, outros substitutos para PA são usados por muitos profissionais da irrigação e, como consequência, resultam diferentes valores. Se a quantidade total de água aplicada (irrigação + precipitação) é considerada como água consumida pela cultura,

então a Eq. (23) pode ser usada para determinar a produtividade da água (PA_{IR+PE}). O denominador da equação (23) é uma um substituto do uso de água para se obter o rendimento comercial correspondente. Sob condições de precipitação muito baixa, como em regiões áridas e semi-áridas, pode-se converter PA_{IR+PE} em PA_{IR} (Eq.24). Nestes casos negligencia-se a variação de armazenamento de água no solo durante o ciclo da cultura, a percolação, a ascensão capilar e o escoamento superficial. Muitos profissionais usam as Eqs. (24) e (24) para uma determinada região com a finalidade de identificar diferenças entre os métodos de irrigação e/ou manejo de irrigação.

$$PA_{IR+PE} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura}}{\text{Volume de Irrigação + Precipitação}} \rightarrow \frac{Y_C \text{ (kg)}}{IR + PE \text{ (m}^3\text{)}} \quad (23)$$

$$PA_{IR} = \frac{\text{Rendimento comercial da cultura}}{\text{Volume de irrigação}} \rightarrow \frac{Y_C \text{ (kg)}}{IR \text{ (m}^3\text{)}} \quad (24)$$

Para entender melhor como as diferentes culturas, os diferentes ambientes agroclimáticos e as diferentes práticas de manejo da cultura podem influenciar a relação entre a produção agrícola e o consumo de água, tem-se recomendado o uso do conceito de produtividade da água (PA), como a razão entre a quantidade produzida e a quantidade de água consumida para obter essa produção. Entretanto, na definição da produtividade da água, é necessário especificar o produto (biomassa ou produção econômica) e o consumo que estamos nos referindo (transpiração, evapotranspiração, volume total de água aplicada ou volume de irrigação).

Para Bos (1985), embora muito útil o conceito de PA, em muitas análises não considera explicitamente o efeito da irrigação, especialmente em regiões úmidas, onde a precipitação é significativa. Para isso, desenvolveram expressões que podem, mais consistentemente, descrever a produtividade da água de irrigação. Suas expressões podem ser escritas para ET e para água aplicada por irrigação (IR) [Eqs. (25) e (26)]:

$$PA_{ET} = \frac{Y_{CI} - Y_{Cs}}{ET_1 - ET_s} \rightarrow \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (25)$$

$$PA_{IR} = \frac{Y_{CI} - Y_{Cs}}{IR} \rightarrow \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (26)$$

sendo Y_{CI} o rendimento da cultura irrigada (kg ha^{-1}), Y_{Cs} o rendimento da cultura não irrigada (kg ha^{-1}), ET_1 a evapotranspiração da cultura irrigada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), ET_s a evapotranspiração da cultura não irrigada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e IR a quantidade de irrigação aplicada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$). É claro que em áreas áridas e semi-áridas, Y_{Cs} seria zero ou muito pequeno; no entanto, ET_s poderia ser variável e muito maior do que zero, dependendo das práticas agronômicas. Em regiões úmidas Y_s (produção sem irrigação) poderia

ser igual àquela obtida com o mesmo manejo de irrigação na falta da precipitação. Assim, a melhor caracterização pode ser feita pela comparação entre os rendimentos da cultura de sequeiro com a irrigada. Muitas vezes, porém, as práticas agrônômicas diferem substancialmente entre os cultivos de sequeiro e irrigado (variedades, época de semeadura, manejo da fertilidade, manejo de pragas, densidade de semeadura, geometria de plantio, etc.). Assim, com base nas diferenças de manejo, resultados bastante diferentes podem ser obtidos para Y_{Cs} e ET_s .

Como o principal interesse dos fazendeiros é a produção econômica das culturas, a PA pode ser também expressa em termos monetários [Eq. (27)], denominada aqui de produtividade econômica da água (PA_E). Regiões onde a precipitação é pouco significativa, ou existe escassez de recurso hídrico para a agricultura, e não há restrição de terra, o objetivo do agricultor deverá ser maximizar a receita líquida por unidade de volume de água de irrigação. Também se recomenda o uso da PA_E nos casos de campos cultivados com múltiplas culturas.

$$PA_E = \frac{R\$ \text{ kg}^{-1} \times \text{kg ha}^{-1}}{\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}} \rightarrow \frac{R\$}{\text{m}^3} \quad (27)$$

O numerador da Eq. (27) representa a receita líquida por unidade de área e o denominador pode ser o volume de água consumido pelo processo de ET (uso benéfico), volume de água aplicado por irrigação (uso benéfico + não benéfico) ou, em alguns casos, volume total de água aplicado ($IR + PE$), dependendo do interesse.

Em regiões com escassez de água, as culturas com elevado valor de PA devem ser preferidas, embora isso não seja o único fator. Com efeito, culturas como grãos e frutas, de alto valor energético (por exemplo, culturas com elevado teor de proteínas) podem ter um baixo valor absoluto de PA, mas o seu valor nutricional é mais importante, e isto deve ser considerado na avaliação dessas culturas para uso em áreas propensas à seca. Os valores de PA relatados na literatura variam conforme os autores expressam o denominador: irrigação; irrigação mais precipitação; evapotranspiração; transpiração.

De acordo com Howell et al. (1992) e Wallace e Batchelor (1997) os mecanismos agrônômicos e de engenharia para aumentar PA são: (1) aumentar o índice de colheita através do melhoramento genético da cultura ou do manejo; (2) reduzir a taxa de transpiração pela seleção de espécies melhoradas; (3) maximizar a produção de matéria seca pela melhoria da fertilidade do solo, controle de doenças e pragas e otimização do plantio; (4) aumentar o componente T (transpiração) do balanço hídrico à custa da redução de outros componentes, como pela redução de E, através do uso de resíduos na superfície do solo, cultivo mínimo do solo, cobertura superficial da superfície do solo, irrigação por sulcos alternados nas entrelinhas de plantio; (5) reduzir DP, evitando o molhamento excessivo da zona das raízes e minimizando a necessidade de lixiviação para o controle da salinidade; (6) reduzir o escoamento superficial utilizando resíduos de colheita e técnicas de conservação do solo e evitar a compactação do solo

e a formação de crostas superficiais; (7) impor gradualmente déficits hídricos no solo; (8) utilizar variedades com sistemas radiculares mais profundos. O elemento (3) é o foco da pesquisa atual de agricultura de precisão para melhorar os rendimentos relativos dos insumos, aplicando-os no tempo e no local necessário. O elemento (4) é a base de quase todas as tecnologias de conservação de água, para melhorar a captação da água das chuvas e as tecnologias de irrigação para evitar ou minimizar as perdas na aplicação.

7.2 Fatores que afetam a produtividade da água

Os fatores que influenciam o rendimento das culturas (numerador das equações de PA) e a água aplicada ou necessária para ser aplicada (denominador das equações de PA), claramente, influenciam a produtividade da água e podem ser agrupados em oito categorias:

(1) **Cultivar** – De acordo com Ali e Talukder (2008) as plantas perdem grande quantidade de água quando abrem seus estômatos para capturar CO_2 do ar não saturado. Através da cavidade sub-estomática o vapor difunde para a atmosfera, enquanto que o CO_2 segue caminho oposto. A modelagem matemática destes dois processos opostos de difusão mostra que PA é uma função forte dos gradientes de concentração de CO_2 e de vapor d'água dentro e fora da folha. Estes dois fluxos opostos são regulados por estômatos. Portanto, o comportamento estomático irá determinar a PA de uma determinada espécie ou cultivar. É sabido que as plantas C4 têm maior PA que plantas C3.

(2) **Irrigação** - Muitas formas de conservação de água têm sido investigadas na agricultura irrigada. A irrigação com déficit e irrigação por gotejamento têm mostrado que PA pode ser aumentada (Geerts e Raes, 2009; Ali et al., 2007; Jalota et al. 2006). Em geral a técnica de irrigação com déficit estabelece uma relação de troca: uma menor produção para uma maior PA. Então surge a pergunta se é possível aumentar PA sem redução significativa de produtividade. Existem exemplos em que a produção de grãos, com grande proporção da biomassa total, mostra uma relação parabólica negativa com a quantidade de irrigação. Isto sugere que, quando a quantidade de água aplicada é grande, o crescimento vegetativo excessivo pode levar a uma menor atividade de raiz, estrutura do dossel pouco saudável e menor índice de colheita (razão entre a produção econômica e a fitomassa seca da parte aérea, ou total). Isso significa que a elevada produção de biomassa, decorrentes de um abastecimento de água elevado, não levará a um alto valor de PA, se definida como a produção econômica por unidade de volume de água de irrigação.

Portanto, o objetivo é aumentar PA através do aumento do rendimento econômico, pela limitação do fornecimento de água para aumentar o índice de colheita. As pesquisas recentes têm mostrado que em algumas condições, a produção de grãos

pode ser melhorada, reduzindo a quantidade de água aplicada à cultura (Yang et al. 2000, 2001, 2002), principalmente através do aumento do índice de colheita que tem se mostrado um componente chave para melhorar a PA (Ehdaie e Waines, 1993). Sob condições de déficit gradual e crescente, as culturas apresentam maiores taxas fotossintéticas do que sob condições de déficits severos e rápidos. No primeiro caso, a regulação osmótica aumenta até certo ponto, enquanto no segundo ela permanece constante. No déficit gradual o ajustamento osmótico permite o crescimento e a manutenção da fotossíntese, e a adaptação estomática.

Quanto ao método de irrigação utilizado, há muitas razões válidas para melhorar a tecnologia de irrigação. Do ponto de vista do agricultor, o potencial para aumentar a proporção de água disponível na entrada da parcela que contribui com a transpiração da cultura (T) é a fonte mais provável de aumento das receitas, e a economia em mão-de-obra também é potencialmente significativa. Várias questões devem ser analisadas em cada situação para avaliar o impacto mais amplo de aumentar T. O aumento ou redução da evaporação (E) é altamente dependente do método de irrigação, do manejo e da cultura. Por exemplo, com irrigação por gotejamento subsuperficial a evaporação é minimizada. Já para muitas culturas arbóreas, com irrigação por gotejamento superficial aumenta-se o componente E porque parte da superfície do solo está molhada com alta frequência. As diferenças específicas dependem da frequência relativa de irrigação e da porcentagem de solo molhado.

Já se acumula vasta experiência com quase todas as tecnologias de irrigação. No entanto, as surpresas constituem mais a regra do que a exceção, quando se aplica pela primeira vez uma nova tecnologia. Muitas vezes, as tecnologias aparentemente promissoras, simplesmente não são apropriadas. Embora seja desejável que a irrigação melhore a produção no campo, por muitas razões (ambiental, qualidade de colheita, produtividade das culturas, consumo de energia, etc), é difícil encontrar a combinação mais adequada de modernização sustentável entre equipamento e manejo da irrigação para um local.

Perry et al. (2009) discutem sobre a complexidade envolvida em fazer previsões simples de economia de água (na escala de campo) e aumento do rendimento. Apresentam resultados de um estudo feito na Califórnia, pelo Centro de Pesquisa e Treinamento em Irrigação (ITRC) em escala comercial em um ambiente moderno, com medição de vazão excelente, flexibilidade de entrega de água e disponibilidade de suporte técnico. O estudo examinou a água aplicada e os rendimentos de tomate industrial em 187 campos irrigados por sulcos e 164 campos irrigados por gotejamento, com áreas típicas de 50 ha. Resulta da comparação entre os rendimentos e lâminas de água aplicadas que seria arriscado supor que há, em geral, maiores benefícios imediatos quando a irrigação por gotejamento é implementada.

(3) Remobilização de carbono pré-armazenado – As plantas monocárpicas, como o arroz e o trigo, precisam da iniciação da senescência de toda a planta para

que os carboidratos armazenados nos caules e folhas possam ser remobilizados e transferidos para o desenvolvimento de grãos. Normalmente, quando essas plantas são cultivadas em sistemas com grande oferta de insumos, os carboidratos pré-armazenados contribuem com 25-33% do peso final dos grãos (Ali e Talukder, 2008; Ali et al., 2005).

(4) **Fatores de solo** - A perda de água por evaporação da superfície do solo desempenha um papel significativo no crescimento das plantas durante a germinação e estabelecimento de plântulas, e também durante outros períodos de crescimento. A textura do solo e o teor de matéria orgânica determinam a capacidade armazenamento de água do solo e as propriedades de disponibilidade. A rápida secagem do solo não proporciona oportunidade para a regulação e o ajustamento osmótico e, portanto, afeta a produção das culturas e a produtividade da água (Ali e Talukder, 2008). O estado nutricional da cultura jovem, especialmente quanto ao nitrogênio, pode afetar significativamente a taxa de desenvolvimento da área foliar e, conseqüentemente, as perdas por evaporação do solo. A matéria orgânica no solo interage com outros nutrientes e aumenta a atividade microbiana.

(5) **Fatores agronômicos** - Os fatores agronômicos que podem afetar a produtividade da água são oportunidade de semeadura, uniformidade de estabelecimento da cultura, utilização de herbicidas, e o padrão do cultivo anterior. A produtividade da água depende não só da forma como a cultura é manejada durante seu ciclo, mas também da forma como é ajustada ao manejo da fazenda, tanto no espaço quanto no tempo (Ali et al., 2005).

Através de um melhor ajuste das fases de desenvolvimento vegetativo e de floração, pode-se garantir o tempo ideal de colheita, e obter vantagens táticas do clima para programar o plantio da próxima cultura no momento certo, facilitando bom estabelecimento. Qualquer técnica que facilita o desenvolvimento e permite uma rápida cobertura da superfície do solo pela cultura, reduzindo o estabelecimento de plantas daninhas e permite reduzir a velocidade do vento pode, na maioria das vezes, aumentar a competitividade da cultura e a produtividade da água (Cooper e Gregory, 1987). Entre as práticas que contribuem especialmente para esses fatores estão a semeadura precoce, a seleção de variedades com crescimento precoce, adubação adequada, população de plantas adequada e redução do espaçamento (Gregory, 1991).

Dentro do conceito de melhoria da PA, a água transpirada pelas plantas deve aumentar em relação à evaporação da superfície do solo. O manejo do solo e da palha pode influenciar o balanço de água no solo, afetando a infiltração, o armazenamento e as perdas de água por evaporação da superfície do solo. Estes efeitos combinados podem também afetar substancialmente a quantidade de água disponível para a cultura. O escoamento superficial durante as chuvas intensas pode ser bastante reduzido por uma boa cobertura de palha. A cobertura da superfície do solo com palha e matéria

orgânica impacta a resposta da planta em termos de aumento do crescimento e da produção das plantas e oferece oportunidades para melhorar a produtividade da água.

O rápido desenvolvimento da cobertura do solo se baseia no estabelecimento de plântulas saudáveis. O encrostamento da superfície de solos com estruturas deficientes, profundidade de semeadura irregular e uso de sementes de má qualidade podem levar a grandes falhas na cobertura vegetal. O crescimento de folhas de plantas jovens é fortemente influenciado pela temperatura do ar e do solo. Assim, os cultivos de inverno, com semeadura precoce, quando o solo e o ar ainda estão quentes, proporcionam bom desenvolvimento do dossel e boa cobertura do solo durante o outono e o inverno, com menores perdas por evaporação da superfície do solo.

(6) Fatores de Engenharia - Uma importante restrição ao uso eficiente da água está associada com sua medida e quantificação. Medições e registros de dados de vazão, pressão do sistema, variáveis de clima são raros e providos erros potenciais. A determinação correta da quantidade de água requerida pela cultura em períodos específicos do seu desenvolvimento é difícil, se não impossível, para muitos irrigantes. Sem a previsão da lâmina de irrigação definida como objetivo é improvável 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 e a produtividade da água para a maioria dos sistemas de irrigação seja relativamente baixa.

(7) Fatores humanos - Diversos fatores humanos influenciam o uso da água de irrigação na agricultura. Hábitos, preferências, tradições e nível de aversão ao risco são alguns elementos importantes (Scaloppi, 1986). Em geral existe certo grau de desconfiança quanto às inovações tecnológicas, mantendo-se as tecnologias já utilizadas, e suas inconveniências são tacitamente aceitas. O nível educacional do agricultor pode influenciar decisivamente no sucesso da irrigação. Agricultores de melhor formação tecnológica podem contribuir com uso eficiente da água e superar as expectativas de desempenho dos sistemas de irrigação. Ao contrário, mesmo os sistemas de elevado nível tecnológico podem não corresponder às expectativas quando os agricultores não assimilam alguns princípios básicos envolvidos na operação desses sistemas.

A aversão ao risco é o comportamento normal de qualquer indivíduo. Embora os agricultores não usem o rigor das análises econômicas para tomarem decisão sobre a quantidade de irrigação, muitas vezes são capazes de desenvolver estratégias intuitivas para se protegerem do risco. Estas estratégias frequentemente estão relacionadas com o aumento da quantidade de irrigação aplicada. Tem-se observado que maiores riscos econômicos ocorrem para menores quantidades de água aplicada (irrigação

com déficit) para um grande número de culturas. Neste caso, uma decisão racional do agricultor não escolheria livremente a irrigação com déficit, pois menores riscos estão associados à aplicação de maiores lâminas de água.

(8) **Fatores econômicos** - Fatores econômicos podem influenciar o nível ótimo de PA. Às vezes, grandes custos adicionais são envolvidos no aumento da PA, por exemplo, o investimento em aspersão, microirrigação, ou outro sistema de alta tecnologia. Devem estar incluídos aqui os custos fixos e operacionais envolvidos em uma possível mudança de sistema de irrigação. Os benefícios incluem a água economizada mais o aumento da produção agrícola (se houver). O revestimento de canais de irrigação também envolve uma quantidade considerável de custo fixo, que muitas vezes não pode ser suportado pelos agricultores, especialmente nos países do terceiro mundo.

A adaptabilidade de qualquer padrão de cultivo depende da sua rentabilidade. Os agricultores respondem às regras do mercado buscando o maior retorno por unidade de terra (quando a terra é restrita) ou por unidade de volume de água aplicado (quando a água é restrita) (Frizzone, 1998).

7.3 Técnicas para aumentar a produtividade da água

Aumentar a produtividade da água implica como podemos melhorar de forma eficaz o resultado ou o rendimento de uma cultura com a água atualmente em uso. A resposta é dada em três níveis (Passioura, 2006): (i) transpirar a maior parte da água fornecida (minimização da perda indesejada, E), (ii) trocar água transpirada por CO₂ mais eficientemente na produção de biomassa, e (iii) converter a maior parte da biomassa em produção econômica (por exemplo, grãos, fibras, óleo, fruto etc.).

Muitas tecnologias para melhorar a produtividade da água e o manejo dos recursos hídricos escassos estão disponíveis. Entre as técnicas mais promissoras e eficientes estão: (i) irrigação com déficit para otimizar o uso da água escassa, e (ii) aproveitamento de água para melhorar o rendimento agrícola em ambiente seco. No entanto, a melhoria da produtividade da água exige que se explore não só o manejo da água, como também de outros fatores, como o uso cultivares melhoradas, manejo da fertilidade e práticas culturais que influenciam a produtividade.

Na Tabela 2 são sintetizadas algumas opções disponíveis para aumentar a produtividade da água em condições de escassez hídrica. Os fatores são divididos em cinco categorias gerais: agrônômicos, de engenharia, de manejo, institucionais e econômicos. Destaca-se que o foco em apenas uma categoria terá pouca chance de sucesso.

7.4 Irrigação com déficit em condições de água escassa

São duas as estratégias para planejar o manejo da irrigação: (a) Atendimento pleno da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação sem déficit: consiste em

Tabela 2 Exemplos de opções disponíveis para aumentar a produtividade da água na agricultura

| Categoria de fatores | Opções |
|----------------------|--|
| Agrônômicos | <p>Adotar sistema de cultivo para melhorar o aproveitamento da precipitação ou reduzir a evaporação da água – uso de resíduos de culturas na superfície do solo; escarificação profunda do solo ou subsolagem, para melhorar a infiltração da água; usar técnicas de conservação do solo; reduzir espaçamento entre plantas, etc.</p> <p>Utilizar rotação de cultura e selecionar sequência de cultivos que possibilitam reduzir a infestação de pragas, doenças e ervas daninhas e manter a fertilidade do solo.</p> <p>Melhorar a fertilidade do solo - solos com boa fertilidade propiciam maior desenvolvimento do sistema radicular, resultado melhor aproveitamento da água e, conseqüentemente, maior PA. O manejo do nitrogênio é um dos principais fatores para atingir maior produtividade das culturas e atingir maior PA em condições de déficit hídrico.</p> <p>Aplicação de matéria orgânica no solo e utilização de adubação verde (cultivo e incorporação de algumas leguminosas ao solo) – melhora a estrutura do solo e aumenta a capacidade de armazenar água e nutrientes.</p> <p>Melhoramento genético – selecionar genótipos que respondem à irrigação para aumenta a PA; que proporcionam alto índice de colheita; que tenham alta eficiência de transpiração (reduzir a transpiração sem prejuízo da fotossíntese).</p> <p>Usar estratégias avançadas de cultivo que maximizam área cultivada durante os períodos de menor demanda de água ou quando a chuva pode ter maior probabilidade de ocorrência.</p> |
| Engenharia | <p>Melhorar a uniformidade de distribuição da água de irrigação.</p> <p>Usar estruturas para conter e armazenar água de chuva.</p> <p>Usar programas de conservação, manutenção e reparos dos sistemas de irrigação e das estruturas hidráulica para reduzir riscos de perdas de água. Na irrigação por sulcos, utilizar aplicação de água por pulsos (vazão intermitente).</p> <p>Utilizar sistema de reuso da água escoada no final das parcelas de sistemas de irrigação por superfície.</p> <p>Projetar sistemas de tratamento e reuso de águas servidas na fazenda.</p> <p>Modernizar e otimizar os sistemas de irrigação - os aspectos técnicos de modernização incluem: manejo da água, sistema de funcionamento e melhoria das estruturas e dos equipamentos.</p> |
| Manejo | <p>Promover irrigações com déficits pequenos a moderados para possibilitar a extração de águas mais profundas do solo.</p> <p>Para irrigação por aspersão, realizar a aplicação de água em horários de baixa velocidade dos ventos para reduzir perdas por evaporação e deriva, ou utilizar quebra-ventos.</p> <p>Para irrigação de lata frequência, realizar irrigações pela manhã, nos horários em que os estômatos das plantas estão abertos, para aumentar o tempo de oportunidade de aproveitamento da água pelas plantas e reduzir a oportunidade de percolação profunda, especialmente em solos arenosos.</p> <p>Minimizar a salinidade na zona radicular das culturas.</p> |

Continua na próxima página...

Continuação da Tabela 2

| Categoria de fatores | Opções |
|----------------------|---|
| Institucionais | Adotar sistema de tarifação da água. Promover incentivos para o uso eficiente da água e penalidades para o uso ineficiente. Fomentar a educação e a formação do usuário para aprender técnicas modernas de irrigação. Estimular a assistência técnica e a difusão de conhecimentos. |
| Econômicos | Em regiões onde a precipitação é significativa, utilizar sistemas de irrigação de menor investimento inicial. Realocar água de cultivos de menor valor econômico para cultivos de maior valor econômico. Quando a disponibilidade de área é restrita e a água é relativamente irrestrita, utilizar irrigação para maximizar a renda por unidade de área. Quando a disponibilidade de água é restrita e a terra é relativamente irrestrita, irrigar para maximizar a renda por unidade de volume de água. |

suprir totalmente a necessidade de água da cultura, em condições de irrigação total ou de irrigação suplementar, e (b) Atendimento parcial da demanda evapotranspirométrica da cultura, ou irrigação com déficit: consiste em atender parcialmente a demanda de água da cultura por evapotranspiração, podendo ser praticado em condições de irrigação total ou suplementar.

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 os fundamentos da irrigação tradicional.

Na irrigação com déficit, o objetivo é maximizar a produção por unidade de volume de água aplicada (produtividade da água). Com esse objetivo, visa-se a aumentar PA e economizar água pelo aumento da eficiência de aplicação (eficiência técnica), redução das perdas de água (usos não benéficos) e redução da eficiência de armazenagem, 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, aumenta-se PA, reduz-se a percolação, aumenta-se EA e reduzem-se os custos operacionais da irrigação e a lixiviação de produtos químicos.

A irrigação com déficit, se aplicada durante estádios fenológicos específicos das culturas, resulta substancial aumento da produtividade da água. Existem diferentes formas de manejar a irrigação com déficit. O irrigante pode reduzir a lâmina de irrigação, aplicando apenas uma fração da evapotranspiração da cultura, aplicar água em apenas uma fração do volume de solo que contém o sistema radicular, reduzir a frequência de irrigação, pelo aumento do intervalo entre irrigações sucessivas, completar apenas uma fração da capacidade real de água disponível do solo na zona radicular, irrigar por sulcos alternados ou aumentar o espaçamento entre eles.

Ali e Talukder, (2008) analisaram a natureza das curvas de produtividade de grãos de trigo e da água versus lâmina total de irrigação e evapotranspiração de cultura. Deste estudo observa-se que o aumento de PA decorre da redução na água aplicada ou na evapotranspiração, com redução do rendimento. A rigor, a definição da melhor quantidade de irrigação é econômica. Attingir altos rendimentos só é econômico enquanto os ganhos decorrentes do aumento no rendimento superarem os aumentos dos custos de produção. Ainda pode-se inferir que políticas para maximizar o rendimento devem ser consideradas cuidadosamente antes de serem aplicadas sob condições de escassez de água.

Pesquisas com trigo, realizadas no ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas), relatadas por Zhang e Oweis (1999), demonstraram que a aplicação de apenas 50% da necessidade total de irrigação suplementar resultou redução de apenas 10-15% no rendimento. Supondo que sob água limitada apenas 50% da necessidade de irrigação plena estariam disponíveis na fazenda (4440 m³ para uma área de 4 ha), os autores compararam a irrigação com déficit com outras opções. Eles mostraram que um agricultor com 4 ha poderia, em média, produzir 33% mais grãos se o déficit de irrigação fosse aplicado em toda a área, em relação à irrigação plena sobre parte da área. A irrigação com déficit aumentou os benefícios em mais de 50% em comparação com os fazendeiros que praticam irrigação plena.

A irrigação com déficit 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 quatro fatores: aumento da eficiência de aplicação de água, aumento da produtividade da água, 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 com déficit em circunstâncias específicas e concluíram que a técnica pode aumentar a receita líquida proporcionada pelas culturas irrigadas. 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 quantidade de água que maximiza a receita líquida por unidade de volume de água (Frizzone, 1998).

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. Isto significa que, 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. 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.

No exemplo que segue, 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 6) foi obtida no campo experimental da Embrapa – Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte, em Parnaíba, PI, cujas condições edafoclimáticas representam a região dos Tabuleiros Costeiros (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).

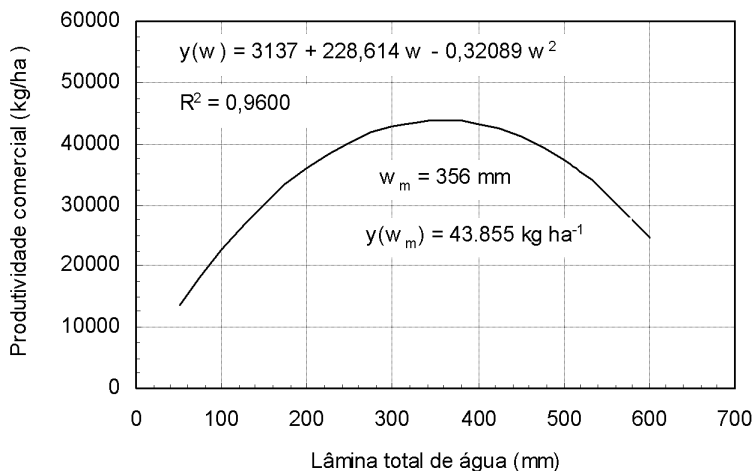


Figura 6 Função de produção para a melancia, obtida para as condições edafoclimáticas da região dos Tabuleiros Costeiros do Piauí (Fonte: adaptado de Andrade Júnior et al., 2001)

Na Figura 7, 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.

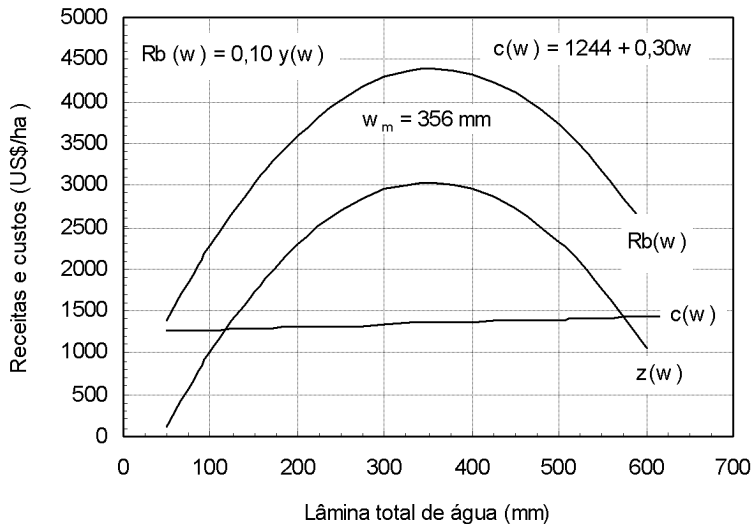


Figura 7 Funções de receita bruta, de custos e de receita líquida para a melancia, em relação à quantidade de água aplicada, para $p = \text{US\$ } 0,10 \text{ kg}^{-1}$, $c_f = \text{US\$ } 1.244 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w = \text{US\$ } 0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$

Na Figura 8 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.

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

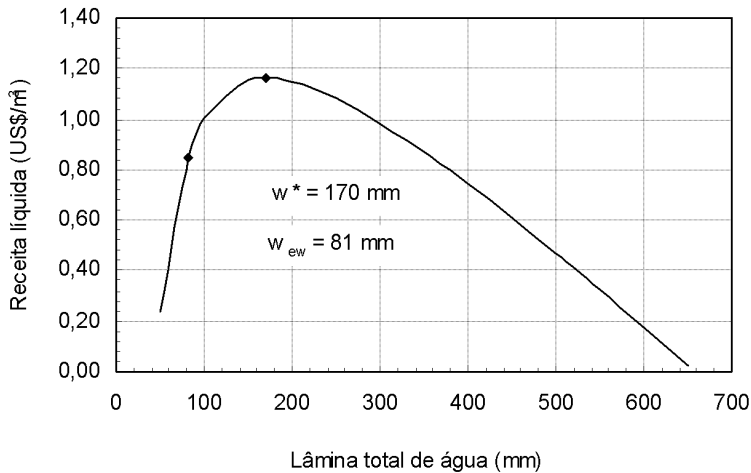


Figura 8 Receita líquida por m³ de água aplicada, para a cultura da melancia, em relação à lâmina total de água aplicada, para $p=US\$0,10 \text{ kg}^{-1}$, $c_f=US\$1.244 \text{ ha}^{-1}$ e $c_w=US\$0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$

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 3, 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 mercado atacadista de Teresina - PI 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 $c_w = US\$0,30 \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$.

Observa-se que a lâmina ótima de irrigação e a lâmina equivalente diminuem enquanto aumenta o preço do produto (Tabela 3), 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 3, observa-se que, para $p = US\$0,10 \text{ kg}^{-1}$, 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.

Tabela 3 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 | |

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.

8 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

A necessidade de melhorar a produtividade da água na agricultura continuará aumentando enquanto cresce a demanda por alimentos. No entanto, elevado valor da produtividade da água terá pouco interesse se não estiver associada com bons rendimentos agrícolas e elevados rendimentos econômicos. Esta associação de valores tem implicações importantes no uso eficiente dos recursos hídricos na agricultura de regiões com escassez de água.

Existem muitas opções para aumentar a produtividade da água. No entanto, as mais adequadas podem variar de país para país, de uma região para outra, e dependerá também das condições sociais e econômicas dos agricultores ou das partes interessadas. Uma gama de opções técnicas está disponível para aumentar a PA para uma particular situação ou condição hidro-ecológica. Os principais caminhos para a melhoria de PA são aumentar a produção por unidade de água, pela redução das perdas de água por

usos não benéficos (aumentando a eficiência de irrigação, que relaciona os aspectos de engenharia e de manejo agrônomico), reduzir a degradação da água (aspectos ambientais) e realocar água para usos mais prioritários (aspectos sociais). Combinando medidas biológicas de economia de água (tolerância à seca por melhoramento genético e regulação fisiológica) com soluções de engenharia e de manejo do solo e dos cultivos pode resolver grande parte do problema.

Fatores humanos (hábitos, preferências, tradições, grau de aversão ao risco, nível educacional) são elementos importantes que influenciam o uso da água na agricultura. Agricultores de melhor formação tecnológica podem contribuir com uso eficiente da água e superar as expectativas de desempenho dos sistemas de irrigação. Ao contrário, mesmo os sistemas de elevado nível tecnológico podem não corresponder às expectativas quando os agricultores não assimilam os fundamentos de operação dos sistemas e manejo da irrigação. Educação para a agricultura irrigada deve ser objeto de interesse da política pública.

É importante que ocorram mudanças de paradigmas no manejo da irrigação, em decorrência das pressões econômicas sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais da irrigação. Para que essas mudanças aconteçam devem-se motivar pesquisas e desenvolvimento tecnológico para a agricultura irrigada, enfocando-se, além da eficiência técnica, a eficiência econômica; o argumento é que a mudança é fundamental, desejável e inevitável e será um avanço significativo nas práticas atuais, já é necessário economizar água; entretanto uma produção eficiente e rentável deve constituir o principal objetivo econômico de uma empresa agrícola. Informações científicas inovadoras são necessárias porque os acréscimos tão necessários em PA parecem ser mais limitados pelos aspectos econômicos do que pelas opções tecnológicas disponíveis.

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. Fatores econômicos, como custos de produção, preços do produto, custos de oportunidade da água, deverão ser explicitamente incorporados nas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABO-GHOBAR, H.M. Losses from low-pressure center-pivot irrigation systems in a desert climate as affect by nozzle height. **Agricultural Water Management**, v.21, n.1/2, p.23-32, 1992.
- ALI, M.H.; TALUKDER, M.S.U. Increasing water productivity in crop production – A synthesis. **Agricultural Water Management**, v.95, p.1201 – 1213, 2008.
- ALI, M.H., HASSANUZZAMAN, M., BHUIYA, S.H., KHANAM, F. Evaluation of agro-climatic condition for rice cultivation in different regions of Bangladesh. **Bangladesh Journal of Environmental Science**, v.11, n.1, p.16–21, 2005.

- 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**, v.36, n.2, p.301-305, 2001.
- BOS, M.G. Summary of ICID definitions of irrigation efficiency. *ICID Bulletin* v.34, p.28-31, 1985.
- BRALTS, V.F.; WU, I.P.; GITLIN, H.M. Manufacturing variation and drip irrigation uniformity. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.24, p.113-119, 1981.
- BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A.; EISENHAUER, D.E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.123, n.6, p.423- 442, 1997.
- BURTON, M.A.; KIVUMBI, D.; EL-ASKARI, K. Opportunities and constraints to improving irrigation water management: Foci for research. **Agricultural Water Management**, v.40, n.1, p.37-44, 1999.
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkler**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. (Bulletin, 670).
- COELHO, R.D. **Regulagem de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas**. 1990. 1419. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- COOPER, P.J.M., GREGORY, P.J. Soil water management in the rainfed farming systems of the Mediterranean region. **Soil Use Management**, v.3, p.57–62, 1987.
- CUENCA, R.H. **Irrigation systems design: an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 551p.
- DUKE, H.R.; HEERMANN, D.F.; DAWSON, L.J. Appropriate depths of application for scheduling center pivot irrigations. **Transactions of the ASAE**, v.35, n.5, p.1457-1464, 1992.
- EHDAIE, B., WAINES, J.G. Variation in water-use efficiency and its components in wheat. I. Well-watered pot experiment. **Crop Science**, v.33, 294–299, 1993.
- 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.
- FURUKAWA, C. **Avaliação da irrigação por pivô central na região de Rio Verde – GO. Viçosa -MG, 1991.**, 69p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.
- GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dray areas. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1275 – 1284, 2009.
- GOMIDE, R. L. **Determinação e análise da uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão**. Viçosa-MG, 1978. 87p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

- GREGORY, P.J. Concepts of water-use efficiency. In: HARRIS, H.C., COOPER, P.J.M., PALA, M. (Ed.), **Soil and Crop Management for Improved Water-use Efficiency in Rainfed Areas**. ICARDA, Aleppo, 1991, p. 9–20.
- HANSON, B.R.; WALLENDER, W.W. Bidirectional uniformity of water applied by continuous-move sprinkler machines. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.4, p.1047-1053, 1986.
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, v.42, n.7, p.354-255, 1961.
- HART, W.E., PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, 105, n.3, p.275-288, 1979.
- HEERMANN, D.F.; HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, v11, n1, p.11-15, 1968.
- HEERMANN, D.F.; WALLENDER, W.W.; BOS, M.G. Irrigation efficiency and uniformity. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Ed.). **Management of Farm Irrigation Systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992, p.125 - 149.
- HEINEMANN, A.B; FRIZZONE, J.A. Custo da melhoria da uniformidade de distribuição de água por um pivô central vs. economia de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., Viçosa, 1995. Anais. Viçosa: SBEA, 1995. p.189.
- HOWELL, T.A; CUENCA, R.H; SOLOMON, K.H. Crop yield response. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Ed.). **Management of Farm Irrigation Systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992, p.93 - 122.
- ISRAELSEN, O.W. **Irrigation principles and practices**, New York: Wiley, 1950, 471p.
- JALOTA, S.K., SOOD, A., CHAHAL, G.B.S., CHOUDHURY, B.U. Crop water productivity of cotton–wheat system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. **Agricultural Water Management**, v.84, n.137–146, 2006.
- JAMES, L.G.; BLAIR, S.K.; Performance of low pressure center-pivot systems. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.6, p.1753-1757, 1984.
- JENSEN, M.E. Beyond irrigation efficiency. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.25, n.4, p.233-245, 2007.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 651p.
- MANTOVANI, E.C.; VILLALOBOS, F.J.; ORGAZ, F.; FERERES, E. Modelling the effects of sprinkler uniformity on crop yield. **Agricultural Water Management**, v.27, n.3/4, 1995.
- MAREK, T.U.; UNDERSANDER, D.J.; EBELING, L.L. An aerial weighted uniformity coefficient for pivot irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, v.29, n.6, p.1665-1670, 1986.

- MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978, 271p.
- MIRANDA, F.R.; RAMOS, M.M.; DENÍCULI, W.; SOARES, A.A. Uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação do tipo linear de baixa pressão, em função da altura de instalação e do tipo de placa defletora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., Campinas, 1994. **Anais**. Campinas: SBEA, 1994. p.1-8.
- NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in irrigation: A Review. **Irrigation Science**, v.12, p.187-192, 1991.
- PASSIOURA, J. Increasing crop productivity when water is scarce-from breeding to field management. **Agricultural Water Management**, v.80, p.176–196, 2006.
- 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.
- PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R.G.; BURT, C.M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1517–1524, 2009.
- RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v.13, n.1, p.129-139, 1992.
- SCALOPPI, E.J. Sistemas de irrigação por superfície. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.12, n.139, p.12-26, 1986.
- SILVA, W.L.C. Considerações sobre o uso de “sprays” de baixa pressão em pivô central. **ITEM Irrigação e Tecnologia Moderna**, n.39, p.26-32, 1989.
- SOLOMON, K.H.; BURT, C.M. Irrigation Sagacity: a measure of prudent water use. **Irrigation Science**, v.18, n.3, p.135-140, 1999.
- TEIXEIRA, A.S. **Estudo do efeito de diferentes tipos de emissores na performance de um sistema de irrigação por aspersão pivô central**. 1992. 79p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1992.
- TEIXEIRA, M.B. **Efeitos de dosagens extremas de cloro e pH na vazão de gotejadores autocompensantes (irrigação localizada)**, 2006. 318p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- VAZIFEDOUST, M.; VAN DAM, J.C.; FEDDES, R.A.; FEIZI, M. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. **Agricultural Water Management**, v.95, p.89 - 102, 2008.
- VIETS, F.G. Fertilizers and the efficient use of water. **Advances in Agronomy**. 14: 223-264, 1962.
- YANG, J., ZHANG, J., HUANG, Z., ZHU, Q., WANG, L. Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. **Crop Science**, v.40, p.1645 – 1655, 2000

- YANG, J., ZHANG, J., WANG, Z., ZHU, Q., WANG, W., Remobilization of carbon reserves in response to water deficit during grain filling of rice. **Field Crop Research**, v.71, p. 47 – 55, 2001.
- YANG, J., ZHANG, J., LIU, L., WANG, Z., ZHU, Q. Carbon remobilization and grain filling in jaonica/ indica hybrid Rice subjected to post-anthesis water deficits. **Agronomy Journal**, v.94, p.102 – 109, 2002.
- ZHNG, H., OWEIS, T. Water–yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v.38, p.195–211, 1999.
- WALLACE, J.S.; BATCHELOR, C.H. Managing water resources for crop production. **Phil. Trans. Roy. Soc.**, v.352, p.937-947, 1997.
- WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v.27, n.11, p.565-583, 1947.
- WANG, Z.; ZERIHUM, D., FEYEN. General irrigation efficiency for field water management. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.30, n.2, p.123-132, 1996.
- WU, I-P. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v.32, n.3, p.275-284, 1997.

Estimativa da Perda de Solo na Irrigação por Sulcos

Araújo, D.F.¹; Costa, R.N.T.¹; Mateos, L.² & Araújo, J.C.¹

¹ Universidade Federal do Ceará

² Instituto de Agricultura Sostenible (IAS/CSIC) - Espanha

- 1 Introdução
 - 2 Irrigação por superfície e a erosão na irrigação por sulcos
 - 3 Caracterização do estudo
 - 3.1 Unidade textural franco arenosa (área B-T2): caracterização, período e condução do experimento
 - 3.2 Unidade textural franco argilo siltosa (área C-S2): caracterização, período e condução do experimento
 - 3.3 Variáveis analisadas
 - 3.3.1 Medidas de desempenho do sistema
 - 3.3.2 Concentração de sedimentos na água de irrigação
 - 3.3.3 Perdas de solo
 - 4 Conclusões
- Referências bibliográficas

Irrigação da Conservação de Água e Solo
à Sustentabilidade com Vistas à Autogestão
ISBN 978-85-67668-05-5

INOVAGRI
INSTITUTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO NA AGRICULTURA IRRIGADA

Fortaleza - CE
2014

3

Estimativa da Perda de Solo na Irrigação por Sulcos

1 INTRODUÇÃO

O sucesso de uma exploração agropecuária equilibrada depende, em parte, da investigação e controle dos aspectos referentes aos agentes causadores da erosão, tais como as chuvas, a irrigação e os atributos do solo dos quais decorre a sua tendência, de vir pela ação do homem, favorecer ou dificultar o processo erosivo, já que as atividades humanas constituem os principais agentes catalisadores desses processos (PANACHUKY *et al.*, 2006).

A erosão hídrica é um processo de degradação do solo que pode ser causado tanto por fatores naturais quanto por interferência antrópica que, na maioria das vezes, resulta num processo de erosão acelerada. Esse desgaste do solo deve ser melhor compreendido quando se objetiva a manutenção ou o aumento da produtividade agrícola e a conservação ambiental, favorecendo a sustentabilidade de agroecossistemas. Entre as causas antrópicas destacam-se as perdas de solo e, portanto, o arraste de nutrientes da camada superficial, comum em solos de Perímetros Irrigados que aplicam água por sistemas de irrigação por sulcos, como consequência da aplicação de vazões e declives acentuados, sobretudo quando as unidades texturais não são adequadas a este sistema de irrigação.

A erosão em parcelas irrigadas por sulcos é um fenômeno de especial importância agrícola e ambiental que, tradicionalmente, no Brasil em especial, não tem sido reconhecida nem tampouco estudada com detalhes. O fluxo de sedimentos, comum na operação de sistemas de irrigação por sulcos, representa um dos principais contaminantes das águas. Os efeitos diretos da erosão hídrica incidem sobre a redução da capacidade de retenção dos solos, altamente indesejável em áreas irrigadas por superfície, causando a redução da produtividade dos cultivos, entre outros (MAASS, 1998).

Práticas agrícolas tradicionais, utilizadoras de insumos modernos, de mecanização excessiva, de combustíveis fósseis, de fertilizantes e de agrotóxicos, usadas em muitas partes do mundo, têm trazido consequências negativas em termos de conservação do solo, conservação da água e do ambiente em geral. Assim, os métodos tradicionais

de agricultura resultam na perda gradual da fertilidade do solo, até que a terra se torne improdutiva.

A importância do controle da erosão não se limita a manter o potencial produtivo e da fertilidade do solo para as gerações futuras, mas também é um meio eficaz para garantir o emprego permanente de mão de obra no campo, evitando o êxodo rural. Um eficiente controle da erosão é muito vantajoso do ponto de vista ecológico e social, bem como altamente significativo em termos econômicos.

Assim, serão apresentadas informações relativas ao estado da arte da erosão na irrigação por sulcos, além da metodologia e dos resultados de um estudo para avaliar o efeito da erosão do solo em um sistema de irrigação por sulcos, com vistas ao manejo destes sistemas de irrigação, quantificando, através de medições em campo, a concentração de sedimentos na água de irrigação e a perda de solo provocada pela irrigação em função da vazão, da declividade e da textura de solo, como também, avaliando a relação da perda de solo com as seguintes medidas de desempenho do sistema.

2 IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE E A EROSÃO NA IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Tradicionalmente se associam ao fenômeno de erosão hídrica, terras cultivadas ou não, com elevadas declividades, sobre as quais se sucedem episódios de chuva de elevada intensidade. Entretanto, esse fenômeno não se restringe apenas a períodos de chuva, tendo também grande importância na irrigação. Ainda que haja riscos de erosão em solos irrigados por aspersão, em que qualquer variação da velocidade de infiltração ou pluviosidade possa gerar escoamento, este risco é mais importante na irrigação por superfície (TROUT; NEIBLING, 1993).

A irrigação por superfície é um dos métodos mais antigos e mais amplamente utilizados no mundo (MATEOS; OYONARTE, 2005; MAILAPALLI *et al.*, 2009). O método geralmente tem baixo investimento de capital e tem o potencial para o uso eficiente de recursos hídricos e energia, mantendo altos níveis da produção agrícola. No entanto, este método pode apresentar maior erosão e risco de poluição do que métodos por aspersão e sistemas de irrigação por gotejamento.

Na irrigação por superfície, sobretudo no sistema por sulcos, a água é aplicada em pequenos canais denominados sulcos, infiltrando-se ao longo do perímetro molhado e movimentando-se nas direções vertical e lateral. Esse sistema possui como principal característica a distribuição de água na área a ser irrigada através da superfície do solo, utilizando a energia da gravidade. Para isto é exigida uma condição superficial adequada do solo, de modo a proporcionar um escoamento contínuo sem causar erosão (BOTREL; MARQUES, 2000).

No aspecto hidráulico, consiste basicamente na aplicação de água na cabeceira dos sulcos que, por gravidade, é distribuída ao longo dos mesmos. Durante a circulação, a água se infiltra e se redistribui no solo. A diferença no tempo de oportunidade ao longo

do sulco faz com que a lâmina infiltrada não seja uniforme. Por isso, com frequência, são aplicadas vazões superiores a $3,0 \text{ L s}^{-1}$ (SANTOS, 2008), ou ainda as áreas são irrigadas durante longos períodos, o que implica em um notável risco de erosão.

A água é liberada da cabeceira para o final do sulco. À medida que a água avança no sulco, o fluxo na seção transversal é menor devido ao aumento da área de infiltração ao longo do sulco. A vazão poderá ser alta o suficiente para assegurar que a água chegue ao final do sulco e a duração da fase de reposição satisfaça ao requerimento de água da cultura. Dessa forma, a energia do fluxo de água na parte superior do sulco pode vir a acarretar remoção de partículas do solo e transportá-las para o final do sulco ou até mesmo para fora da parcela irrigada. À medida que a taxa do fluxo de água diminui ao longo do sulco, a redução na capacidade de transporte resulta na deposição de sedimentos (FERNÁNDEZ GÓMEZ *et al.*, 2004).

A falta de dados de perda de solo em campos irrigados em nosso país e de suas consequências faz com que se recorra a informações de outros países como EUA e Espanha. De acordo com (FERNÁNDEZ-GÓMEZ, 1997) estima-se que 20% das terras irrigadas por superfície nesses países têm um grau de degradação importante pela ação da água de irrigação, sendo valores normais de perda de solo entre 5 e $50 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A FAO (1967) admite perdas da ordem de $12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para solos profundos, permeáveis e bem drenados, 2 a $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para solos rasos ou impermeáveis e, para outros solos, admite perdas intermediárias àqueles limites. O movimento diferencial do solo das zonas altas até as mais baixas provoca uma diminuição na profundidade do horizonte superficial e conseqüentemente a diminuição da fertilidade, principalmente na cabeceira dos sulcos. Ocorre ainda uma acumulação de materiais finos nas zonas mais baixas das parcelas que podem dar lugar a encrostamentos ou outros problemas de manejo. Esta perda de fertilidade é de extrema relevância no nordeste brasileiro, considerando o porte dos agricultores irrigantes que têm carência de recursos financeiros para aquisição de insumos com vistas a minimizar temporariamente a degradação desses solos.

Apesar disso, é possível criar e manter um sistema de irrigação que controle a erosão. Carter *et al.* (1993b) citam, entre outras práticas, o bloqueio ou fechamento dos sulcos ao final da parcela, a diminuição da vazão para incrementar a infiltração e diminuir o escoamento superficial, a incorporação de resíduos nos leitos dos sulcos e o emprego de práticas de conservação em parcelas irrigadas por sulcos. Trout *et al.* (1990) acrescentam a necessidade de utilizar comprimentos de sulcos reduzidos, declividades suaves e sulcos pouco espaçados.

Segundo Polyakov e Nearing (2003), o entendimento do processo de erosão e o desenvolvimento de modelos confiáveis requerem o entendimento da desagregação, deposição e transporte de sedimentos que, por sua vez, são dependentes das características hidráulicas do fluxo e da sua capacidade de transporte de sedimentos.

A capacidade de transporte de sedimentos é conceitualmente um balanço entre a taxa de sedimento em deposição e aquela de sedimento desagregado no leito do sulco

(LEI *et al.*, 2001), ou ainda, refere-se à máxima concentração de sedimentos que um escoamento superficial pode transportar. As partículas mais finas e leves, como as argilas e os siltes, precisam de menos energia que as partículas de areia para serem carregadas. Escoamentos muito velozes e turbulentos possuem grande capacidade de carregamento de sedimentos, sendo pouco seletivos, ou seja, deslocam sedimentos finos e grossos. À medida que a velocidade do escoamento diminui, o transporte de sedimentos se torna mais seletivo; assim, os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos são dependentes da granulometria do material.

O desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever, com precisão, o transporte de sedimentos pelo escoamento superficial, é bastante difícil, e as equações que descrevem esses processos, em condições reais de campo, apresentam grande complexidade.

Entre esses modelos, encontra-se a equação proposta por Everaert (1991) apud Medeiros *et al* (2010) que calcula a capacidade de transporte para escoamento utilizando o conceito de potência corrente para o cálculo de potencial do escoamento de transportar material sólido.

Se $D_{50} \leq 150 \mu\text{m}$:

$$q_s = 1,50 \times 10^{-5} \Omega^{1,07} D_{50}^{0,47} W \quad (1)$$

Se $D_{50} > 150 \mu\text{m}$:

$$q_s = 3,97 \times 10^{-6} \Omega^{1,75} D_{50}^{-0,56} W \quad (2)$$

em que: Ω é a potência de corrente efetiva ($\text{g}^{1,5}\text{s}^{-4,5}\text{cm}^{-2/3}$); D_{50} é o diâmetro mediano das partículas (μm); estimado da distribuição granulométrica dos solos erodidos; W é a largura do componente do terreno (m). A potência de corrente efetiva é calculada pela expressão:

$$\Omega = \frac{(\rho g q s)^{1,5}}{d^{2/3}} \quad (3)$$

em que ρ é a densidade da água (g m^{-3}); g é a aceleração da gravidade (m s^{-2}); q é a vazão escoada superficialmente por unidade de largura ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$); s é a declividade do terreno (m m^{-1}) e d é a lâmina de água escoada (cm).

Existem dois métodos básicos para medição de erosão na irrigação por sulco (BJORNEBERG; STRELKOFF, 2001): através da medição total do volume acumulado de sedimentos ou da medição da concentração de sedimentos e vazão do sulco.

O primeiro método dá o volume total de sedimentos transportados durante uma irrigação, o qual pode ser convertido em massa. É geralmente impraticável a coleta de todos os sedimentos no escoamento superficial da água. Desta forma o recipiente

é projetado para coletar apenas partículas maiores que se assentam rapidamente ou aquelas que não passam por um filtro de saída no final do recipiente. A maior parte do trabalho necessário para este sistema envolve a instalação e limpeza dos contentores e medição do volume de sedimentos.

O segundo método envolve a medição da concentração dos sedimentos e a vazão do sulco com o tempo durante a irrigação. De posse destes dados obtém-se a taxa de transporte de sedimento em função do tempo, a qual pode ser integrada para dar a massa total do sedimento transportado. Este método é útil para a identificação de variações temporais de erosão durante uma irrigação ou para a medição da erosão em vários locais em um sulco.

Calhas são comumente usadas para medir a vazão do sulco. A calha também auxilia a captação de água da amostra para determinar a concentração de sedimentos, oferecendo uma base sólida para que o fluxo total possa ser coletado sem perturbar o solo do sulco. No entanto, as calhas podem alterar o fluxo de sedimentos se a água escoar acima da calha ou erodir o solo abaixo dela.

A concentração de sedimentos pode ser determinada diretamente através da filtragem e obtenção da massa de sedimentos de um volume de água conhecido (FERNÁNDEZ-GÓMEZ *et al.*, 2004). Entretanto, estimativas indiretas através da turbidez (turbidímetro) ganharam aceitação dentre os vários métodos de monitoramento, devido, principalmente, à dificuldade de se obter medidas diretas em alta resolução temporal (PINHEIRO *et al.*, 2013). Conforme Coiado (2001), a avaliação da turbidez do escoamento é um dos métodos indiretos para a determinação da vazão sólida em suspensão. O turbidímetro faz a determinação quantitativa da turbidez, supondo possível estabelecer uma correlação entre a intensidade luminosa registrada pela célula e a concentração do material em suspensão.

A perda de solo pode ser medida em diferentes locais dentro de uma área dependendo dos objetivos do estudo. Quando medida em vários locais dentro de um sulco, quantifica-se o solo que está em desprendimento e transporte. Esta informação é particularmente útil para avaliar modelos de simulação de erosão, especialmente se a declividade não é uniforme. A medição da perda de solo no final da parcela integra a variabilidade entre os sulcos e dá um valor para a área inteira. No entanto, vários sulcos precisam ser monitorados para explicar a variabilidade entre os sulcos, devido à possível compactação, à variabilidade do solo e à variabilidade das taxas de fluxo. (BJORNEBERG; STRELKOFF, 2001).

A área da seção transversal, o perímetro molhado e o raio hidráulico são parâmetros geométricos úteis para o cálculo dos parâmetros hidráulicos, tal como o fator de atrito (ou seja, n de Manning). No entanto, um método confiável e rápido é necessário para a medição da geometria do sulco com água corrente. Pelo menos dois métodos diferentes podem ser usados para calcular ou medir as dimensões do sulco.

Primeiro, a largura de topo e profundidade da água no sulco pode ser medido com uma régua durante a irrigação. Essas duas medidas são utilizadas para calcular

os parâmetros geométricos do sulco, assumindo uma forma (ou seja, retangular, trapezoidal, parabólico).

O segundo método utiliza um medidor de perfil (perfilômetro), que tem uma série de hastes ou estiletos com um espaçamento definido. Os estiletos são ajustados para marcar o fundo do sulco em intervalos fixos. Observando a posição da haste, o perfil do sulco é definido. A área da seção transversal de fluxo é calculada pela integração. Medindo o perfil do sulco tem-se o perímetro molhado. Os perfis coletados durante a irrigação dão a área da seção transversal do sulco e a profundidade do fluxo naquele momento. A medição antes e após a irrigação mostra as mudanças na forma do sulco que ocorreram durante a irrigação.

Nenhum método é exato. Medições do perfil são demoradas e é fácil soltar as hastes de forma descuidada, sendo assim necessária muita atenção na hora da coleta desses dados. Essa metodologia poderia ser melhorada usando uma técnica de eletrônica, pois poderiam ser automatizadas e eliminaria a subjetividade da medição manual (BJORNEBERG; STRELKOFF, 2001).

Algumas informações sobre o solo e química da água devem ser observadas. Partículas do solo tendem a dispersar quando a água de irrigação tem condutividade elétrica baixa (CE) e alta relação de adsorção de sódio (SAR). A erosão na irrigação por sulcos aumenta à medida que diminui a CE ou aumenta a SAR na água de irrigação (LENTZ *et al.*, 1996). Propriedades químicas do solo também afetam a formação de selo superficial e a erosão do solo (LE BISSONNAIS; SINGER, 1993).

A concentração de determinado nutriente no escoamento superficial varia principalmente com sua concentração no solo, que é influenciada pelo tipo de solo, pelas adubações e pelo tipo de manejo empregado. A quantidade total do nutriente transportado pela erosão hídrica, no entanto, depende da sua concentração no material erodido e do volume total desse material perdido pela erosão (Bertol *et al.*, 2003). Estudos realizados por Macedo *et al.* (2001) apud Santos *et al.* (2010) relatam que podem ocorrer perdas de sedimentos em suspensão na água e de nutrientes, chegando a atingir valores equivalentes a 32 kg ha⁻¹ de N, 5 kg ha⁻¹ de P e até 48 kg ha⁻¹ de K.

3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

A pesquisa foi conduzida no Perímetro Irrigado Curu Pentecoste. Este perímetro foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – Dnocs e teve sua implantação iniciada no ano de 1974, com conclusão em 1979. Abrange as áreas dos municípios de Pentecoste e de São Luís do Curu, ambos no Estado do Ceará.

Apresenta solos do tipo neossolos flúvicos de textura entre média e pesada, porém, com predominância de luvisolos. Os agricultores irrigantes são em número de 173, cada um ocupando uma área média de 4,13 ha assentados em setores hidráulicos chamados de Núcleos.

O sistema de irrigação parcelar é efetuado por gravidade através de sulcos em quase 100% da área do perímetro (DNOCS, 2013). Capta-se a água de canais de terra, sendo estes, na maioria de derivação secundária, cuja adução é feita através de sifões com dimensões variáveis, de uma a duas polegadas de diâmetro e extensão de dois metros.

Inserida nesta região, encontra-se a Fazenda Experimental Vale do Curu – FEVC, local onde foi realizado o estudo em questão. A FEVC localiza-se a 110 km de Fortaleza, entre os paralelos 3° 45' e 4° 00' de latitude Sul e os meridianos 39° 15' e 39° 30'. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo BSw'h', caracterizando-se como semiárido. A precipitação média, de acordo com série histórica do banco de dados da Funceme, é de 770 mm, com 95% das chuvas distribuídas no primeiro semestre. Possui temperatura anual máxima de 33,4 °C, mínima de 22,4 °C, umidade relativa média do ar de 80 % e demanda evaporativa média de 234 mm mês⁻¹.

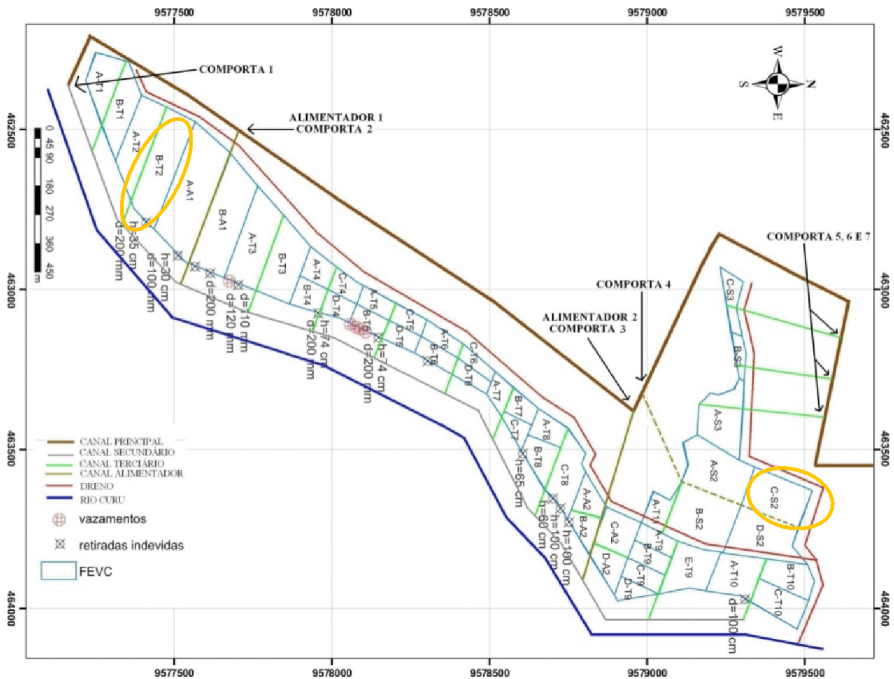
A água que abastece o Perímetro Irrigado e a FEVC é proveniente de dois canais principais - P₁ e P₂ - com vazões máximas de 1,8 m³ s⁻¹ e 0,8 m³ s⁻¹, respectivamente (DNOCS/IICA, 1990). O Açude General Sampaio beneficia as áreas aluviais a partir da barragem de derivação da Serrota através do leito do Rio Curu. A barragem da Serrota (Sebastião de Abreu) também é alimentada pelo Açude Tejussuoca.

A FEVC possui mais de 30 áreas sistematizadas para cultivos anuais, de frutíferas e pastagens, irrigadas por sulcos. O excesso de água das irrigações é levado até o dreno principal através de uma rede de drenos coletores presentes em toda a área. Dentre as áreas sistematizadas foram selecionadas duas unidades experimentais para a presente pesquisa, inseridas nas áreas BT₂ e CS₂, com textura de solo franco arenosa e franco argilo siltosa, respectivamente (FIGURA 1).

As duas unidades experimentais foram selecionadas de acordo com texturas de solo representativas dos Perímetros Irrigados por superfície no Nordeste brasileiro. Nas unidades estudadas, cada uma com 0,15 ha, utilizou-se sistema de irrigação parcelar por gravidade através de sulcos em declive e abertos ao final. A água para irrigação foi aduzida através de sifões de canais secundários revestidos, cuja capacidade máxima de vazão é de 0,12 m³ s⁻¹.

O preparo do solo constou de roço, aração, gradagem e sulcamento no espaçamento de 0,8 m entre sulcos. Foi realizado ainda um levantamento do perfil longitudinal do terreno através de nivelamento geométrico, junto a estacas espaçadas de 10,0 m para verificar a declividade média do terreno.

Em cada unidade experimental nove sulcos foram analisados, conforme Figura 2. Estes, denominados sulcos-teste, corresponderam a três tratamentos de vazão com três repetições para cada vazão. As vazões foram diferenciadas em função dos diâmetros dos sifões considerando que os mesmos operavam retirando água de um canal com a mesma carga hidráulica. No sentido de delimitar os tratamentos relacionados às vazões aplicadas foi realizado um levantamento de informações de campo constando de cargas hidráulicas de operação dos sifões e respectivos diâmetros representativos



Fonte: Autora (2010)

Figura 1 Plano sistematizado da Fazenda Experimental Vale do Curu

da operação de sistemas de irrigação por sulcos. Ao final deste levantamento decidiu-se por utilizar para os três tratamentos de vazão, siifões de 1", 1 ½" e 2" de diâmetro.

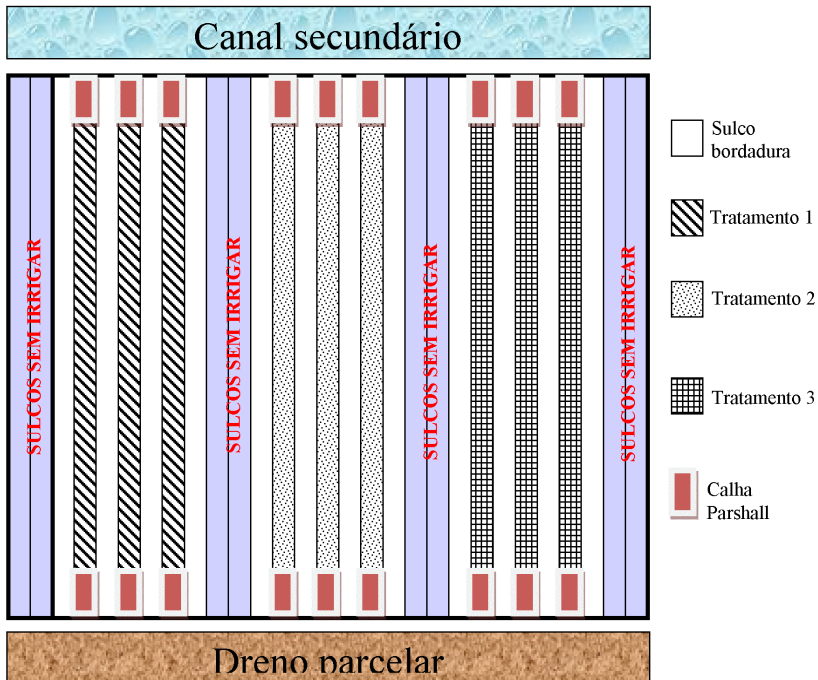
Entre os sulcos-teste foram utilizados sulcos-bordadura, irrigados com a mesma vazão do respectivo tratamento, existindo ainda dois sulcos sem irrigar delimitando os tratamentos de vazão. Na cabeceira e ao final dos sulcos-teste foram instaladas calhas Parshall com o propósito de medir a vazão de entrada e a vazão de saída (FIGURA 2).

Tomando como base a estratégia de manejo de irrigação utilizada pelos agricultores irrigantes do Perímetro Irrigado Curu Pentecoste, o corte das irrigações era realizado 40 min após a fase de avanço ser concluída, tempo este padronizado para os três tratamentos de vazão. Para simplificar, considerando que os tempos de depleção e de recessão foram desprezíveis, face não acarretarem inconvenientes nos cálculos das lâminas infiltradas ao longo do sulco, ao final do processo de irrigação, tomou-se como base para o cálculo do tempo de irrigação a equação 4:

$$T_i = T_a + T_{rep} \quad (4)$$

sendo:

T_i - tempo de irrigação (min)



Fonte: Autora (2010)

Figura 2 Disposição dos sulcos nas duas unidades experimentais

T_a - tempo que leva a água para alcançar o final do sulco (min)

T_{rep} - intervalo de tempo entre o início do escoamento no final da parcela e o instante em que é cessada a derivação de água à mesma (min)

Na análise comparativa dos tratamentos de vazão, uniformizou-se uma lâmina média aplicada com valor em torno de 120 mm.

3.1 Unidade textural franco arenosa (área B- T_2): caracterização, período e condução do experimento

O experimento foi conduzido no período de julho a outubro de 2010, cujos atributos físicos e químicos são apresentados na Tabela 1. É importante ressaltar a não ocorrência de precipitação pluviométrica durante o período da coleta de dados. A área foi estudada durante cinco eventos de irrigação com intervalos de sete dias entre as irrigações e após o nivelamento geométrico foi verificado que a declividade média dos sulcos era de 0,5%.

Após o preparo do solo, a área foi estabelecida com a cultura do Algodão (*Gossypium hirsutum L.*), sendo a semeadura realizada em 12.08.2010. As adubações de fundação e de cobertura seguiram as recomendações da Embrapa (2007).

Tabela 1 Atributos físicos e químicos do solo da área franco arenosa

| Prof. (cm) | Composição granulométrica (g kg ⁻¹) | | | | | Classe textural | Densidade do solo (kg m ⁻³) | pH | CE (dS m ⁻¹) | |
|---|---|-----------------|----------------|-----------------------------------|------------------|-----------------|---|-----|---------------------------|--------------------------|
| | Areia grossa | Areia fina | Silte | Argila | Argila natural | | | | | |
| 0-30 | 113 | 608 | 192 | 87 | 47 | Franco arenosa | 1360 | 6,7 | 0,49 | |
| Complexo Sortivo (cmol _c ⁻¹) | | | | | | | | | | |
| Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | H ⁺ + Al ³⁺ | Al ³⁺ | S | T | PST | MO (mg kg ⁻¹) | P _{assimilável} |
| 3,00 | 3,70 | 0,09 | 0,25 | 0,99 | 0,10 | 8 | 9 | 1 | 19,86 | 10,40 |

Fonte: Laboratório de Solo/Água UFC (2009)

Tabela 2 Valores de evapotranspiração de referência (ET_o) e valores de coeficiente de cultivo do Algodão (K_c)

| Meses | ET _o (mm dia ⁻¹) | K _c Algodão |
|----------|---|------------------------|
| Setembro | 7,83 | 0,6 |
| Outubro | 7,97 | 1,1 |

Fonte: Castro (2005)

Para o cálculo das lâminas de água requeridas utilizaram-se dados de evapotranspiração de referência (ET_o) e valores de coeficiente da cultura do Algodão (K_c) para o período do experimento (TABELA 2).

3.2 Unidade textural franco argilo siltosa (área C-S₂): caracterização, período e condução do experimento

O experimento na unidade CS₂ foi conduzido no período de julho a outubro de 2012. A exemplo do ocorrido na área de textura franco arenosa, não houve precipitação pluviométrica durante o período da coleta de dados. Após duas tentativas, sem sucesso, de estabelecer a cultura do algodão na referida área, procedeu-se a semeadura do milho, no entanto as sementes de ambas as culturas não germinaram. Assim, decidiu-se realizar o estudo nesta área sem cultivo algum, porém aplicando a mesma lâmina de água da área estabelecida com a cultura do algodão.

Após o preparo do solo, deu-se início a coleta dos dados. As variáveis que compunha esta unidade foram obtidas durante quatro eventos de irrigação, em razão do racionamento na liberação de água por parte do Distrito de Irrigação. Os sulcos nesta unidade apresentaram declividade média de 0,3%.

Os atributos físicos e químicos desta unidade experimental são apresentados na Tabela 3.

3.3 Variáveis analisadas

3.3.1 Medidas de desempenho do sistema

No cálculo das medidas de desempenho das irrigações realizadas utilizou-se de critérios adotados por Walker e Skogerboe (1987), sendo avaliadas em cada irrigação

Tabela 3 Atributos físicos químicos do solo da área do experimento

| Prof. (cm) | Composição granulométrica (g kg ⁻¹) | | | | | Classe textural | Densidade do solo (kg m ⁻³) | pH | CE (dS m ⁻¹) | |
|---|---|-----------------|----------------|----------------------------------|------------------|-----------------------|---|-----|---------------------------|--------------------------|
| | Areia grossa | Areia fina | Silte | Argila | Argila natural | | | | | |
| 0-30 | 17 | 124 | 557 | 302 | 242 | Franco argilo siltosa | 1340 | 7,7 | 1,77 | |
| Complexo Sortivo (cmol _c ⁻¹) | | | | | | | | | | |
| Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | H ⁺ +Al ³⁺ | Al ³⁺ | S | T | PST | MO (mg kg ⁻¹) | P _{assimilável} |
| 14,60 | 7,20 | 3,37 | 0,36 | 0,66 | 0,05 | 25,50 | 26,22 | 13 | 26,58 | 26 |

Fonte: Laboratório de Solo/Água UFC (2009)

as seguintes variáveis: eficiência de aplicação (Ea); índice de runoff (Iro); índice de percolação (Ip); eficiência de armazenamento (Es) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Na Tabela 4 são apresentados os dados de vazão de entrada (Q₀) e de saída (Q_s) de água no sulco após a estabilização do fluxo e respectivos volumes de água aplicados e escoados ao final dos sulcos para as duas unidades experimentais estudadas.

As variações nas vazões para um mesmo diâmetro de sifão ocorreram em razão de variações na carga hidráulica do canal decorrentes de operações do sistema a montante das áreas do experimento.

Tabela 4 Vazões de entrada e de saída e respectivos volumes aplicados e escoados ao final dos sulcos nas unidades experimentais avaliadas

| Vazão | Irrigação | Unidade textural franco arenosa | | | | Unidade textural franco argilo siltosa | | | |
|----------------|-----------|---------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|--|----------------|----------------|----------------|
| | | Q ₀ * | Q _s * | V ₀ ** | V _s ** | Q ₀ | Q _s | V ₀ | V _s |
| Q ₁ | I | 0,046 | 0,029 | 5,71 | 2,26 | 0,039 | 0,031 | 5,70 | 3,38 |
| | II | 0,044 | 0,025 | 5,76 | 2,22 | 0,041 | 0,032 | 5,77 | 3,02 |
| | III | 0,044 | 0,028 | 5,76 | 2,39 | 0,041 | 0,028 | 5,86 | 2,55 |
| | IV | 0,044 | 0,024 | 5,76 | 2,19 | 0,037 | 0,030 | 5,77 | 3,26 |
| | V | 0,040 | 0,024 | 5,73 | 2,35 | - | - | - | - |
| Q ₂ | I | 0,115 | 0,084 | 5,68 | 3,21 | 0,099 | 0,088 | 5,74 | 3,42 |
| | II | 0,113 | 0,085 | 5,62 | 2,95 | 0,098 | 0,092 | 5,77 | 4,01 |
| | III | 0,105 | 0,087 | 5,64 | 3,54 | 0,093 | 0,080 | 5,76 | 3,66 |
| | IV | 0,112 | 0,093 | 5,68 | 3,53 | 0,099 | 0,086 | 5,77 | 3,47 |
| | V | 0,107 | 0,085 | 5,72 | 3,43 | - | - | - | - |
| Q ₃ | I | 0,160 | 0,134 | 5,65 | 3,56 | 0,181 | 0,124 | 5,73 | 2,80 |
| | II | 0,143 | 0,121 | 5,71 | 3,05 | 0,174 | 0,118 | 5,76 | 2,74 |
| | III | 0,160 | 0,126 | 5,57 | 3,14 | 0,169 | 0,117 | 5,75 | 2,84 |
| | IV | 0,166 | 0,139 | 5,64 | 3,28 | 0,182 | 0,128 | 5,76 | 2,81 |
| | V | 0,151 | 0,126 | 5,82 | 3,30 | - | - | - | - |

* Q₀ - Vazão de entrada (m³ min⁻¹); Q_s - Vazão de saída (m³ min⁻¹)

** V₀ - Volume de entrada (m³); V_s - Volume de saída (m³)

A seguir são apresentados os valores dos índices de desempenho das irrigações durante o período do experimento (Tabela 5 e 6).

Foi verificado que, para todos os tratamentos, em todas as irrigações, os valores do coeficiente de uniformidade apresentaram o mesmo comportamento, cujos valores foram superiores a 90%. O CUC avalia a variabilidade da lâmina de água infiltrada, ou seja, descreve quão uniformemente a água está disponível para as plantas no campo irrigado (FRIZZONE, 1993).

Os elevados valores podem ser justificados pelo comprimento relativamente pequeno das parcelas irrigadas e também por não se contabilizar as fases de depleção e recessão. Em contrapartida, os valores de eficiência de aplicação (Ea) variaram entre 27% e 50% nas duas áreas estudadas. A eficiência de aplicação tem sido preconizada

Tabela 5 Resultados da avaliação das irrigações I, II, III, IV e V na unidade textural franco arenosa: uniformidade e eficiência

| Irrigação | I | | | II | | | III | | |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q1 | Q2 | Q3 | Q1 | Q2 | Q3 |
| Tratamento | 0,8 | 1,9 | 2,7 | 0,7 | 1,9 | 2,4 | 0,7 | 1,8 | 2,7 |
| | (L s ⁻¹) | | | | | | | | |
| Ti (min) | 126 | 50 | 36 | 135 | 51 | 41 | 135 | 55 | 36 |
| Va (m ³) | 5,76 | 5,79 | 5,75 | 5,79 | 5,72 | 5,78 | 5,79 | 5,72 | 5,71 |
| Vi (m ³) | 3,50 | 3,00 | 3,44 | 4,04 | 2,78 | 2,90 | 3,67 | 2,82 | 2,88 |
| Ve (m ³) | 2,26 | 2,79 | 2,30 | 1,75 | 2,93 | 2,88 | 2,12 | 2,90 | 2,83 |
| Vp (m ³) | 1,93 | 1,42 | 1,87 | 2,46 | 1,20 | 1,32 | 2,09 | 1,24 | 1,30 |
| CUC (%) | 92,11 | 93,04 | 92,25 | 92,12 | 93,74 | 94,92 | 93,22 | 94,28 | 92,59 |
| Ea (%) | 27,4 | 27,3 | 27,5 | 27,3 | 27,6 | 27,3 | 27,3 | 27,6 | 27,6 |
| Ir (%) | 39,2 | 48,2 | 40,1 | 30,3 | 51,3 | 49,9 | 36,6 | 50,7 | 49,6 |
| Ipp (%) | 33,4 | 24,5 | 32,5 | 42,5 | 21,1 | 22,8 | 36,2 | 21,7 | 22,8 |
| Es(%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Irrigação | IV | | | V | | | | | |
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q1 | Q2 | Q3 | | | |
| Tratamento | 0,7 | 1,9 | 2,7 | 0,7 | 1,8 | 2,5 | | | |
| | (L s ⁻¹) | | | | | | | | |
| Ti (min) | 135 | 52 | 35 | 147 | 54 | 37 | | | |
| Va (m ³) | 5,79 | 5,75 | 5,76 | 5,78 | 5,72 | 5,82 | | | |
| Vi (m ³) | 4,19 | 3,02 | 2,75 | 2,73 | 1,94 | 1,65 | | | |
| Ve (m ³) | 1,60 | 2,73 | 3,01 | 3,05 | 3,79 | 2,71 | | | |
| Vp (m ³) | 2,61 | 1,44 | 1,17 | 0,00 | 0,00 | 0,18 | | | |
| CUC (%) | 91,78 | 94,17 | 94,29 | 93,76 | 93,61 | 90,99 | | | |
| Ea (%) | 27,3 | 27,4 | 27,4 | 47,2 | 33,9 | 50,3 | | | |
| Ir (%) | 27,7 | 47,4 | 52,5 | 52,8 | 66,1 | 46,6 | | | |
| Ipp (%) | 45,1 | 25,1 | 20,4 | 0 | 0 | 3,1 | | | |
| Es(%) | 100 | 100 | 100 | 92,67 | 65,85 | 99,39 | | | |

Ti – Tempo total de irrigação; Va – volume aplicado; Vi – Volume infiltrado; Ve – volume escoado; Vp – volume percolado; CUC – coeficiente de uniformidade de Christiansen; Ea – Eficiência de aplicação; Ir – índice de runoff; Ipp – índice de percolação profunda, Es- eficiência de armazenamento

Tabela 6 Resultados da avaliação das irrigações I, II, III e IV na unidade textural franco argilo siltosa: uniformidade e eficiência

| Irrigação | I | | | II | | | III | | | IV | | |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Q1 | Q2 | Q3 | Q1 | Q2 | Q3 | Q1 | Q2 | Q3 | Q1 | Q2 | Q3 |
| Tratamento | 0,7 | 1,7 | 3,0 | 0,7 | 1,6 | 2,9 | 0,7 | 1,6 | 2,8 | 0,6 | 1,7 | 3,0 |
| | (L s ⁻¹) | | | | | | | | | | | |
| Ti (min) | 149 | 58 | 32 | 141 | 59 | 33 | 144 | 62 | 34 | 155 | 59 | 32 |
| Va (m ³) | 5,79 | 5,74 | 5,75 | 5,77 | 5,76 | 5,73 | 5,89 | 5,76 | 5,73 | 5,77 | 5,77 | 5,76 |
| Vi (m ³) | 3,50 | 3,00 | 3,44 | 4,04 | 2,78 | 2,89 | 3,67 | 2,82 | 2,88 | 4,19 | 3,02 | 2,75 |
| Ve (m ³) | 2,29 | 2,74 | 2,31 | 1,73 | 2,98 | 2,83 | 2,21 | 2,94 | 2,85 | 1,58 | 2,75 | 3,01 |
| Vp (m ³) | 1,93 | 1,42 | 1,86 | 2,46 | 1,20 | 1,32 | 2,09 | 1,24 | 1,30 | 2,61 | 1,45 | 1,17 |
| CUC (%) | 95,57 | 96,12 | 92,73 | 95,19 | 97,90 | 93,75 | 92,09 | 95,12 | 92,17 | 95,15 | 94,46 | 91,21 |
| Ea (%) | 27,2 | 27,5 | 27,4 | 27,4 | 27,4 | 27,6 | 26,8 | 27,4 | 27,6 | 27,3 | 27,4 | 27,4 |
| Ir (%) | 39,5 | 47,7 | 40,1 | 30,0 | 51,7 | 49,4 | 37,6 | 51 | 49,7 | 27,4 | 47,6 | 52,2 |
| Ipp (%) | 33,2 | 24,8 | 32,4 | 42,7 | 20,9 | 23,0 | 35,6 | 21,3 | 22,7 | 45,3 | 25,0 | 20,4 |
| Es (%) | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Ti – Tempo total de irrigação; Va – volume aplicado; Vi – Volume infiltrado; Ve – volume escoado; Vp – volume percolado; CUC – coeficiente de uniformidade de Chrsitiansen; Ea – Eficiência de aplicação; Ir – índice de runoff; Ipp – índice de percolação profunda, Es- eficiência de armazenamento

como um índice que representa a estimativa da fração do total da água aplicada que permanece útil para as plantas. Esse índice alcançou valores máximos quando o índice de percolação profunda foi nulo ou bem baixo. Segundo Costa e Souza (2006), é comum ver sistemas de irrigação por superfície operando com eficiência de armazenamento de 100% e eficiência de aplicação entre 20% e 40%.

A eficiência de armazenamento (Es) é um índice utilizado para avaliar quanto da capacidade real de água disponível do solo foi satisfeita pela irrigação. O grau de adequação, muitas vezes avaliado pela eficiência de armazenagem, refere-se à porcentagem da área que recebe pelo menos a quantidade de água necessária para suprir a deficiência hídrica na zona radicular. Na área franco arenosa, para as irrigações I a IV foi de 100% para todos os tratamentos, já que não houve déficit nessas irrigações, ou seja, a lâmina aplicada atendeu à requerida. Já para a irrigação V a eficiência de armazenamento para os tratamentos Q₁, Q₂ e Q₃ foram de 92,7%; 65,85% e 99,39% respectivamente, uma vez que para nesses tratamentos o volume de água aplicado não foi suficiente para atender a demanda. Na unidade textural franco argilo siltosa, não houve irrigação com déficit, portanto, todos os tratamentos alcançaram valores de 100% na eficiência de armazenamento.

As Figuras 3 e 4 mostram graficamente o comportamento desses coeficientes.

O índice de percolação profunda (Ipp) quantifica o volume de água infiltrada não aproveitada pelas plantas. Das unidades estudadas, apenas na unidade franco arenosa, na quinta irrigação, não houve perda por percolação profunda para os tratamentos Q₁ e Q₂ (Figura 3a. e b.), o que elevou a eficiência de aplicação, uma vez que este índice juntamente com o índice de runoff (Ir) é complementar a eficiência de aplicação.

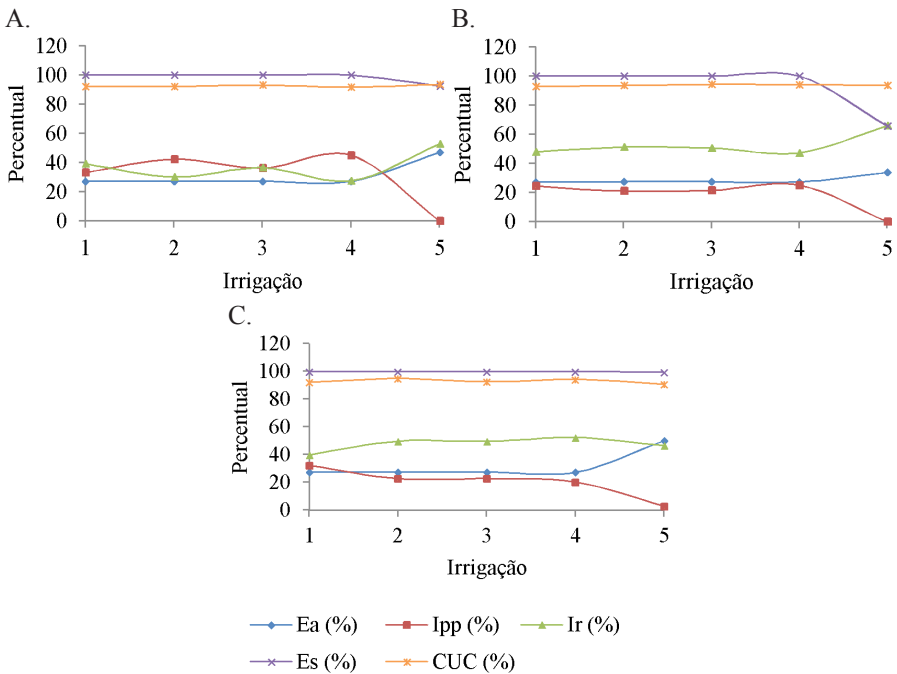


Figura 3 Comportamento dos índices de avaliação das irrigações na unidade textural franco arenosa: a. tratamento Q₁; tratamento Q₂; c. tratamento Q₃

O Ir (índice de *runoff*) representa a quantidade de água perdida por escoamento superficial. Percebe-se que estes índices são inferiores para as irrigações feitas com o tratamento Q₁ (Figuras 3a. e 4 a.) em detrimento das irrigações realizadas com os outros dois tratamentos (Figura 3 e 4 b-c.). Isso certamente deve-se ao fato de que o tratamento Q₁ aplicava a menor vazão, derivando assim um menor volume de água, consequentemente escoando um menor volume de água. Dentro deste raciocínio, era de se esperar que os valores de Ir fossem mais elevados em Q₃, no entanto, isso não foi verificado na maioria das irrigações devido ao curto tempo de irrigação utilizado para esta vazão.

Castro (1997) realizou análise da irrigação por sulcos em cultura de feijão-de-corda, na Fazenda Experimental do Perímetro Irrigado de Morada Nova, utilizando a metodologia do balanço de volume de Walker e Skogerboe (1987). Dentre outras conclusões, o estudo permitiu verificar que a eficiência de aplicação (Ea) teve seu valor aumentado durante a estação de cultivo. Na primeira irrigação o valor foi de 40,8% e na última irrigação de 74,5%. O índice de escoamento superficial passou de 3,4% na primeira irrigação para 25,2% na quarta irrigação. O índice de percolação teve seu valor reduzido ao longo da estação de cultivo, de 55,9% para apenas 0,38% de perdas por percolação. A eficiência de armazenamento sofreu pequenas alterações

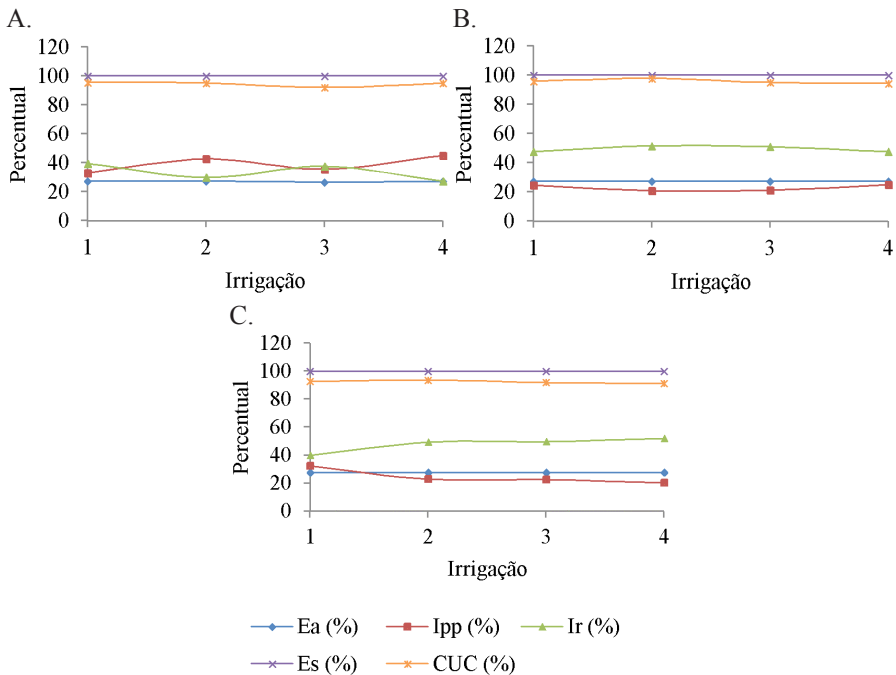


Figura 4 Comportamento dos índices de avaliação das irrigações na unidade textural franco argilo siltoza: a. tratamento Q₁; tratamento Q₂; c. tratamento Q₃

ao longo do ciclo; já o coeficiente de uniformidade de Christiansen passou de 87,5% na primeira irrigação para 92,4% na última, apresentando, assim, uma tendência de ascensão.

Entende-se que algumas vazões utilizadas neste experimento se mostraram altas para os requerimentos hidráulicos, no entanto, para os ensaios de erosão, pretendia-se estabelecer fluxos maiores com o objetivo de contar com dados apropriados para analisar os processos desse fenômeno. Além disso, as vazões utilizadas são comuns no Perímetro Irrigado.

3.3.2 Concentração de sedimentos na água de irrigação

A coleta de dados para obtenção da concentração de sedimentos na água de irrigação foi realizada em todos os sulcos-teste. Amostras de água e sedimentos transportados foram coletadas em garrafas de 500 mL nos tempos de 1, 3, 5, 10, 15, 25, 35, 40, 45 e 50 min após a água de irrigação chegar ao final da parcela, ou seja, no final dos sulcos. As amostras foram devidamente identificadas em relação ao tratamento de vazão, respectiva repetição, tempo de coleta e evento de irrigação. Concomitantemente às coletas de amostras de água e sedimentos obtiveram-se os dados de vazões nos respectivos tempos.

Na unidade textural franco arenosa, após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório, sendo realizado o procedimento de separação do sedimento contido na água de irrigação. Utilizaram-se funis com ranhuras para facilitar o processo de filtragem, utilizando-se papel de filtro nº 11. Os papéis de filtro foram colocados no funil de forma que, ao fazer passar a solução, ocorria a retenção do sedimento.

Os filtros foram levados à estufa a uma temperatura de 45 °C para fins de secagem, permanecendo por aproximadamente 12 horas, tempo médio necessário para que as amostras obtivessem massa constante. Em seguida suas massas foram medidas em balança digital com precisão de quatro casas decimais.

Na área de textura franco argilo siltosa, houve um ajuste na metodologia visando à obtenção de dados mais consistentes. Dessa forma, as amostras coletadas foram levadas ao laboratório de onde foram extraídas subamostras em beakers de 100 mL. Cada subamostra, contendo água e sedimento, foi levada à estufa à 105° para secagem e posterior obtenção da massa do sedimento utilizando balança digital. As subamostras permaneceram na estufa por tempo suficiente para obtenção de uma massa constante.

Os dados de cada área permitiram obter para cada ponto de amostragem, o comportamento gráfico e, portanto, a relação funcional da concentração de sedimentos (g L^{-1}) em função do tempo de coleta das amostras de água nas vazões analisadas.

A evolução da concentração de sedimentos para cada irrigação pode ser visualizada através das Figuras 5 e 6. Cada ponto representado na figura constitui o valor médio da concentração de sedimentos das três repetições de cada vazão (Q_1 , Q_2 e Q_3).

Independente da amplitude do valor verifica-se que para todos os tratamentos e em todas as irrigações, nas duas unidades estudadas, a concentração de sedimentos segue o mesmo padrão de comportamento: o valor tende a diminuir com tempo.

Um decréscimo na concentração de sedimentos com o tempo durante o evento erosivo tem sido observado por vários autores, entre eles destacam-se Brown *et al.* (1988), Proffitt e Rose (1991), Trout e Neibling (1993), Trout (1996), Fernández-Gómez (1997) e Fernández-Gómez *et al.* (2004). Este comportamento é em parte justificado por um arranque diferencial e incorporação das partículas ao fluxo de água, seguido por uma estabilização do leito do sulco e a formação de uma camada de solo menos susceptível à erosão, onde se expõem ao fluxo de água apenas partículas de solo suficientemente grandes para não serem arrancadas e transportadas por este.

Outros autores (TROUT, 1993 apud FERNÁNDEZ-GÓMEZ, 1997) tem atribuído a diminuição da concentração de sedimentos como uma mudança na susceptibilidade das partículas à erosão, ou seja, uma mudança na erodibilidade.

As curvas de concentração constante aparecem quando a energia do fluxo de água ou sua capacidade para transportar determinada quantidade de material são limitantes para o fenômeno erosivo como afirmam Trout e Neibling (1993) indicando que a capacidade do fluxo para transportar sedimentos tem um limite, que depende entre outros fatores da potência do fluxo aplicado. Um exemplo disso é que, nas duas áreas

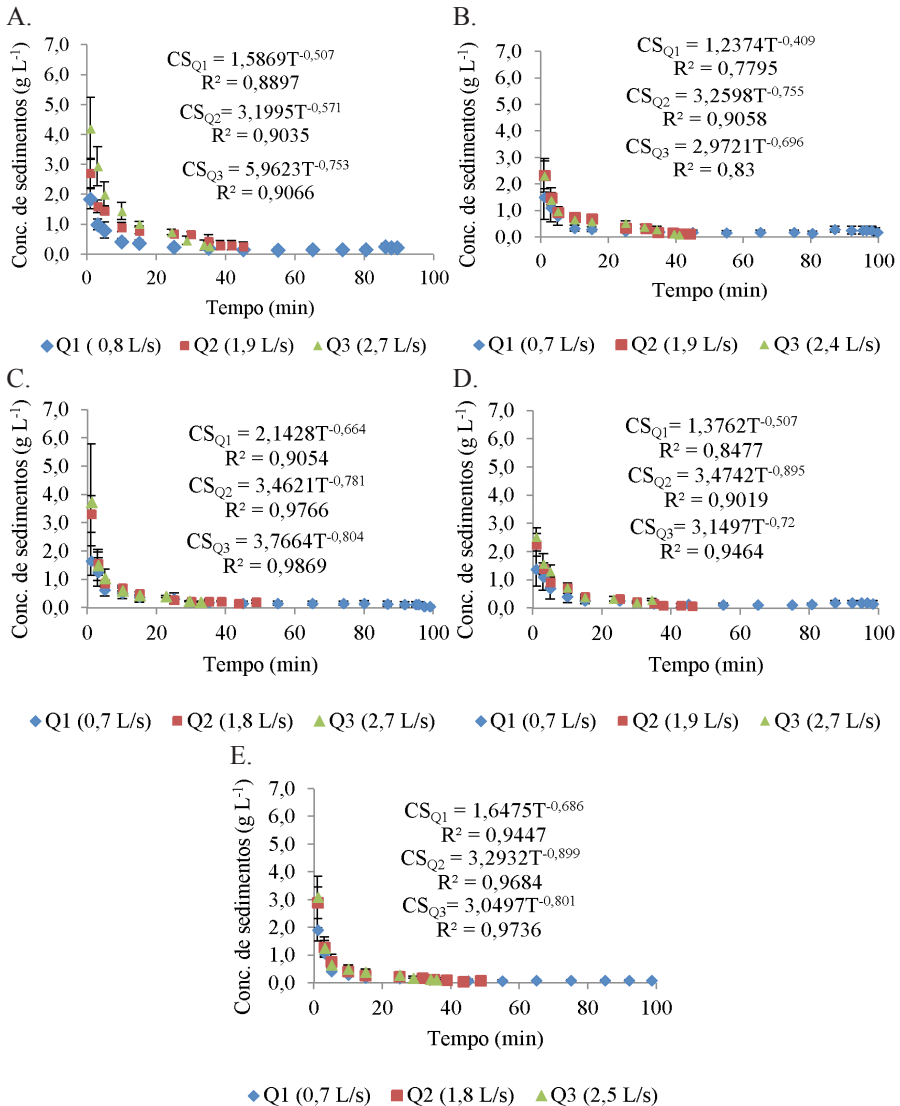


Figura 5 Concentração de sedimentos em função do tempo de coleta na unidade franco arenosa: a. irrigação I; b. irrigação II; c. irrigação III; d. irrigação IV; e. irrigação V

estudadas, analisando a amplitude dos valores de concentração de sedimentos, nota-se que há uma tendência de aumento desses valores com o aumento da vazão.

Os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos também dependem da granulometria do material presente na área. As partículas mais finas e leves, como as argilas e siltes, precisam de menos energia que as partículas de areia para serem

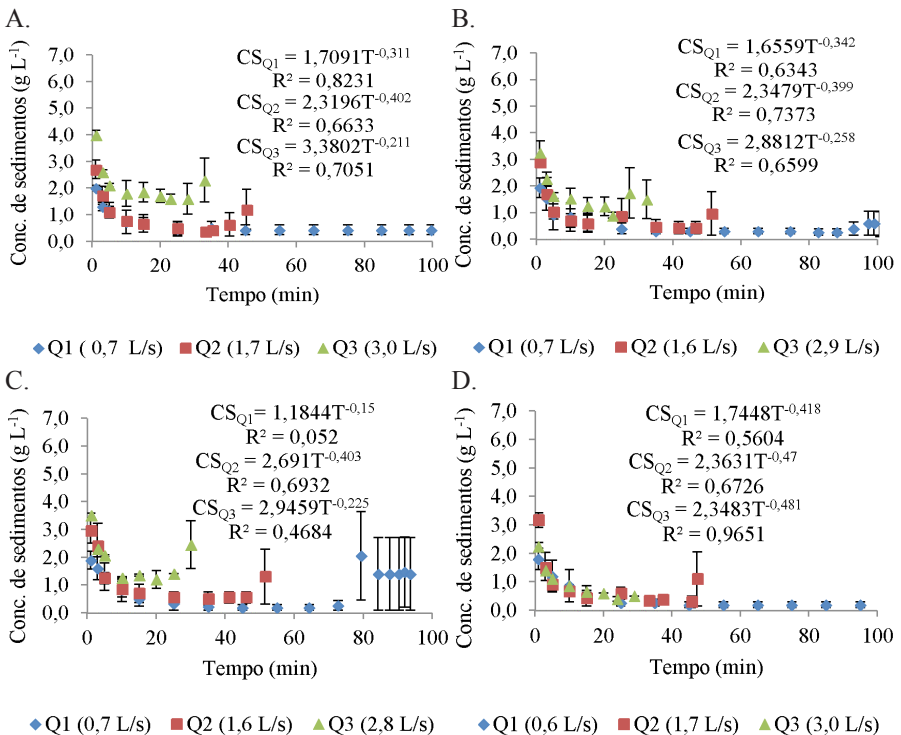


Figura 6 Concentração de sedimentos em função do tempo de coleta na unidade franco argilo siltosa: a. irrigação I; b. irrigação II; c. irrigação III; d. irrigação IV

carreadas. Escoamentos muito velozes e turbulentos possuem grande capacidade de carreamento de sedimentos, sendo pouco seletivos, ou seja, deslocam sedimentos finos e grossos. À medida que a velocidade do escoamento diminui, o transporte de sedimentos se torna mais seletivo, fazendo com que sejam transportados apenas os materiais mais leves. Esse fato pode ser comprovado quando comparamos os gráficos das Figuras 5 e 6. Os valores de concentração de sedimentos, principalmente quando se aproximam de valores constantes, foram maiores na unidade textural franco argilo siltosa que na área de textura franco arenosa.

3.3.3 Perdas de solo

A perda de solo gerada pelo fluxo de água no sulco e expressa em kg sulco^{-1} foi obtida pelo produto da concentração de sedimentos na água pela vazão em cada ponto de amostragem e por intervalo de tempo associado a cada coleta de amostra (FERNÁNDEZ-GÓMEZ, 1997).

O produto da concentração de sedimentos na água de irrigação pela vazão em cada tempo de amostragem permitiu a obtenção de um ajuste estatístico, o

qual integrado no tempo de coleta estimou a massa de solo carregada ao final do sulco.

A perda de solo total, expressa em $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, foi estimada através da soma da perda de solo por sulco, em cada irrigação, considerando um ciclo de irrigação de 16 semanas e a quantidade de sulcos em um hectare.

A uniformidade de distribuição de água infiltrada durante as irrigações constitui um dos índices mais utilizados para verificação da qualidade da irrigação. Considerando a prática de manejo da irrigação com vistas à melhoria no índice de uniformidade de distribuição de água, foram obtidas equações de melhor ajuste, relacionando a variável dependente perda de solo no final da parcela irrigada em função da uniformidade de distribuição de água infiltrada.

As perdas de solo (por sulco e total) geradas pelos tratamentos de vazão aplicados em cada irrigação, em cada unidade avaliada, estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8.

Verifica-se que, nas duas unidades estudadas, há uma tendência de redução da perda do solo no decorrer das irrigações para as três vazões aplicadas. Isso ocorre de forma análoga ao sucedido na concentração de sedimentos. Na verdade, este fenômeno já era esperado uma vez que a perda de solo foi obtida através da concentração de sedimentos da água de irrigação. Trout (1996) relata que após a terceira irrigação, a erosão é significativamente menor que nas anteriores, devido fundamentalmente à estabilização e consolidação do solo do leito (fundo) dos sulcos. A situação mais normal é que o avanço da frente de água no sulco seja mais lento na primeira irrigação que nas irrigações posteriores, mediante a maior aspereza do leito, a maior velocidade de infiltração, a pouca consolidação que possui o solo e a menor umidade.

Nota-se ainda um aumento na quantidade de solo transportado para fora da parcela irrigada com o aumento da vazão aplicada em todas as irrigações. Isso é verificado

Tabela 7 Perda de solo por irrigação e perda de solo total na unidade franco arenosa

| Vazão (L s ⁻¹) | Perda de solo (kg sulco ⁻¹) | | | | | Perda de solo total (t ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|-------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|---|
| | Irrigação | | | | | |
| | I | II | III | IV | V | |
| 0,7-0,8 | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,4 | 0,3 | 1,4 |
| 1,8-1,9 | 2,3 | 1,9 | 1,4 | 1,3 | 0,6 | 3,0 |
| 2,4-2,8 | 3,8 | 2,5 | 2,0 | 1,8 | 1,3 | 5,4 |

Tabela 8 Perda de solo por irrigação e perda de solo total na unidade franco argilo siltsosa

| Vazão (L s ⁻¹) | Perda de solo (kg sulco ⁻¹) | | | | Perda de solo total (t ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|-------------------------------|---|-----|-----|-----|---|
| | Irrigação | | | | |
| | I | II | III | IV | |
| 0,6 - 0,7 | 1,6 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 3,5 |
| 1,6 - 1,7 | 2,8 | 2,8 | 1,8 | 1,2 | 4,8 |
| 2,8 - 3,0 | 5,9 | 4,7 | 4,5 | 2,2 | 9,6 |

nas duas unidades estudadas e fundamenta-se na maior erosividade das vazões maiores, e conseqüentemente no maior escoamento. Deduz-se, portanto que há uma relação monotônica entre a vazão aplicada e perda de solo na escala da parcela que fica claramente representada no gráfico abaixo (Figura 7). Essa relação também foi observada por Fernández-Goméz (1997) analisando a erosão do solo em irrigações por sulco em solos de textura franca e franco argilosa.

Quando as perdas de solo das duas unidades são comparadas, é possível ainda verificar que, apesar da unidade franco argilo siltosa apresentar declividade média (0,3%) menor que a unidade textural franco arenosa (0,5%) e ter aplicado vazões bem aproximadas às da outra unidade, os valores de perda de solo foram 150%, 60% e 77% maiores que os valores da unidade franco arenosa nas vazões Q_1 , Q_2 e Q_3 , respectivamente.

Os solos podem ser mais ou menos suscetíveis à erosão, dependendo de fatores intrínsecos e extrínsecos, que têm influência marcante sobre a erosão, destacando-se a textura, estrutura, taxa de infiltração de água no solo, presença de horizonte e, ou, camada coesa, teor de matéria orgânica, profundidade e material de origem, classes de capacidade de uso do solo, técnicas de preparo e de cultivo (COGO *et al.*, 2003; DECHEN, 2004, VOLK; COGO, 2009).

A textura refere-se às classes de diâmetro das partículas do solo, tendo um papel importante na infiltração, na capacidade de absorção da água e em relação a maior ou menor coesão entre as partículas. Assim, solos de textura arenosa são normalmente porosos, permitindo rápida infiltração da água, dificultando o escoamento superficial. Os solos argilosos de uma maneira geral, tem baixa condutividade hidráulica, o que facilita o escoamento superficial, entretanto, como possuem grande capacidade de agregação, podem dificultar o processo erosivo. Por outro lado, os solos com grande

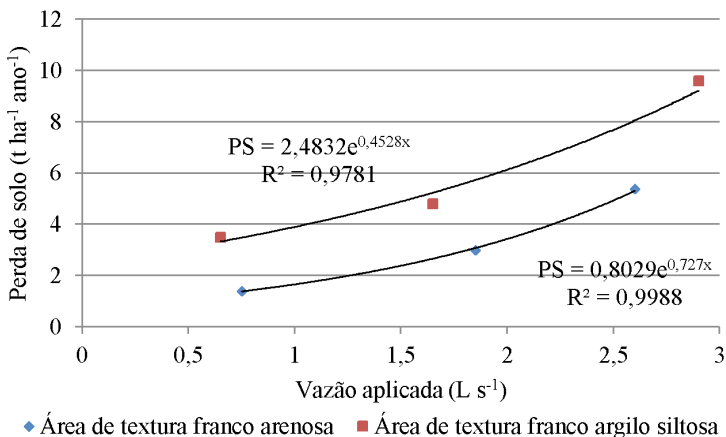


Figura 7 Perda de solo em função da vazão aplicada

quantidade de silte – unidade textural franco argilo siltosa - são mais susceptíveis à erosão, pois não possuem coesão apreciável, sendo facilmente desagregados.

Além disso, é importante ressaltar que o solo da unidade textural franco argilo siltosa não foi cultivado. Araujo et al. (2007) afirmam que os riscos de erosão dependem, entre outros fatores, da cobertura vegetal. Bertoni e Lombardi Neto (2010) reforçam que embora alguns solos sejam mais erodíveis que outros, a quantidade de solo perdido por erosão é influenciada não apenas pelo solo, mas também pelo manejo que recebe, e afirmam ainda que a diferença na erosão por diferentes sistemas de manejo para o mesmo solo é maior que a diferença de erosão de diferentes solos com o mesmo manejo. A ausência de cobertura por resíduos vegetais, a baixa rugosidade superficial e a alta quantidade de partículas desagregadas e prontamente disponíveis para o transporte, em sistemas de preparo com aração e gradagem, proporciona redução da infiltração de água no solo e aumento da enxurrada (Guadagnin et al., 2005).

Perdas de solo x coeficiente de uniformidade: O valor da uniformidade de distribuição da água infiltrada constitui um dos índices mais utilizados na análise de desempenho de um sistema de irrigação. Esta uniformidade deve ser alta para que a diferença entre a água que se põe a disposição do cultivo na cabeceira e no final da parcela irrigada seja pequena (FERNÁNDEZ-GOMÉZ, 1997). Os dados abaixo apresentam as perdas de solo, nas duas unidades texturais, bem como as eficiências de aplicação e os valores médios dos coeficientes de uniformidade de Christiansen para cada vazão, obtidos com o tempo de reposição normalizado, prática usual dos irrigantes do perímetro irrigado (TABELAS 9 E 10).

Os dados demonstram que as uniformidades alcançadas foram superiores a 90 %, com exceção do tratamento de menor vazão na unidade textural franco arenosa. Valores semelhantes foram verificados por Fernández-Goméz *et al.*, (2004) estudando a erosão de solos em irrigação por sulcos utilizando vazões entre 0,8 e 3,0 L s⁻¹ em regiões da Espanha.

Esses altos índices devem-se também ao comprimento da parcela que não era elevada e as pequenas diferenças no tempo de oportunidade ao longo da parcela irrigada.

Tabela 9 Perdas de solo total e valores médios de Ea e CUC na unidade textural franco arenosa para a condição de tempo de reposição normalizado

| Vazão (L s ⁻¹) | Índice (%) | Irrigação | | | | | Média | Perda de solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|-------------------------------|---------------|-----------|------|------|------|------|-------|--|
| | | I | II | III | IV | V | | |
| 0,7-0,8 | CUC | 87,2 | 88,2 | 87,0 | 89,2 | 83,7 | 87,1 | 0,4 |
| | Ea | 39,7 | 37,0 | 29,7 | 44,1 | 59,9 | 42,9 | |
| 1,8-1,9 | CUC | 93,2 | 95,2 | 93,5 | 94,8 | 93,3 | 94,0 | 6,0 |
| | Ea | 28,4 | 27,2 | 18,5 | 26,8 | 53,3 | 30,8 | |
| 2,4-2,8 | CUC | 93,2 | 98,8 | 94,5 | 95,2 | 93,8 | 95,1 | 7,3 |
| | Ea | 21,1 | 20,3 | 16,4 | 20,1 | 44,0 | 24,3 | |

Tabela 10 Perdas de solo total e valores médios de Ea e CUC na unidade textural franco argilo siltosa para a condição de tempo de reposição normalizado

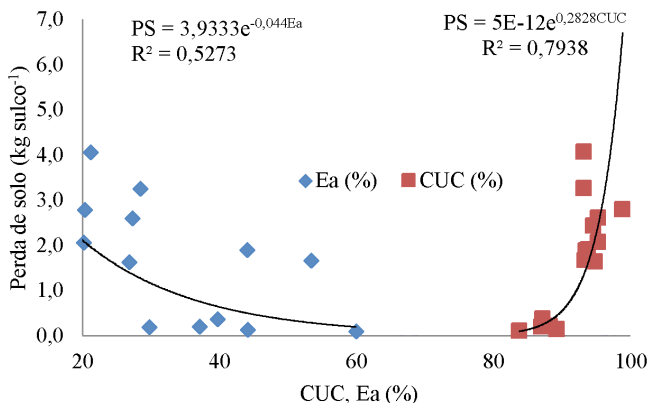
| Vazão (L s ⁻¹) | Índice (%) | Irrigação | | | | Média | Perda de solo (t ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|-------------------------------|---------------|-----------|------|------|------|-------|--|
| | | I | II | III | IV | | |
| 0,6 - 0,7 | CUC | 91,8 | 92,3 | 94,5 | 93,5 | 93,0 | 1,9 |
| | Ea | 31,9 | 29,8 | 34,9 | 30,0 | 31,6 | |
| 1,6 - 1,7 | CUC | 94,9 | 96,8 | 94,6 | 95,2 | 95,4 | 10,7 |
| | Ea | 25,2 | 28,0 | 28,0 | 27,0 | 27,0 | |
| 2,8 - 3,0 | CUC | 97,0 | 98,7 | 94,3 | 98,0 | 97,0 | 20,2 |
| | Ea | 18,2 | 15,9 | 18,9 | 14,8 | 16,9 | |

Fonte: Autora (2012)

Em relação à erosão provocada em cada uma das irrigações, os tratamentos de vazão que geraram os maiores coeficientes de uniformidade foram também os que produziram maior perda de solo. Nota-se através das Figuras 8 e 9 a relação direta entre a perda de solo e o CUC, o que pode ser claramente observada na unidade textural franco arenosa. À medida que se eleva o CUC, a perda de solo cresce exponencialmente.

Paralelamente, tem-se a eficiência de aplicação, também muito importante na avaliação da irrigação. Entende-se que ao aumentar a uniformidade de distribuição, a eficiência de aplicação tende a diminuir devido ao aumento da vazão ocasionando maior perda de água por escoamento e consequentemente maior transporte de sedimento, ou seja, maior perda de solo.

Considerando que o limite de perda de solo aceitável de acordo com USDA (2003) é de aproximadamente 12 t ha⁻¹ ano⁻¹, apenas o tratamento de maior vazão na unidade textural franco argilo siltosa ultrapassou esse limite. Diante disto, visando apenas à uniformidade de distribuição de água, este fato deduz que para se alcançar uma irrigação com maior valor da uniformidade de distribuição, dever-se-ia utilizar

**Figura 8** Perda de solo em função do CUC e Ea na unidade textural franco arenosa

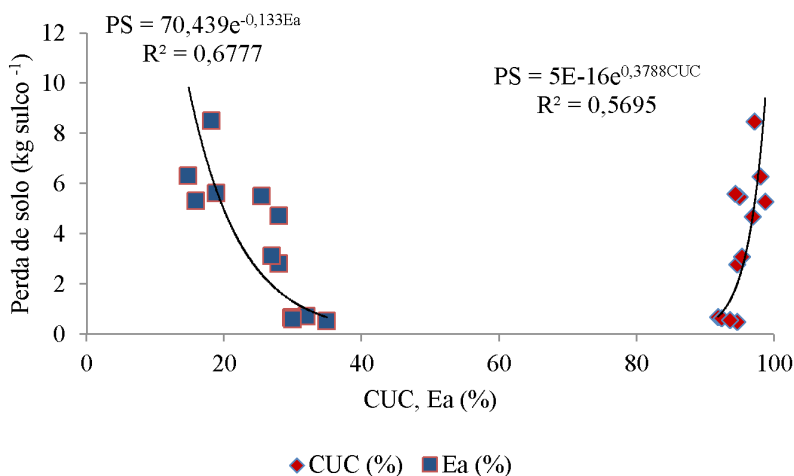


Figura 9 Perda de solo em função do CUC e Ea na unidade textural franco argilo siltosa

o tratamento de maior vazão. No entanto, deve-se levar em consideração para um manejo mais eficiente, a eficiência de irrigação (Ea) que, como já foi mostrado anteriormente, em termos de valores médios, este índice foi maior quando aplicado a menor vazão.

Combinando essas duas variáveis, Ea e CUC, tem-se que, para uma menor perda de solo, o tratamento que obteve melhores índices de Ea e índices aceitáveis de CUC, foi o tratamento Q_1 (menor vazão). Em contrapartida, outro fator deve ser levado em consideração: a realidade dos Perímetros Irrigados do Nordeste brasileiro, mais precisamente, o Perímetro Irrigado Curu Pentecoste, onde a distribuição de água é feita semanalmente e os irrigantes têm apenas dois dias de água para a irrigação de sua área, em média 4,0 ha. Assim, torna-se inviável a utilização de uma vazão que demande um tempo alto de irrigação. Considerando as perdas de solo ocasionadas pelos tratamentos Q_1 e Q_2 , nota-se que há um acréscimo de 22% quando utilizado o tratamento Q_3 , para um acréscimo de CUC de somente 1%. Esse percentual de 18% equivale a mais de 1,0 t ha⁻¹ de solo ao ano que é perdido durante as irrigações e embora a vazão Q_3 não tenha gerado perdas de solo maiores que o tolerável, deve-se atentar para o que está sendo carregado junto com o sedimento, no caso, íons que podem comprometer a fertilidade do solo bem como contaminar as águas superficiais, dependendo do destino do volume de água que está sendo escoado. Este valor é ainda maior quando analisamos as perdas de solo ocasionadas pelos diferentes tratamentos de vazão na unidade textural franco argilo siltosa (aumento de aproximadamente 10 t ano⁻¹ na perda de solo para um incremento de pouco mais de 1% na uniformidade).

Embora se observe de um modo geral, uma correlação positiva entre vazão aplicada e CUC, como consequência do menor tempo de avanço para maiores vazões,

constata-se nos dados da Tabela 11 que esta tendência não foi verificada quando os dados de lâmina média aplicada são normalizados para fins de análise comparativa.

No Brasil, tem-se observado na execução dos projetos uma maior ênfase na dimensão econômica, em detrimento das dimensões social e ambiental. Não estão sendo considerados, com o devido rigor, os aspectos relacionados com os impactos ambientais, pois muitas práticas de manejo que o agricultor é acostumado a realizar implicam em escoamento exagerado e conseqüentemente erosão. Assim, em todos os Perímetros Irrigados Públicos Federais sediados no nordeste brasileiro, em especial os mais antigos, que praticam irrigação por superfície, o manejo do solo e da água tem sido implementado sem a consideração de seus efeitos sobre o impacto ambiental na área.

Na avaliação das conseqüências dos impactos negativos sobre as reservas hídricas devem-se enfatizar os problemas correlatos de erosão dos solos, assoreamento dos corpos de água e falta de controle no uso de fertilizantes e biocidas. A situação agrava-se pela insuficiente proteção das fontes e dos mananciais, que muitas vezes inviabiliza o aproveitamento dessa água para outros usos, ou onera seu custo devido à necessidade de tratamento que, em última instância, será tributado à comunidade.

Embora os grandes benefícios advindos do uso da irrigação sejam incontestáveis, é preciso ter em mente que os projetos de irrigação podem causar impactos adversos ao meio ambiente, à qualidade do solo e da água, à saúde pública e ao aspecto socioeconômico da região.

Assim, os trabalhos desenvolvidos devem visar uma gestão integrada e compartilhada do uso, controle e conservação de água e solo. Essa gestão deve ser realizada holisticamente, de forma multidisciplinar e interdisciplinar. Não mais pode existir o conceito de gestão de recursos hídricos baseada exclusivamente na análise da irrigação, geração hidrelétrica ou saneamento básico. Esses conflitos estão acentuando-se cada vez mais, tanto em termos nacionais como internacionais, de forma que a administração racional dos recursos hídricos torna-se uma necessidade urgente.

Pelos motivos supracitados, os estudos a serem realizados devem considerar obrigatoriamente o uso múltiplo da água e, segundo análises sociais, econômicas e

Tabela 11 Perdas de solo total e valores médios de CUC para a condição de lâmina média aplicada normalizada

| Vazão (L s ⁻¹) | CUC médio (%) | Perda de solo (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹) |
|--|---------------|--|
| Unidade textural franco arenosa | | |
| 0,7-0,8 | 92,6 | 1,4 |
| 1,8-1,9 | 93,8 | 3,0 |
| 2,4-2,8 | 93,0 | 5,4 |
| Unidade textural franco argilo siltosa | | |
| 0,6-0,7 | 94,4 | 3,5 |
| 1,6-1,7 | 95,4 | 4,8 |
| 2,8-3,0 | 92,5 | 9,6 |

ambientais, devem-se estabelecer as potencialidades de cada um desses usos, com os devidos planejamentos e regulamentações necessárias para o uso racional dos recursos hídricos, visando sempre ao melhor para o bem-estar de nossa nação.

4 CONCLUSÕES

A análise dos eventos de irrigação permite verificar prevalência da estratégia de irrigação sem déficit, com elevados valores de uniformidade da lâmina de água infiltrada ao longo da parcela irrigada, porém, com baixos valores de eficiência de aplicação traduzidos nas “perdas” de água em nível de parcela irrigada. Cabe destacar que em nível de Bacia Hidrográfica e a partir da montante da barragem de derivação de água para o Perímetro Irrigado, o Rio Curu é perenizado com o excesso de água da irrigação por sulcos.

A pesquisa revelou que o excesso de água proveniente da irrigação por sulcos carregou consigo altas concentrações de sedimentos, valores estes que variaram de $0,1 \text{ g L}^{-1}$ a $7,0 \text{ g L}^{-1}$, gerando uma perda de solo de até $20 \text{ t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$.

A perda de solo superou o limite aceitável de acordo com o USDA (2003), quando aplicada uma vazão média de $2,9 \text{ L s}^{-1}$, em um solo de textura franco argilo siltosa com declividade média de 0,3% e com o manejo da irrigação realizado de acordo com as práticas usuais dos irrigantes. No entanto, quando a irrigação foi realizada visando a aplicação de uma mesma lâmina média para todos os tratamentos de vazão, o limite de perda de solo não foi superado.

A perda de solo foi sempre superior na unidade textural franco argilo siltosa, a qual apresenta solo do ponto de vista textural mais apropriado à irrigação por método superficial, seja pelo aspecto da minimização das perdas de água por percolação, seja pelo fato de apresentar maior fertilidade natural, comparativamente, ao solo da unidade textural franco arenosa, de textura mais leve. Estas informações corroboram com a necessidade de um manejo mais cuidadoso do binômio solo e água nos solos mais adequados a este método de irrigação, como forma de minorar as perdas de solo.

A perda de solo aumentou com a vazão aplicada na cabeceira do sulco segundo um modelo potencial a uma taxa crescente, entretanto, outros fatores importantes – comprimento do sulco, declividade e textura do solo – devem ser acrescidos à análise, visando melhorar as práticas de manejo para minorar os problemas de erosão, otimizando assim a eficiência hidráulica das irrigações e a conservação do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, G.H.S.; ALMEIDA, J.R.; GUERRA, A.J.T. (2007). **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 320p.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. (2010). **Conservação do solo**. 7.ed. São Paulo: Ícone, 355p.

- BJORNEBERG D., STRELKOFF, T. Furrow Irrigation Data Needs for Simulating Erosion and Evaluating Erosion Models. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, paper: 01-2257, 2001
- BOTREL, T.A.; MARQUES, P.A.A. Software para dimensionamento de irrigação por sulcos. **Scientia Agricola**, v.57, n.4, p.803-811, out./dez. 2000
- BROWN, M.J.; KEMPER, W.D. ; TROUT, T.J. ; HUMPHERYS, A.S.. Sediment, erosion and water intake in furrows. **Irr. Sci.** v. 9, p. 45-55, 1988.
- CARTER, D.L.; BROCKWAY, C.E. ; TANJI, K.K. Controlling erosion and sediment loss from furrow-irrigated cropland. **J. Irrig. Drain. Engng.**, 119, 975-988. 1993b
- CASTRO, L. C. A. **Análise da irrigação por sulcos utilizando a metodologia do balanço de volume**. 91p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.1997
- CHRISTOFIDIS, D. Novos olhares sobre as áreas irrigadas no mundo, no Brasil e na bacia do rio São Francisco, **Revista ITEM**, nº 78, 2º Trim. 2008, p. 74 – 77, Belo Horizonte, 2008.b
- COGO, N.P.; LEVIEN, R. & SCHWARZ, R.A. . Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.743-753, 2003.
- COIADO, E. M. **Uso do amostrador fixo programável na determinação da concentração dos sedimentos transportados em suspensão no Rio Atibaia/SP**. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS E V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. Anais Gestão dos recursos hídricos: o desafio da prática. Aracaju: ABRH, 2001. Cd.
- COSTA, R.N.T.; SOUZA, F. **Irrigação por Superfície**. In: ROSA, M. De F.; GONDIM, R.S.; FIGUEIREDO, M.C.B. (Org). *Gestão Sustentável no Baixo Jaguaribe*. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, v. XI, p. 261-288, 2006
- DECHEN, S.C.F.; DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & VIEIRA, S.R. **Manejo de solos tropicais no Brasil**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, MANEJO INTEGRADO A CIÊNCIA DO SOLO NA PRODUÇÃO DE ALIMENTOS, 15., Santa Maria, 2004. Anais. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. p.1-25.
- DNOCS. **Perímetros Irrigados DNOCS**. Disponível em: http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/curu_pentecoste.html. Acesso em 21/11/2013
- DNOCS/IICA. **Diagnóstico do Perímetro Irrigado Curu-Recuperação para a formulação do Plano de Recuperação e Modernização**. Fortaleza – CE, Julho 1990. 109 p.

- EMBRAPA ALGODÃO. **Sistema de produção: Cultivo do Algodão irrigado**. 2^a. Ed. Versão eletrônica. 2007. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/Algodaoirrigado_2ed/adubacao.html. Último acesso: 18-05-2011.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **La erosión del suelo por el agua: Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo**. Roma: Organization de Las Naciones Unidas, 1967. 207p.
- FERNANDEZ-GOMEZ, R. **La erosión del suelo en el riego por surcos**. PhD thesis, University of Córdoba, Spain. 1997
- FERNANDEZ GOMEZ, R.; MATEOS, L.; GIRALDEZ, J.V. Furrow irrigation erosion and management. **Irrig Sci** . v. 23, p. 123–131, 2004
- FRIZZONE, J.A. **Irrigação por Superfície**. Piracicaba: USP, ESALQ, Departamento de Engenharia Rural, 183p. Série didática, 005, 1993
- GIRÃO, A. R.; DUTRA, I.; SOUZA, F. Área irrigada e métodos de irrigação no Estado do Ceará segundo o Censo Agropecuário 1995-1996. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 161-165, 2001.
- GUADAGNIN, J. C. **Perdas de nutrientes e carbono orgânico pela erosão hídrica, em um Cambissolo Húmico Aluminico léptico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo**. Lages: UDESC, 2003. 150p. Dissertação Mestrado
- Le BISSONNAIS, Y. ; SINGER, M.J. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 57, p. 224-229, 1993.
- LEI, T.W. ; ZHANG, Q. ; ZHAO, J. ; TANG, Z. A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.44 n.6, p. 1537-1542, 2001
- LENTZ, R.D.; SOJKA, R.E. ; CARTER, D.L. Furrow irrigation water quality effects on soil loss and infiltration. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 60, p. 238-245, 1996.
- LOIOLA, M. L. ; SOUZA, F. DE. Estatísticas sobre irrigação no Brasil segundo o Censo Agropecuário 1995-1996. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, DEAg/UFPB. v. 5, n. 1, p. 171-180. 2001.
- MAASS, M. M. **Erósión del sueles en México: una consecuencia de la transformación del hábitat y uno de los problemas más serios de degradación ambiental**. Programa Universitario de Medio Ambiente. 1998.
- MAILAPALLI, D.R. ; RAGHUWANSHI, N.S.; SINGH, R. Sediment transport in furrow Irrigation **Irrig Sci**. v. 27, p. 449–456, 2009
- MATEOS, L.; GIRALDEZ, J.V. Suspended load and bed load in irrigation furrows. **Catena**, v. 64, p. 232–246. 2005
- MEDEIROS, P.H.A; GÜNTNER, A; FRANCKE, T.; MAMEDE, J.L.; de ARAÚJO, J.C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques**, v.55, n.4, 2010 p 636-648.

- PANACHUKI, E.; SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A. C. T.; CARVALHO, D.F.; URCHEI, M. A. Parâmetros físicos do solo e erosão hídrica sob chuva simulada, em área de integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.261-268, 2006.
- PINHEIRO, E.A.R.; de ARAÚJO, J.C.; FONTENELE, S.B; LOPES, J.W.B. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. **Water Resources and Irrigation Management**. v.2, n.2, p.103-110, 2013.
- POLIAKOV, V.O. ; NEARING, M.A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v.51, n.1 , p33-43, 2003.
- PROFFITT, A. P. B.; HAIRSINE, P. B.; ROSE, C. W. Modeling soil erosion by overland flow: application over a range of hydraulic conditions. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, St. Joseph, v.36, n.6, p.1743-1753, 1993.
- SANTOS, G.G; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, UAEEA/UFCG , v.14, n.2, p.115-123, 2010
- TROUT, T.J. Furrow irrigation erosion and sedimentation: On-field distribution. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.39, p.1717-1723, 1996
- TROUT, T.J.; NEIBLING, W.H. Erosion and sedimentation processes on irrigated fields. **J.Irrig. and Drain. Eng.** v.119, p.947-963, 1993
- USDA Natural Resources Conservation Service .**National soil survey handbook**. Available at <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>. 2003
- VOLK, L.B.S.; COGO, N.P. (2009). Relações entre tamanho de sedimentos erodidos, velocidade da enxurrada, rugosidade superficial criada pelo preparo e tamanho de agregados em solo submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, pp.1459-1471.
- WALKER, W.R. ;SKOGERBOE, G.V. **Surface irrigation: theory and practice**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA. 1987.

Indicadores de Desempenho de Áreas Coletivas de Irrigação

Silvio C. R. V. Lima¹ & Francisco de Souza¹

¹ Pesquisador, Instituto INOVAGRI

- 1 Introdução
- 2 Avaliação da irrigação em perímetros irrigados: Indicadores de desempenho
- 3 Avaliação econômica da irrigação
- 4 Relação benefício/custo de cada lote
- 5 Avaliação social e de adoção de tecnologia
- 6 Avaliações hidrológicas e da irrigação de áreas agrícolas: O exemplo das pesquisas no Projeto Genil-Cabra, Espanha
- 7 Balanço de água na área e índices de irrigação
- 8 Indicadores socioeconômicos de áreas irrigadas
 - 8.1 Avaliação econômica
 - 8.2 Avaliação das receitas líquidas e brutas
 - 8.3 Relação benefício/custo
- 9 Serviço de Assessoramento ao Irrigante (SAI) do INOVAGRI
 - 9.1 Contextualização
 - 9.2 Descrição dos indicadores
 - 9.3 Sistema S@I
- 10 Conclusões
 - Referências bibliográficas

Irrigação da Conservação de Água e Solo
à Sustentabilidade com Vistas à Autogestão
ISBN 978-85-67668-05-5

INOVAGRI
INSTITUTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO NA AGRICULTURA IRRIGADA

Fortaleza - CE
2014

4

Indicadores de Desempenho de Áreas Coletivas de Irrigação

1 INTRODUÇÃO

O manejo de irrigação tem sido, ao longo do tempo, negligenciado pelos planejadores públicos, que têm dispensado pouca atenção ao assunto, principalmente nos estados nordestinos do Brasil, onde, até hoje, pouco crédito é dado a essa atividade. Em se tratando dos perímetros públicos de irrigação brasileiros, eles são alvo de constantes tentativas de modernização mal-sucedidas, já que geralmente, não obtêm retorno do investimento realizado. Talvez o maior desafio não seja nenhuma nova tecnologia de irrigação, mas a busca por maneiras de reduzir as grandes diferenças em eficiência técnica, rendimento e produtividade da água, entre as que podem ser encontradas dentro dos sistemas de irrigação, sejam eles novos ou antigos.

A eficiência técnica da irrigação, que é a forma de realizar as mesmas atividades, mas usando pouca água, é a alternativa preferida pelos tomadores de decisões, quanto ao problema da escassez de água. Para avaliar o efeito da eficiência técnica numa determinada sociedade, requer-se uma discussão sobre a produtividade da água, que pode ser expressa como produção agrícola por unidade de volume de água (PLAYÁN; MATEOS, 2006). De acordo com esses autores, a modernização dos sistemas de irrigação oferece várias possibilidades para ampliar a produtividade da água. Essa idéia originalmente se restringia à introdução de novas infraestruturas e de equipamentos. Agora, a modernização é entendida como uma fundamental transformação no manejo dos recursos hídricos, que combina mudanças nas regras e nas estruturas institucionais, no serviço de abastecimento de água, nos calendários de irrigação e nos serviços de orientação e de treinamento, além da introdução de tecnologias e de equipamentos modernos.

Playán e Mateos (2006) verificaram que, em grandes e antigos Distritos de Irrigação da Espanha, foram incentivadas técnicas de manejo para reduzir o consumo excessivo de água de determinadas culturas; como resultado, obtiveram uma considerável economia de água, com praticamente a mesma produtividade das culturas. Isso apenas com a orientação e a reeducação dos agricultores. Existe, na agricultura irrigada, muito

mais do que apenas produção de alimento e de fibras. A irrigação é que mantém a água ligada ao meio rural, fixa a população em áreas desertas e contribui fundamentalmente para o valor social da água.

A teoria do manejo requer que os objetivos sejam identificados e definidos, as metas sejam fixadas e as medidas e os indicadores de desempenho, usados para monitorar a consecução das metas e, por conseguinte, os objetivos. A disseminação dessas informações, por meio de um formato utilizável pelos técnicos da extensão rural e pelos irrigantes, é crucial para proporcionar a melhoria no manejo e no uso da água (FRIZZONE, 2007)

A caracterização dos tipos de sistemas de irrigação está associada às 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 sistemas de irrigação públicos é a aceitação tácita de que pouco ou nada pode ser feito, em muitos projetos de gestão governamental, para relacionar os salários e a remuneração ao desempenho dos projetos de irrigação. Existe espaço para idéias inovadoras, para sugerir novas formas de remuneração aos técnicos de agências públicas, visando ao bom desempenho dos projetos, em vez de fechar os olhos e seguir, corrupto, com práticas injustas. Sob esse foco, muitas oportunidades valiosas, identificadas pela pesquisa, podem falhar ao serem implementadas (BURTON; KIVUMBI; EL-ASKARI, 1999).

Este texto pretende apresentar os conceitos de indicadores de desempenho para áreas irrigadas, produtividade da água e indicar metodologias de manejo e de avaliação da irrigação, visando o uso racional da água na agricultura irrigada.

2 AVALIAÇÃO DA IRRIGAÇÃO EM PERÍMETROS IRRIGADOS: INDICADORES DE DESEMPENHO

O desempenho pode ser avaliado para melhorar a operação do sistema, para verificar o progresso em função de metas estratégicas, para observar a situação geral do projeto, para avaliar os impactos de intervenções, para diagnosticar intervenções, para melhor entender os determinantes do desempenho e comparar o desempenho de um perímetro a outros, ou para verificar o mesmo perímetro ao longo do tempo (MOLDEN, 1998 citado por DIÓGENES, 2008).

Pesquisadores tendem a avaliar o desempenho de sistemas irrigados de forma bastante detalhada; entretanto, o nível de detalhes dentro do processo de desempenho depende do propósito da avaliação, havendo, portanto, a necessidade de se definir um conjunto de indicadores (BRITO; BOS, 1997).

O monitoramento desses indicadores é um instrumento de grande importância para a tomada de decisões, uma vez que permite acompanhar a evolução do desempenho,

ao longo do tempo, adotar medidas corretivas necessárias e, no caso específico das atividades de operação e de manutenção, comparar os indicadores com os de perímetros similares (DIÓGENES, 2008).

Mateos (2008) define uma série de expressões como Coeficiente de Uso Consuntivo da Irrigação (ICUC), que levam em consideração a reutilização da água de irrigação em sistemas em série e em paralelo. Para este autor, essas expressões constituem um quadro conceitual para a avaliação, planejamento e políticas de gestão no âmbito de um novo paradigma de gestão integrada dos recursos. As decisões sobre novos empreendimentos de irrigação ou sobre reabilitação e modernização dos sistemas de irrigação existentes precisam ser baseadas neste tipo de análise. Além disso, estas expressões podem ser a base para modelos mais complexos aplicável à avaliação de desempenho de qualquer tipo de sistema de irrigação. Fórmulas para análise de sistemas de irrigação alimentado por um aquífero não foram incluídos neste estudo, mas sua derivação não deve ser difícil.

Indicadores de desempenho têm sido um componente da prática de irrigação, desde que o homem começou a controlar a água para aumentar a produção de alimentos. Os antigos egípcios monitoravam o nível de água do rio Nilo para saber qual área poderia ser irrigada, de modo a prevenir-se de enchentes e da falta de alimentos (BOS et al., 1994).

De acordo com Garcia-Vila et al. (2008), um dos indicadores de desempenho mais popular na irrigação tem sido o PW. Análises recentes têm utilizado o PW benchmarking para as diferenças no manejo da irrigação entre as diversas regiões (MOLDEN; SAKTHIVADIVEL, 1999), para avaliar o desempenho dentro de um sistema de irrigação (LORITE et al., 2004b), e para discutir medidas de modernização e de otimização dos sistemas de irrigação (PLAYÁN; MATEOS, 2006).

Segundo International Water Management Institute - IWMI (1999), indicadores de desempenho comparativos permitem observar o desempenho da agricultura irrigada e podem ser utilizados como ferramenta para medir o desempenho relativo, ou para acompanhar o desempenho dos perímetros irrigados.

De acordo com Brito e Bos (1997), existe uma carência de metodologias de avaliação de perímetros, com enfoque global, ou seja, que possam fornecer uma idéia ampla sobre o desempenho dos perímetros, a partir de diferentes perspectivas. A falta de metodologias que permitam avaliar o desempenho de projetos, além de não possibilitar uma avaliação objetiva e sistemática, contribui para a manutenção deficitária dos perímetros, uma vez que não se dispõe de ferramentas para identificar onde estão os entraves e propor intervenções para corrigi-los.

O número de indicadores que se utilizará depende do nível de detalhes com o qual se necessita quantificar o desempenho, podendo um bom indicador ser usado de dois modos distintos. O uso do mesmo indicador ao longo do tempo é importante, porque auxilia na identificação de tendências que se deverão rever, antes que medidas reparadoras se tornem muito caras ou complexas (BOS, 1997 citado por DIÓGENES,

2008). Segundo o autor, um verdadeiro indicador inclui um valor real e um valor planejado e permite a avaliação da divergência entre ambos, podendo, assim, avaliar-se se a divergência é aceitável ou não. Portanto, é desejável expressar os indicadores na forma de uma razão entre a situação medida realmente e a situação pretendida ou planejada. Tais indicadores são utilizados para mostrar relações e tendências e serão úteis na identificação das situações que demandam estudos mais detalhados.

Mateos (2008) define expressões para o cálculo de indicadores de desempenho em sistemas de irrigação, dispostos em série e em paralelo, com uma única fonte e várias oportunidades para reuso de água. De acordo com o autor, apesar das críticas recentes, o conceito clássico de eficiência da irrigação ainda é válido se for devidamente utilizado no contexto de múltiplas unidades de irrigação. Na verdade, ele continua a ser adequado para analisar o desempenho dos sistemas de irrigação compostos de unidades múltiplas, dispostas em diferentes configurações. O primeiro passo para a avaliação de desempenho da irrigação deve ser uma definição clara das fronteiras do sistema de interesse.

Segundo Perry et al. (2009), para entender melhor como as culturas, os ambientes agroclimático e as diferentes práticas de manejo podem influenciar na relação entre a produção agrícola e o consumo de água, pode-se definir a produtividade de água para uma cultura (WP) como a razão entre a quantidade produzida e a quantidade de água consumida para obter essa produção. Além disso, a definição da produtividade da água precisa ser específica, indicando qual o produto (ou o rendimento da biomassa) e qual o consumo por transpiração (ou evapotranspiração). Assim, pode-se expressar a produtividade da água de uma cultura (PW) como: (a) Produtividade de água da biomassa referida à transpiração: $PW(T) = (\text{kg de biomassa})/(\text{m}^3 \text{ de água transpirada})$; (b) Produtividade de água da biomassa referida à evapotranspiração: $PW(ET) = (\text{kg de biomassa})/(\text{m}^3 \text{ de água evapotranspirada})$; (c) Produtividade de água da biomassa relativo ao rendimento, referida à transpiração: $PW(T) = (\text{kg de Rendimento utilizável})/(\text{m}^3 \text{ de água transpirada})$; Produtividade de água da biomassa relativo ao rendimento, referida à evapotranspiração: $PW(ET) = (\text{kg de Rendimento utilizável})/(\text{m}^3 \text{ de água evapotranspirada})$

3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA IRRIGAÇÃO

Effertz et al. (1993) consideram de suma importância a utilização de indicadores financeiros no perímetro irrigado, ressaltando a importância da avaliação econômica, principalmente na fase em que os perímetros irrigados estão sendo administrados pelos próprios usuários, através de suas organizações.

De acordo com Bos (1997), cada participante do setor agrícola, políticos, membros de agências e produtores têm diferentes perspectivas quanto ao significado do desempenho econômico. Cada um deles requer um grupo separado de indicadores, que reflita separadamente seus objetivos. O uso de indicadores em projetos públicos de

irrigação, apesar de diagnosticar uma situação momentânea extremamente importante para o direcionamento do perímetro à sua emancipação, é ainda restrito, não permitindo, ainda, diagnosticar os benefícios sociais e econômicos das comunidades onde se encontram instalados desde sua implantação. Esses indicadores são excelentes para diagnosticar o momento econômico de cada perímetro e para gerar uma classificação de desempenho, que, futuramente, possibilitará o direcionamento do perímetro à emancipação total ou parcial, garantindo-lhe a estabilidade socioeconômica.

Algumas análises de custo consideram somente os custos diretos da irrigação e desconsideram os outros custos da produção. Essa análise incompleta conduz a uma subestimativa do valor ótimo do déficit de irrigação e do ganho na receita líquida. Deve-se salientar que a redução na quantidade da água aplicada e, conseqüentemente, na produção, não implicam somente a redução dos custos da irrigação, mas também a redução dos custos de fertilizantes, de colheita e de outros fatores da produção, e pode ainda implicar a redução dos custos de capital envolvidos na derivação de água e nos sistemas de irrigação (FRIZZONE, 2007).

A agricultura irrigada exige alto investimento em obras e na aquisição de equipamentos, no transporte, no controle e na distribuição da água; além de gastos com energia e mão-de-obra para a operação do sistema, que representam importantes custos adicionais, os quais devem ser pagos pelo incremento da produtividade, proporcionado pelo fornecimento de água às plantas (CLARK et al., 1993 citados por MARQUES, 2006).

4 AVALIAÇÕES HIDROLÓGICAS E DA IRRIGAÇÃO DE ÁREAS AGRÍCOLAS: O EXEMPLO DAS PESQUISAS NO PROJETO GENIL-CABRA, ESPANHA

Na Espanha, o Projeto de Irrigação Genil-Cabra (PIGC), Coletividade Santaella, está situado a 30 km do centro de Córdoba, onde o IAS/CSIC tem uma grande atuação em pesquisa e difusão tecnológica. Nesse Distrito de Irrigação, existe uma forte atuação do setor público, auxiliando o setor privado para viabilizar pesquisas aplicadas, de cujos resultados os produtores são os maiores beneficiados. Essa experiência o autor teve a oportunidade de vivenciar durante o ano de 2008. Esse projeto sempre vem obtendo apoio nas pesquisas por parte da Comunidade de Irrigantes, através do Serviço de Assessoramento ao Irrigante – SAR. A Comunidade Santaella começou a atuar na campanha de irrigação de 1990/1991 sobre uma área de 2.663 ha, ampliada para cerca de 6.900 ha em 1993/1994, e que se mantém constante até o presente, ocupando 45% da área do PIGC, onde trabalham 47% dos agricultores (INSTITUTO ANDALUZ DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN AGRARIA, PESQUERA, ALIMENTARIA Y DE LA PRODUCCIÓN ECOLÓGICA - IFAPA, 2005).

Lorite et al. (2004a) realizaram uma série de avaliações da irrigação no PIGC e identificaram que a irrigação era realizada com déficit e, portanto, apresentava alto valor de eficiência. Lorite et al. (2004b), nessa mesma área, definiram a variabilidade dos indicadores utilizados entre as culturas e as parcelas de cultivo.

Um estudo hidrológico da área também foi realizado por Lorite et al. (2005), com base na premissa de que a gestão na agricultura irrigada é uma condição indispensável para a conservação de água na agricultura. Os autores realizaram uma análise detalhada do desempenho da irrigação de cerca de 840 parcelas, no período de 1996 a 2000. A produtividade da água (PW) foi mais elevada para os cultivos de alho e oliveira, variando de 1,13 euro m⁻³ a 6,52 euros m⁻³, enquanto, para as culturas de campo, como o milho, essa variação foi menor (média dos quatro anos de 0,28 euro m⁻³) e mais elevada na beterraba (média dos quatro anos de 1,04 euro m⁻³).

García-Vila et al. (2008) avaliaram o PIGC por meio de entrevistas com 50 irrigantes, escolhidos aleatoriamente, entre os 541 em atividade. O questionário apresentado revelou algumas das causas do pequeno volume de irrigação utilizado, que foram, principalmente, associadas à tentativa de equilibrar a rentabilidade e a estabilidade da produção agrícola e à falta de incentivos para maximizar a produtividade de culturas subvencionadas pela Política Agrícola Comum (PAC) da União Européia. A resposta à escassez de água também foi definida através de entrevistas que demonstraram que a mudança na escolha das culturas é a primeira reação, para se antecipar à restrição no fornecimento de água.

Fernandez et al. (2007) avaliaram o desempenho da irrigação e a contaminação difusa dessa área por agroquímicos, durante a campanha de 2005/2006, utilizando a metodologia de Duarte (2006), aplicada em Portugal. Os autores não obtiveram conclusões satisfatórias para a contaminação difusa, porém verificaram que a área utiliza irrigação deficitária com alto índice de eficiência.

Lorite et al. (2008) concluíram que a utilização do coeficiente de cultivo (Kc), apresentado pelo Manual FAO 56 na região de Andaluzia, pode provocar estresse hídrico à cultura da beterraba e excesso de água no cultivo do milho, neste caso, ocasionando perdas de água e reduzindo a produção.

Mateos (2007) desenvolveu metodologia para avaliar os indicadores de desempenho da irrigação, em condições de déficit hídrico, a qual está sendo utilizada no Projeto de Irrigação Genil-Cabra, assim como é utilizada em diversas pesquisas na Espanha, principalmente em áreas irrigadas às margens do Mediterrâneo. A base da metodologia é a realização do balanço hídrico climatológico, para determinar a evapotranspiração das culturas em condições deficitárias de irrigação.

As fontes utilizadas para a compilação de informações neste estudo foram as seguintes:

- Registros da Comunidade de irrigantes.
- Registro, por uma estação de medição via rádio, instalada para este estudo, da quantidade de água aplicada com a irrigação em cada parcela.
- Registros da vazão pela estação de estudos hidrológicos.
- Estação meteorológica automática pertencente ao Instituto de Agricultura Sustentável (IAS), situada no local e que proporciona dados climáticos diários.

Os dados fornecidos pela Comunidade de Irrigantes foram coletados durante as visitas feitas à Coletividade de Santaella. Com estes registros foi elaborado um Sistema de Informação Geográfica, para representar os dados característicos da área de estudo a cada ano, assim como outros dados que foram considerados importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

A medição da água aplicada em cada parcela foi realizada de duas formas:

- Leitura direta nos medidores situados nos cavaletes de irrigação de cada parcela pertencente à área de estudo.
- Medida de leitura via rádio de um sensor instalado em cada contador e um rádio conectado a um computador.

A leitura direta dos contadores foi permitida pela Comunidade de Irrigantes. Neste caso as leituras são feitas a cada três meses ou de modo a verificar a água consumida em cada período, em cada parcela.

A medição de vazão, com leitura via rádio, foi feita através de um sistema avançado de gestão de irrigação, especialmente concebido para as comunidades de irrigantes e as grandes explorações agrícolas. É calculado o consumo de cada usuário, o volume total de água e armazenam-se todos os dados do usuário no banco de dados. Para o equipamento de medição utilizado para a irrigação foi necessário instalar sensores em cada parcela de estudo com fluxo de armazenamento de dados diários.

A leitura destes dados foi auxiliada pelo sistema Dialog 3G – Software Greentree, no qual primeiro se deve importar os dados que proporcionam os sensores instalados nas tomadas de água. Para proceder a leitura dos medidores e conseguir importar os dados dos sensores, conecta-se o rádio ao computador portátil e se inicia a leitura, com a ajuda dos mapas de situação dos sensores (Figura 1).

Para a delimitação da área da bacia delimitada por Fernandez et al. (2007) e que seria útil para a o estudo, utilizaram-se apenas pontos de referências para delimitar



Figura 1 Pontos de coletas dos sensores. Fernandez et al. (2007)

o desnível, o que não permitia a precisão suficiente para o trabalho, na definição desejada. A ferramenta utilizada para delimitar, mais precisamente, todas as parcelas que participavam da área foi um novo modelo digital de terreno (DEM), o software Modelo Digital do Terreno de Andaluzia: Relevo e Orografia, que contém o Modelo Digital do Terreno da Andaluzia com uma resolução de 10 m, gerado a partir de fotografias aéreas com escala 1:20.000 e uma ortofotografia digital a meia resolução, gerada a partir das mesmas fotografias aéreas. Aplicando-se essa visualização, podem-se obter vários produtos cartográficos: mapa de alturas, mapa de curvas de nível, mapa de iluminações e sombras, mapa de declividades classificadas, mapa de zonas vistas e ocultas e mapa de perfis do terreno.

Para apresentar essa correção, pode-se observar, na Figura 2, a primeira delimitação realizada por Fernandez et al. (2007), enquanto, na Figura 3, no mapa azul, a nova delimitação, após o DEM.

Na Figura 4, estão representadas as superposições dos resultados do trabalho realizado por Lima (2010). Em amarelo, apresenta-se a parcela total e, em verde, a bacia delimitada por Fernandez et al. (2007). No contorno em azul, está representada a nova bacia, após a delimitação determinada pelo DEM.

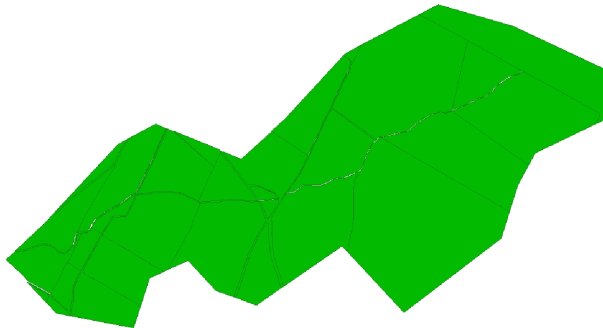


Figura 2 Área da bacia delimitada por Fernandez et al. (2007)



Figura 3 Área da bacia delimitada por Lima (2010) após o DEM

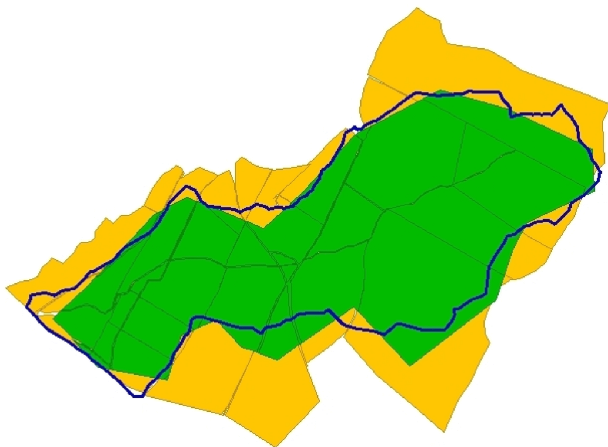


Figura 4 Áreas da bacia de estudo

Depois da leitura de todos os contadores exportam-se os dados para uma planilha a fim de facilitar o tratamento destes.

Lima et al. (2010) estudando essa área, concluiu que a eficiência do uso da água nessa área foi alta, principalmente por que se trata de irrigação deficitária e que em se tratando de avaliação de áreas irrigadas, somente o uso de ferramentas independentes como o SIG, as entrevistas e o monitoramento da irrigação podem não produzir um impacto positivo na avaliação. Durante a pesquisa, foram encontradas falhas em todas as metodologias, quando utilizadas em separado, corrigindo-se o erro somente quando utilizadas conjuntamente. Isso remete à conclusão de que, para uma área irrigada ser corretamente avaliada, necessita-se de um monitoramento correto da entrada e da saída de água, de visitas em campo, de entrevistas individuais com os agricultores e da utilização dessas informações para alimentar um sistema de informação geográfica, que deve ter o auxílio de sistemas de cadastros governamentais confiáveis, permitindo a correta confecção de mapas.

5 BALANÇO DE ÁGUA NA ÁREA E ÍNDICES DE IRRIGAÇÃO

Em geral, os índices que definem a irrigação em uma área irrigada estão baseados no balanço [equação (1)]:

$$R + P = ET + E_s + Z + \Delta s$$

em que:

- R - irrigação aplicada
- P - precipitação
- ET - evapotranspiração

- Es - escoamento superficial
- ΔS - variação de armazenamento de água no solo
- Z - percolação profunda

Como exemplo, tendo em conta as condições meteorológicas no início e no final da campanha 2004/2005, pode-se considerar que o incremento de água no solo foi desprezível, mostrando-se a situação final do solo praticamente igual à do início da referida campanha. Deve-se observar que, nos solos deste Projeto de Irrigação existe uma camada adensada e relativamente de pouca profundidade, o que dificulta a percolação profunda, provindo os fluxos de retorno do escoamento superficial e sub-superficial. Para saber o comportamento da irrigação na área, é necessário calcular uma série de índices, conforme o procedimento que segue. Primeiro, deve-se calcular a evapotranspiração real – ET_{real} [equação (2)] para este solo, deve-se utilizar a equação do balanço de água, desprezando a percolação profunda e o incremento de água no solo, oriundo da variação de armazenamento de água:

$$ET_{\text{REAL}} = R + P - Es$$

Uma vez calculada a evapotranspiração real e conhecida a evapotranspiração potencial (ET₀) pelo cálculo dos requerimentos dos cultivos, assumindo que nunca se incorre em déficit hídrico, passa-se a conhecer o coeficiente de déficit [equação (3)], que é 1(um) menos a relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração potencial:

$$\text{Coeficiente de Déficit} = 1 - \frac{ET_{\text{REAL}}}{ET_0}$$

Os demais índices são o suprimento relativo de água (SAR) [equação (4)], que indica a relação entre volume total de água fornecida à bacia estudada (irrigação + chuva) e a evapotranspiração potencial, e o suprimento relativo de irrigação (SRR) [equação (5)], que indica a relação entre a água fornecida por irrigação aplicada pelos agricultores e o volume de água de irrigação requerida para máxima produção.

$$SAR = \frac{P + R}{ET_{\text{potencial}}}$$

$$SRR = \frac{R \text{ aplicada}}{R \text{ requerida}}$$

A eficiência global de aplicação da irrigação, que se calcula pela equação (6), é a porcentagem de água de irrigação que fica no solo, para ser utilizada na evapotranspiração dos cultivos, em relação à água de irrigação total aplicada.

$$Ea = \frac{R - E_s}{R}$$

A eficiência de aplicação é equivalente a um menos o rendimento hídrico, apresentado na equação (7), conceito utilizado em hidrologia, que se aplica à estação das chuvas e é definido como:

$$RH = \frac{Es}{P}$$

Esclarece-se que, nos termos R da equação (6) e II da equação (7) foram consideradas a pouca chuva e a pouca irrigação que, respectivamente, ocorrem na campanha de irrigação e na estação das chuvas.

Por último, calcula-se a eficiência da irrigação [equação (8)], que é a relação entre a evapotranspiração decorrente da água de irrigação e o volume total de água de irrigação aplicada.

$$ER = ET_{\text{água de irrigação}} / R$$

O volume de evapotranspiração decorrente da irrigação obtém-se diminuindo-se, do volume de evapotranspiração real, o volume de precipitação durante esse período [equação (9)].

$$ET_{\text{água de irrigação}} = ET_{\text{REAL}} - II$$

6 INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DE ÁREAS IRRIGADAS

6.1 Avaliação econômica

Depois de avaliado, com acompanhamento in loco, o manejo da irrigação no período, bem como analisados os dados dos anos anteriores e definida a eficiência da irrigação e os demais indicadores de uso da água, devem ser introduzidas as avaliações sobre indicadores econômicos e sociais.

Para iniciar essa avaliação, definiu-se a evolução dos indicadores econômicos de produtividade de água, na parcela, bem como no recinto (aglomeração de mais de uma parcela de onde a água está sendo derivada) de acordo com Malano e Burton (2001) citados por Lorite et al. (2004) [equação (10)]:

$$PW(\text{€ m}^{-3}) = \frac{\text{Valor anual da produção agrícola}}{\text{Volume anual de irrigação}}$$

Na avaliação da produtividade de água no nível da parcela, foi definida a equação (11) e o do recinto, a equação (12).

$$PW(\text{€ m}^{-3}) = \frac{\text{Valor anual da produção agrícola}}{\text{Evapotranspiração da cultura no período}}$$

$$PW(\text{€ m}^{-3}) = \frac{\text{Valor anual da produção agrícola}}{\text{Volume de água observado no contador}}$$

6.2 Avaliação das receitas líquidas e brutas

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

$$Ib(w) = p y(w)$$

sendo:

$Ib(w)$ - receita bruta da unidade técnica por unidade de área, euro ha^{-1}

p - preço unitário do produto da unidade técnica, euro kg^{-1}

$y(w)$ - produtividade da cultura em função da quantidade de água, kg ha^{-1}

Assumindo que é razoável utilizar uma função de custo linear para a unidade técnica (HART; NORUM; PERI, 1980; ENGLISH, 1990), tem-se:

$$c(w) = c_0 + h(w) + c_w w$$

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 da água aplicada, euros ha^{-1}

c_w - custos que dependem diretamente da quantidade da água aplicada, € m^{-3}

w - volume de água aplicada por unidade de área, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$

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

$$c(w) = c_f + c_w w$$

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

$$Z(w) = x [p y(w) - c_0 - h(w) - c_w w]$$

ou,

$$Z(w) = x [p y(w) - c_f - c_w w]$$

6.3 Relação Benefício/Custo

Este índice de desempenho econômico deve ser calculado com base nos benefícios, brutos advindos da produção agrícola irrigada, e nos custos totais da produção [equação (18)]. A produtividade das culturas foi estimada com base no depoimento dos agricultores entrevistados. Os custos da produção foram definidos a partir de informações de gastos nas operações declarados pelos agricultores.

$$\frac{B}{C} = \frac{\text{Benefício Bruto}}{\text{Custo total da produção}}$$

A idéia é verificar se os benefícios são maiores do que os custos. Esse critério pode ser empregado em quaisquer análises econômicas, sejam elas, pequenas ou grandes, sejam particulares ou governamentais.

7 SERVIÇO DE ACESSORAMENTO AO IRRIGANTE (SAI) DO INOVAGRI

7.1 Contextualização

Dentre os perímetros irrigados que estão localizados no estado do Ceará, o Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú – DIBAU é o segundo maior em termos de demanda hídrica. Apesar da elevada demanda de água, o DIBAU não possuía nenhuma estratégia de manejo da irrigação até a implantação do Projeto Serviço de Assessoramento ao Irrigante – SAI (SANTOS NETO et al., 2011; LIRA et al., 2011 e LIMA et al., 2012). Tal fato levava os irrigantes a utilizar esta técnica, com total empirismo e sem levar em consideração as peculiaridades locais.

O Serviço de Assessoramento ao Irrigante (SAI), no DIBAU, foi introduzido em 2011, pelo “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCT)” e o “Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada (Inovagri)” no DIBAU (Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú) que foi o primeiro distrito de irrigação do estado do Ceará, onde essas atividades estão sendo realizadas.

O SAI tem como objetivo dar respostas às demandas tecnológicas dos irrigantes, ou seja, realizar um assessoramento sobre o manejo da irrigação. De acordo com (LIMA et al. 2012), as primeiras experiências com serviços de assessoramento ao irrigante foram realizadas nos Estados Unidos. O CIMIS (California Irrigation Management Information System), provavelmente é quem melhor representa o potencial dos SAIs e desde a sua criação é uma referência global. Ele fornece informações para auxiliar os irrigantes da Califórnia na gestão dos seus recursos hídricos de forma eficiente incentivando a programação baseada na informação da evapotranspiração. Diversos autores estudaram serviços de assessoramento e demonstram a importância deles para uma irrigação eficiente (LIMA et. al. 2010; LIMA et. al. 2013; CÓRCOLES et al. 2010; GONZÁLEZ-DUGO et al. 2008).

O SAI implantado no DIBAU, atua em coordenação com os agricultores, que participam das soluções propostas fornecendo feedback. Adicionalmente, o SAI contribui tanto quanto possível, para a capacitação dos agricultores, para que desenvolvam o conhecimento obrigado a tomar decisões de negócios orientadas para a gestão de seus lotes. Algumas das atividades realizadas pelo SAI estão relacionados ao manejo da cultura, às necessidades hídricas das culturas, manejo da irrigação e avaliações dos sistemas de irrigação, entre outros. Para realizar estas tarefas, o SAI é composto por uma equipe científica e multidisciplinar (engenheiros agrônomos, engenheiros eletrônicos, especialistas em computação, técnicos de campo). A equipe de campo é responsável pela coleta de dados, fornecendo informações aos agricultores, e realizando avaliações do sistema de irrigação. As necessidades hídricas das culturas são calculadas usando um método do balanço hídrico simplificado dentro da zona de raiz, seguindo (ALLEN et al , 1998; . PEREIRA & ALLEN, 1999), de acordo com o recomendado pela Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO).

A Evapotranspiração de Referência é calculada usando dados meteorológicos registrados por uma estação meteorológica automática localizada dentro da área irrigada. Avaliações do sistema de irrigação na exploração são realizadas seguindo metodologia desenvolvida para cada tipo de sistema de aplicação de irrigação para estimar a uniformidade de irrigação dos sistemas e tentar detectar anomalias no desempenho. Os resultados das avaliações são utilizados para elaborar recomendações personalizadas.

7.2 SISTEMA S@I

O sistema de informação SAI é gerido com uma aplicação de computador baseado na Internet denominado de Sistema de Assessoramento ao Irrigante - S@I (www.sistemasai.com.br) que consiste no cadastro do Distrito, incluindo a área da propriedade, o número de setores, da cultura, sistema de irrigação, água consumida, etc.. Esta aplicação não só oferece um serviço útil para os agricultores do distrito de irrigação, mas também oferece oportunidades para pesquisa e pode ser facilmente adaptado a qualquer outro distrito de irrigação coletiva no Brasil. O S@I tem um módulo de irrigação que utiliza o módulo de banco de dados integrado de irrigação para uma estação meteorológica automatizada para calcular a irrigação diária no tempo para todos os campos da área irrigada e enviar mensagens via SMS ou e-mail para o usuário.

Em 2011 foi iniciado o desenvolvimento do software de gerenciamento da irrigação, ferramenta fundamental para o Projeto SAI. As atenções foram voltadas para o desenvolvimento do sistema e alimentação do banco de dados, com os cadastros obtidos nas entrevistas. No dia 01 de agosto de 2012, foi iniciado o envio das mensagens via SMS e web service aos irrigantes, que constava da informação Tempo de Irrigação (TI). O S@I é um sistema Web, com versões em português e em inglês. O fluxograma do Projeto SAI, com a atuação do Sistema S@I pode ser vista na Figura 5.

Na Figura 6 apresentamos uma tela demonstrativa do Sistema S@I desenvolvido. A tela apresentada é referente ao usuário “Administrador”. As telas de outros usuários: “irrigante” e “técnico” diferem um pouco destas, pois possuem limitações para preservar aspectos de privacidade e segurança das informações contidas no sistema. Vale observar ainda que cada irrigante possui sua própria página no sistema (via login e senha) através da qual ele pode obter dados, atualizar suas informações cadastrais e interagir virtualmente com a equipe do SAI.



Figura 5 Modelo do SAI com o S@I atuando no gerenciamento dos dados e envio das informações

8 CONCLUSÕES

A eficiência do uso da água envolve diversos fatores, principalmente porque o irrigante necessita adotar uma irrigação tecnicamente correta. No geral, ao contrário disso, o irrigante não aceita a recomendação de SAI's, mesmo aqueles que tem bastante esclarecimento sobre a importância do uso da água e dos insumos produtivos, além das práticas ambientalmente corretas na agricultura.

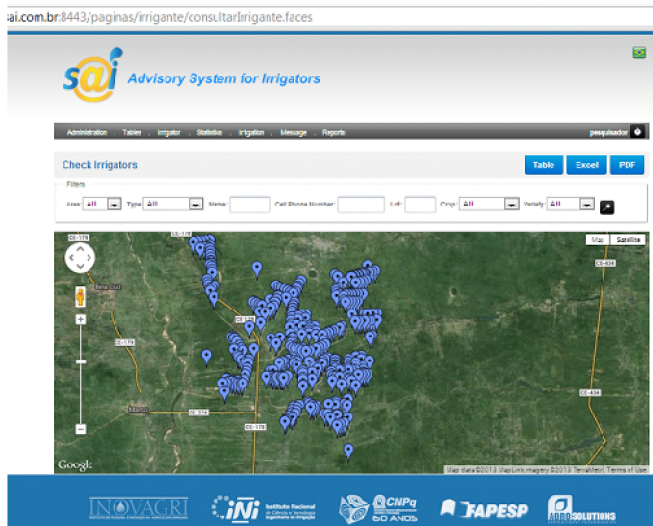


Figura 6 Tela do Sistema S@I com os todos os irrigantes do DIBAU cadastrados e georreferenciados (versão em inglês)

Em se tratando de avaliação, conclui-se que somente o uso de ferramentas independentes como o SIG, as entrevistas e o monitoramento da irrigação podem não produzir um impacto positivo na avaliação. Durante a pesquisa realizada por Lima et al. (2010), foram encontradas falhas em todas as metodologias, quando utilizadas em separado, corrigindo-se o erro somente quando utilizadas conjuntamente. Isso remete à conclusão de que, para uma área irrigada ser corretamente avaliada, necessita-se de um monitoramento correto da entrada e da saída de água, de visitas em campo, de entrevistas individuais com os agricultores e da utilização dessas informações para alimentar um sistema de informação geográfica, que deve ter o auxílio de sistemas de cadastros governamentais confiáveis, permitindo a correta confecção de mapas.

Finalizando, a irrigação em áreas coletivas de irrigação apresenta alguns aspectos qualitativos e quantitativos. Em termos qualitativos, observa-se que o agricultor geralmente é pouco assessorado. Eles necessitam assessoramento com a inserção do setor público no monitoramento da irrigação, na difusão de tecnologia e no desenvolvimento de pesquisas em parceria com o produtor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- BOS, M.G. Performance indicators for irrigation and drainage. **Irrigation and Drainage Systems**, Dordrecht, v. 11, p. 119–137, 1997.

- BOS, M.G.; MURRAY-RUST, D.H.; MERREY, D.J.; JOHNSON, H.G.; SNELLEN, W.B. Methodologies for assessing performance of irrigation and drainage management. **Irrigation and Drainage Systems**, Dordrecht, v. 7, p. 231–261, 1994.
- BRITO, R.A.L.; BOS, M.G. **Irrigation performance assessment in Brazil**. Inception/Implementation: report. Sete Lagoas: EMBRAPA, 1997. 28 p.
- 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.
- CÓRCOLES J.I, DE JUAN J.A, ORTEGA J.F., TARJUELO J.M., MORENO M. A. Management evaluation of Water Users Associations using benchmarking techniques. *Agricultural Water Management* 98:1–11, 2010
- CLARK, E.; JACOBSON, K.; OLSON, D.C. **Avaliação econômica e financeira de projetos de irrigação**. Brasília: Ministério da Integração Nacional; Secretaria da Irrigação, 1993. 67 p.
- DIÓGENES, F.C.A. **Indicadores de desempenho para o perímetro de brumado na perspectiva de sua autogestão**. 2008. 60 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- DUARTE, A.F.C. **Contaminación difusa originada por la actividad agrícola de riego, a escala de cuenca hidrográfica**. 2006. 219 p. Tesis (Doctoral) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2006.
- ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. I. Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.
- FERNÁNDEZ, M. S. F.; ASCENSIÓN, M.A.C.; MATEOS, L.; FERERES E. Comportamiento del riego a la escala de una pequeña cuenca In: MATEOS, L. **Metodologías e instrumentos para a planificación y la gestión sostenible en condiciones de escasez de agua**. Córdoba: CSIC, 2007. p. 31-50.
- 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. Planejamento da irrigação com uso de técnicas de otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 24–49, dez. 2007.
- FRIZZONE, J.A.; DOURADO NETO, D. Avaliação de sistemas de irrigação. In: MIRANDA, J.H. de; PIRES, R.C.M. (Org.). **Irrigação**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. v. 2, p. 573-651.
- GARCÍA-VILA M., I.J.; LORITE, M.A.; SORIANO, F.E. Management trends and responses to water scarcity in an irrigation scheme of Southern Spain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, p. 458–468, 2008.
- GONZÁLEZ-DUGO, M.P., MATEOS, L., Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural Water Management* 95, 48-58, 2008

- 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.
- HART, W.E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. 3, p. 275-288, 1979.
- INSTITUTO ANDALUZ DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN AGRARIA, PESQUERA, ALIMENTARIA Y DE LA PRODUCCIÓN ECOLÓGICA, **Unidad de apoyo técnico al regadío andaluz**. Córdoba: IFAPA, 2005. 10 p. (IFAPA Boletín Trimestral de Información, 1).
- INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE. **Comparative indicators for irrigation system performance**. Sri Lanka: IWMI, 1999. 34 p.
- LIMA, S. C. R. V. ; FRIZZONE, J. A.; MATEOS, L. ; FERNANDEZ. M. S. . Desempenho da Irrigação em um Projeto Hidroagrícola no Sul da Espanha: metodologia para análise da eficiência de uso da água. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, p. 59-77, 2010.
- LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; SOUSA, A. E. C.; BELTRÃO JÚNIOR, J. A.; FERREIRA, R. P. ; GARCIA, D. R. . Aplicação da tecnologia da informação e a adoção pelo agricultor: a avaliação inicial do envio de mensagens pelo serviço de assessoramento ao irrigante. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 6, p. 314-328, 2012.
- LIMA, S. C. R. V., FRIZZONE, J. A., SNYDER, R. L., MATEOS, L. Evolution of irrigation quality after the assistance for farmers: the experience of the advisory service for irrigators - SAI in “Baixo Acaraú” Irrigation District. In: 1st CIGR Inter-Regional Conference On Land and Water Challenges, 2013, Bari. - 1st CIGR Inter-Regional Conference On Land and Water Challenges. Bari: IAMB, 2013. **Proceedings**.
- LIMA, C.A.G.; CURI, W.F.; CURI, R.C. Reativação do perímetro irrigado de Gravatá: uma abordagem otimizante sobre agricultura irrigada e sustentabilidade hídrica, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 157-165, 2008
- LIRA, J. V.; MOURÃO JÚNIOR, F.; SOUSA, A. E. C.; LIMA, S. C. R. V. ; FRIZZONE, J. A; VIANA, J. M. Auditoria de Desempenho de Sistemas de Irrigação I: A experiência inicial do Serviço de Assessoramento ao Irrigante – SAI, no Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.5, p. 265-271, 2011
- LORITE, I.J.; CARMONA, M.A.G.; MATEOS, L. Sistema de información geográfica de la zona regable genil-cabra, colectividad santaella In: MATEOS, L. **Metodologías e instrumentos para a planificación y la gestión sostenible en condiciones de escasez de agua**. Córdoba: CSIC, 2007. p. 63-68.
- LORITE, I.J.; SANTOS, C.; CARMONA, S. Empleo de satélites y modelos de simulación para la programación de riegos em Genil-Cabra. **Agroboletín**. Córdoba, n. 52, p. 3, jul. 2008.

- LORITE, I.J.; MATEOS, L.; ORGAZ, F.; FERERES, E. Assessing deficit irrigation strategies at the level of an irrigation district. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 91 p. 51-60, 2007.
- LORITE I. J.; GARCÍA-VILA M.; CARMONA M. A.; SANTOS C.; SORIANO M. A. Assessment of the Irrigation Advisory Services' Recommendations and Farmers' Irrigation Management: A Case Study in Southern Spain. **Water Resources Management** 26:2397–2419, 2012
- MALANO, H.; BURTON, M. **Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector**. Rome: FAO, International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage, 2001. 50 p.
- MARQUES, P.A.A.; MARQUES, T.A.; FRIZZONE, J.A. Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba- SP. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 55-65, jan./mar. 2006
- MATEOS, L. Metodología “mipais” para el riego en condiciones de escasez de agua In: _____. **Metodologías e instrumentos para a planificación y la gestión sostenible en condiciones de escasez de agua**. Córdoba: IAS/CSIC, 2007. cap. 4, p. 25-30.
- MATEOS, L. Identifying a new paradigm for assessing irrigation system performance **Irrigation Science**, Amsterdam, v. 27, p. 25–34, 2008.
- MOLDEN, D.J.; SAKTHIVADIVEL, R.; PERRY, C.J.; FRAITURE, C. **Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems**. Colombo: International Irrigation Management Institute (IIMI), 1998. 26 p. (Research Report, 20).
- PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R.G.; BURT, C.M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, p.1517–1524, 2009.
- PLAYÁN, E.; MATEOS, L. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.80, p. 100–116, 2006.
- SANTOS NETO, A. M. DOS; BRAGA, A. C. C.; SILVA, M. M. M.; LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A., GOMES FILHO, R. R. Auditoria de Desempenho de Sistemas de Irrigação II: Avaliação e Correção da Uniformidade de Emissão de Água no Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú, CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.5, p.272 - 279, 2011
- SOUSA, E. C.; SANTOS NETO, A. M.; LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; NASCIMENTO, A. K. S.; BELTRÃO JÚNIOR, J. A. Utilização da tecnologia da informação para o envio de mensagens via SMS ao irrigante: a experiência inicial do projeto SAI. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, p. 224-234, 2013.