

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FABRÍCIO MOTA GONÇALVES

FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE AUTOGESTÃO E SUSTENTABILIDADE DO  
USO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS

FORTALEZA-CE

2014

FABRÍCIO MOTA GONÇALVES

FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE AUTOGESTÃO E SUSTENTABILIDADE DO  
USO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato  
Távora Costa

FORTALEZA-CE

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- G646f      Gonçalves, Fabrício Mota.  
              Ferramentas para análise de autogestão e sustentabilidade do uso da água em perímetros irrigados./  
              Fabrício Mota Gonçalves. – 2015.  
              112 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de  
Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2015.  
              Área de Concentração: Irrigação e Drenagem  
              Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa  
              Coorientação: Prof. Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro
1. Análise multivariada. 2. Inteligência artificial. 3. Programação linear. I. Título.

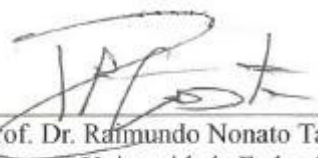
FABRÍCIO MOTA GONÇALVES

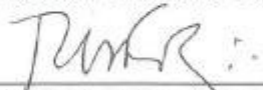
**FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE AUTOGESTÃO E SUSTENTABILIDADE DO  
USO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS**


Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 08 / 08 /2014

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará/UFC

  
Prof. Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro (Co-Orientador)  
Universidade Federal do Ceará/UFC

  
Prof. Dr. Julien Daniel Burt  
Cirad – França

Prof. Dra. Marisete Dantas de Aquino  
Universidade Federal do Ceará/UFC

  
Dr. Sílvio Carlos Ribeiro Vieira Lima  
Instituto Inovagri

*À minha mãe, Maria Mirani Teixeira Mota, à minha esposa e à minha filha, Ana Paula Bastos Reis e Maria Valentina Bastos Mota, e minha tia, Antônia Irami Mota Marinho, pelo apoio e motivação para a realização deste sonho.*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por tudo.

À minha família, por tudo que fizeram e representaram nesta conquista.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade e incentivo para realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará.

À Capes – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela ajuda financeira com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Raimundo Nonato Távora Costa, orientador do doutorado e amigo, por toda a contribuição dada na construção deste trabalho, sempre comprometido diante do processo de ensino e aprendizagem, buscando a construção do conhecimento.

Ao Professor Renato Sílvio da Frota Ribeiro, pela sua co-orientação e essencial contribuição na construção deste trabalho.

Aos membros da banca, Dr. Julien Daniel Burt, Dra. Marisete Dantas de Aquino e Sílvio Carlos Ribeiro Vieira Lima, por terem aceitado prontamente o meu convite.

A todos os professores e colegas do DENA, pela amizade e contribuição intelectual.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Água e Solo no Semiárido (GPEAS – Semiárido), por todo o período de trabalho em grupo, o que me acrescentou crescimento profissional e humano.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar o estágio atual dos Perímetros Irrigados Públicos Federais com vistas ao processo de autogestão e apresentar alternativa de alocar a distribuição de água em canais secundários de irrigação. A pesquisa foi dividida em dois temas. O primeiro abordou o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de desempenho de Perímetros Irrigados a partir da criação de um modelo estatístico Discriminante Multivariado e de uma Rede Neural Artificial utilizando os indicadores de desempenho dos perímetros públicos irrigados do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) e da Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e Parnaíba (Codevasf), como forma de avaliar a perspectiva da autogestão dos mesmos. O segundo tratou da otimização do uso da água, tendo sido realizado um estudo de caso na Fazenda Experimental Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará, em área contígua ao Perímetro Irrigado Curu Pentecoste. Com base nas informações disponibilizadas pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) e a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e Parnaíba (Codevasf), foram avaliados os principais indicadores de desempenho relativos à Autogestão dos 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 de caráter linear ou não. A RNA proporcionou a identificação automática do padrão a que pertence cada perímetro no decorrer do tempo. Com base nos resultados obtidos na Análise Multivariada Discriminante, observou-se o indicador Geração de Receita por Hectare (GRH) como mais importante no processo discriminatório entre os Perímetros Irrigados quanto à Autogestão. Os Perímetros com os melhores desempenhos em relação à Autogestão foram: Nilo Coelho, Curaçá I, Pirapora e Maniçoba. Com relação à operacionalização do uso da água, utilizou-se um modelo matemático de programação linear para determinar a forma mais racional de liberar água para as áreas irrigadas. A alocação definida pela modelagem matemática mostrou-se adequada para as necessidades das culturas estabelecidas, mostrando a utilização mais racional da água.

**Palavras-chave:** Análise multivariada. Inteligência artificial. Programação linear. Operacionalização.

## ABSTRACT

This work aims to characterize the current stage of Irrigated Perimeters Federal government with a view to self-management process and present alternative of allocating water distribution in secondary irrigation canals. The research was divided into two themes. The first addressed the development of a methodology for evaluating the performance of Irrigated Perimeters from the creation of a statistical model Multivariate discriminant and an Artificial Neural Network using the performance indicators of irrigated public areas of the National Department of Works Against Drought (Dnocs) and Development Company of the São Francisco and Parnaíba (Codevasf) as a way to evaluate the prospect of self-management of the same. The second dealt with the optimization of water use, a case study at the Experimental Farm Curu Valley, belonging to the Federal University of Ceará, in the area adjacent to the irrigated Curu Pentecost were accomplished. Based on information provided by the National Department of Works Against Drought (Dnocs) and Development Company of the São Francisco and Parnaíba (Codevasf), the key performance indicators relating to Self-Management of Irrigated Perimeters were evaluated. The Multivariate and discriminant analysis (AMD) technique Artificial Neural Networks (ANN) were used to separate the standards relating to the performance of Irrigated Perimeters linear character or not. RNA yielded the automatic identification of the pattern that belongs to each perimeter over time. Based on the results obtained in the multivariate discriminant analysis, we observed the Generation Revenue per Hectare (HRM) as the most important indicator in discriminatory process between Irrigated Perimeters regarding self-management. The perimeters with the best performance in relation to self-management were: Nilo Coelho, Curaçá I Pirapora and Maniçoba. Regarding the operationalization of water use, we used a mathematical model of linear programming to determine the most rational way to release water for irrigated areas. The allocation defined by mathematical modeling proved adequate for the needs of established cultures, showing the most rational use of water.

**Keywords:** Multivariate analysis. Artificial intelligence. Linear programming. Operations.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Metodologia resumo da aplicação das ferramentas de apoio às decisões.....           | 38 |
| Figura 2 – Mapa de localização regional dos perímetros irrigados avaliados.....                | 38 |
| Figura 3 – Elementos do processo.....  | 38 |
| Figura 4 - Processo de aprendizado da Rede Neural Artificial.....                              | 39 |
| Figura 5 - Arquitetura e os pesos gerados para a Rede Neural Artificial.....                   | 59 |
| Figura 6 – Treinamento da Rede Neural, alvo versus padrão.....                                 | 60 |
| Figura 7 – Relação entre erro e treinamento da Rede Neural artificial.....                     | 61 |
| Figura 8 – Relação de dados simulados e dados reais.....                                       | 61 |
| Figura 9 – Mapa de localização do Perímetro Irrigado Curu Pentecoste - Ceará.....              | 65 |
| Figura 10 – Disposição dos lotes e comportas da FEVC utilizados para modelagem matemática..... | 77 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1- Indicadores para a análise de longo prazo.....  | 18 |
| Tabela 2 - Situação atual da administração dos Perímetros Irrigados CODEVASF e DNOCS ..   | 34 |
| Tabela 3 – Valores das variáveis para cálculo dos indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados – Ano base 2010.....   | 41 |
| Tabela 4 – Indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados.....  | 48 |
| Tabela 5 – Estatística resumo dos Perímetros Irrigados.....   | 49 |
| Tabela 6 – Indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados adimensionalizados e normalizados pela transformação <i>Box-Cox</i> . ....  | 52 |
| Tabela 7 - Teste de igualdade de médias univariada para os indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados.....  | 52 |
| Tabela 8 - Matriz de correlação dos indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados.....   | 53 |
| Tabela 9 - Indicador selecionado para compor a função discriminante .....   | 54 |
| Tabela 10 - Coeficientes que compõem a Função Discriminante Canônica.....   | 54 |
| Tabela 11 - Classificação dos grupos por centróide .....  | 54 |
| Tabela 12 - Probabilidades para o ponto de corte .....  | 55 |
| Tabela 13 - Separações dos grupos, probabilidades de um Perímetro pertencer ao grupo Autogestão ou Cogestão e a pontuação de cada Perímetro – ano 2010.....                               | 56 |
| Tabela 14 – Arquivo de treinamento da Rede Neural Artificial (RNA) .....  | 57 |
| Tabela 15 – Resultado estimado pela Rede Neural na classificação dos Perímetros Irrigados (QwikNet V.2.23 <sup>®</sup> ).....   | 58 |
| Tabela 16 – Resultado estimado pela Rede Neural na classificação dos Perímetros Irrigados (Matlab R2012b).....  | 58 |
| Tabela 17 – Identificação dos lotes e suas respectivas áreas ligadas às comportas de abastecimento hídrico .....  | 79 |
| Tabela 18 – Plano de ocupação dos lotes da FEVC durante o ano.....  | 81 |
| Tabela 19 – Plano de ocupação dos lotes da FEVC durante o ano .....   | 82 |
| Tabela 20 - Evapotranspiração de referência, em mm dia <sup>-1</sup> , obtida pelo método de Penman Monteith / FAO (1991), para o município de Pentecoste no período de 1970 a 1998. .... | 83 |
| Tabela 21 – Coeficiente de cultivo das culturas instaladas na área de estudo.....   | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 22 - Requerimento mensal de água (mm) pelas culturas instaladas na área de<br>estudado.....  | 85  |
| Tabela 23 – Características hidráulicas das comportas da FEVC .....   | 88  |
| Tabela 24 – Solução ótima para a liberação de água por comporta .....   | 93  |
| Tabela 25 – Análise de sensibilidade do volume de água diário demandado pelas áreas<br>abastecidas pelas comportas 1, 2 e 3, conforme o mês ..... | 94  |
| Tabela 26 – Análise de sensibilidade dos coeficientes da função objetivo .....  | 95  |
| Tabela 27 – Oferta e redução de água por comporta em m <sup>3</sup> .....   | 95  |
| Tabela 28 – Viabilidade da redução dos volumes para a cominação entre as comportas 1 e 2<br>para sua área de influência .....                     | 96  |
| Tabela 29 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 1 para sua área de influência ..   | 97  |
| Tabela 30 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 2 para sua área de influência ..   | 97  |
| Tabela 31 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 3 para sua área de influência ..   | 98  |
| Tabela 32 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 4 para sua área de influência ..   | 99  |
| Tabela 33 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 5 para sua área de influência ..   | 99  |
| Tabela 34 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 6 para sua área de influência ..   | 100 |
| Tabela 35 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 7 para sua área de influência ..   | 100 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 8  |
| <b>2 HIPÓTESE E OBJETIVOS</b> .....  | 11 |
| 2.1 Hipótese .....   | 11 |
| 2.2 Objetivos.....   | 11 |
| 2.2.1 Objetivo geral.....  | 11 |
| 2.2.2 Objetivos específicos .....  | 11 |
| <b>3 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE AUTOGESTÃO DE PERÍMETROS PÚBLICOS IRRIGADOS FEDERAIS NO BRASIL</b> .....                    | 12 |
| 3.1 PERÍMETROS IRRIGADOS .....   | 12 |
| 3.2 SUSTENTABILIDADE E DESEMPENHO NA AGRICULTURA IRRIGADA .....  | 16 |
| 3.3 ANÁLISE MULTIVARIADA .....   | 21 |
| 3.3.1 Análise Discriminante .....  | 23 |
| 3.3.2 Premissas da técnica estatística de análise discriminante.....   | 23 |
| 3.4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....  | 27 |
| 3.5 MATERIAL E MÉTODOS.....  | 31 |
| 3.5.1 Ferramentas de apoio à tomada de decisão .....   | 31 |
| 3.5.2 Identificação de padrões nos Perímetros Irrigados.....   | 32 |
| 3.5.2.1 Análise multivariada dos indicadores de desempenho dos perímetros e criação de modelo estatístico de desempenho..... | 33 |
| 3.5.2.2 Criação da RNA para identificação de padrões não lineares.....   | 37 |
| 3.5.3 Variáveis analisadas .....   | 39 |
| 3.5.4 Indicadores de desempenho.....   | 42 |
| 3.6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....   | 48 |
| 3.6.1 Indicadores de desempenho.....   | 48 |
| 3.6.2 Modelo estatístico de desempenho e agrupamento dos perímetro .....   | 51 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.6.3 Determinação dos pesos para Rede Neural Artificial.....  | 56         |
| 3.6.4 Aplicação da Metodologia.....  | 62         |
| 3.7 CONCLUSÕES.....  | 64         |
| <b>4 SUSTENTABILIDADE DO USO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS.....</b>  | <b>65</b>  |
| 4.1 RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO CURU.....  | 65         |
| 4.2 BASES PARA O PLANEJAMENTO VOLTADO AOS RECURSOS HÍDRICOS E A IRRIGAÇÃO.....   | 67         |
| 4.3 POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS NACIONAL E DO CEARÁ.....   | 69         |
| 4.4 POLÍTICA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO.....  | 72         |
| 4.5 OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA E CONTEXTUALIZAÇÃO.....  | 76         |
| 4.6 MATERIAL E MÉTODOS.....  | 77         |
| 4.6.1 Caracterização da área.....  | 77         |
| 4.6.2 Ferramentas para otimização do uso da água.....  | 78         |
| 4.6.3 Modelo matemático de programação linear.....   | 78         |
| 4.6.3.1 Procedimento para coleta de dados para modelo de otimização do uso das comportas de abastecimento hídrico..... | 80         |
| 4.6.3.2 Plano de ocupação.....   | 81         |
| 4.6.3.3 Necessidade hídrica das culturas.....  | 82         |
| 4.6.4 Modelo matemático.....   | 86         |
| 4.6.4.1 Descrição do modelo.....   | 87         |
| 4.6.4.2 Solução do problema.....   | 92         |
| 4.7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....   | 93         |
| 4.7.1 Solução ótima do modelo de programação linear.....   | 93         |
| 4.8 CONCLUSÕES.....  | 101        |
| <b>5 REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>102</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A transferência da gestão, do setor público para o privado, dos Perímetros Irrigados tornou-se uma estratégia bastante difundida, objetivando melhorar o processo de gestão, aumentando dessa forma a participação dos irrigantes nas tomadas de decisões administrativas, possibilitando teoricamente um desempenho mais satisfatório dos Perímetros Irrigados devido o envolvimento mais efetivo dos mesmos. Com a sanção da Lei 10.204 de 2001, que altera a Lei no 4.229, de 1º de junho de 1963, autoriza a doação de bens e dá outras providências, o Governo brasileiro estabeleceu um prazo de cinco anos para que houvesse a transferência definitiva das ações do Estado para as organizações de irrigantes ou para outras entidades de direito privado como forma de melhorar administrativamente o desempenho dessas estruturas de produção.

O processo de autogestão tem sido limitado pela carência de fortalecimento do capital humano e social das Organizações que atuam nos perímetros irrigados, problemas relacionados à infraestrutura física, inadimplência dos irrigantes aos Distritos de Irrigação e instituições de crédito, não apropriação do processo de autogestão, a falta de regularização fundiária e outorga do uso da água, entre outros.

A gestão dos perímetros é complexa e gera diversos custos de funcionamento (energia, salários, manutenção de rotina) e investimento (renovação periódica dos equipamentos), que a gerência do Distrito de Irrigação tem que assumir para garantir a perenidade de sua atividade. Os perímetros mais antigos, ainda hoje, por motivos de sucateamento na infraestrutura de canais de uso comum e parcelar utilizam formas de cobrança de água que não levam em consideração a quantidade de água consumida, mas a área do irrigante, proporcionando, em nível de parcela irrigada um grande desperdício de água. A falta de uma organização administrativa e operacional nos Perímetros Irrigados ainda dificulta o processo de autogestão dos projetos de irrigação.

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.

A programação linear (PL) é a técnica de otimização que mais se desenvolveu e uma das mais utilizadas no gerenciamento de recursos hídricos. Em áreas irrigadas, onde várias culturas apresentam diferentes necessidades hídricas e competição por uma quantidade limitada de água, uma das maneiras de se escolher uma lâmina adequada economicamente viável é a utilização de técnicas que auxiliem na tomada de decisão, portanto, a programação linear é uma excelente alternativa para a alocação ótima desses recursos. A utilização da PL pode proporcionar aumento na receita líquida total por unidade de volume de água aplicada quando o volume de água disponível é limitado à produção, fazendo com que a água economizada seja utilizada para aumentar a área irrigada. Isso torna mais economicamente racional o uso da água, influenciando na melhoria de indicadores ambientais de autogestão como a produtividade da água e outros relacionados à utilização direta e indireta dos recursos hídrico para fins agrícolas.

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. 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.

O setor de irrigação no Brasil já dispõe de indicadores utilizados pelo Tribunal de Contas da União do Brasil 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. A utilização desses indicadores torna-se fundamental para análise do desempenho dos perímetros irrigados ao longo do tempo, podendo demonstrar os potenciais impactos econômicos, sociais e ambientais dos vários cenários políticos sobre a agricultura irrigada a partir de um ponto de vista público. Portanto, os indicadores devem ser considerados como critérios públicos em que as decisões políticas podem ser baseadas.

Diante dos aspectos mencionados, a pesquisa foi dividida em dois temas: O primeiro abordou o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de desempenho de Perímetros Irrigados a partir da criação de um modelo estatístico Discriminante Multivariado e de uma Rede Neural Artificial utilizando os indicadores de desempenho dos perímetros públicos irrigados do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) e da Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e Parnaíba (Codevasf) como forma de avaliar a perspectiva da autogestão dos mesmos. O segundo tratou da otimização do uso da água, tendo sido realizado um estudo de caso na Fazenda Experimental Vale do Curu, pertencente à Universidade Federal do Ceará, em área contígua ao Perímetro Irrigado Curu Pentecoste.



## **2 HIPÓTESE E OBJETIVOS**

### **2.1 Hipótese**

A Estatística Multivariada, a técnica de Redes Neurais Artificiais e a modelagem matemática, nortearão a alocação de recursos no processo de tomada de decisão voltada à autogestão e uso racional da água em perímetros irrigados.

### **2.2 Objetivos**

#### **2.2.1 Objetivo geral**

Caracterizar o estágio atual dos Perímetros Irrigados Públicos Federais com vistas ao processo de autogestão e apresentar alternativa de alocar a distribuição de água em canais secundários de irrigação.

#### **2.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar os principais indicadores de desempenho disponíveis que interferem diretamente na autogestão de um perímetro irrigado;
- Classificar e separar em grupos distintos os perímetros que apresentam os melhores desempenhos, identificando os mais próximos da autogestão;
- Criar uma Rede Neural Artificial que identifique padrões de autogestão dos perímetros estudados, como forma de avaliar seu desempenho com o passar do tempo; e
- Elaborar modelo matemático de programação linear para otimizar as vazões liberadas em canais de distribuição de água.

### **3 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE AUTOGESTÃO DE PERÍMETROS PÚBLICOS IRRIGADOS FEDERAIS NO BRASIL**

#### **3.1 PERÍMETROS IRRIGADOS**

A transferência da gestão dos perímetros irrigados tornou-se uma estratégia ampla na Ásia, África e América Latina. Em mais de 25 países os governos estão reduzindo seus papéis na gestão dos projetos de irrigação. (VERMILLION, 2001).

Os primeiros esforços para transferência de gestão dos perímetros irrigados de governo para as organizações de agricultores ocorreu nos Estados Unidos da America (EUA), França, Colômbia, e Taiwan a partir da década de 1950 até a década de 1970. (VERMILLION, 2001).

A transferência de gestão tornou-se uma estratégia nacional, principalmente em países em desenvolvimento, apenas em 1980 e década de 1990, Chile, Peru, México, Brasil, República Dominicana, Colômbia, Haiti, Senegal, Maurítânia, Nigéria, Zimbábwe, Tanzânia, Sudão, Somália, Madagascar, Turquia, Paquistão, Índia, Sri Lanka, Bangladesh, Vietnã, China, Indonésia, e Filipinas estão entre os países que implementam a transferência de programas nacionais de gestão dos perímetros irrigados. Dada a 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).

A maioria dos relatórios sobre impactos são qualitativos e difíceis de validar. Mais de uma centena de documentos foram preparados para Conferência Internacional sobre Irrigação e Transferência de Gestão, realizada em Wuhan, China em setembro de 1994, mas apenas 25 continham dados sobre resultados de desempenho de transferência de gestão. A maioria desses trabalhos apresentavam apenas os dados sobre o desempenho após a transferência, usando no máximo, duas ou três medidas de desempenho. (TURRAL 1995).

Segundo Uysal e Atis (2010), a transferência da gestão da irrigação (TGI) tem sido mais adotada em países industrializados como os EUA, Austrália, Nova

Zelândia e alguns países do sul da Europa. Também foi aprovada em muitos países em desenvolvimento na América Latina, Ásia e África.

Segundo Meinzen-Dick e Raju (2002), uma combinação de deficiências da gestão do Estado nos projetos de irrigação e os sérios problemas fiscais voltados ao setor de irrigação tem contribuído para a adoção de políticas de retirada do poder público da administração dos projetos de irrigação em muitos países.

Kamara et al. (2002) confirmam a redução da presença do Estado na irrigação e a transferência da gestão para entidades de produtores rurais ou comunidades agrícolas na África do Sul. Isso tornou-se um fenômeno generalizado, em resposta ao baixo desempenho da irrigação e restrições ao financiamento público. Segundo os mesmos autores, o princípio subjacente à autogestão é o de incentivar os agricultores e comunidades locais a assumir a responsabilidade pela gestão dos recursos locais e, assim, limitar as intervenções externas para o fornecimento de informações e serviços de apoio institucional. 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 TGI mais bem sucedidos (SHAH et al., 2002).

Como ponto de partida, a Conferência Internacional promovida pela FAO e *International Network on Participatory Irrigation Management* - INPIM em 2001 define a Transferência de Gestão na Irrigação como a transferência de responsabilidade e da autoridade sobre a gestão de um sistema de irrigação público das agências governamentais para associações de usuários da água ou outras entidades do setor privado. (DIÓGENES, 2008).

Consideram-se como questões chave para ocorrência do processo de transferência da gestão de irrigação, os seguintes aspectos:

- Mobilização para apoio à transferência;
- Políticas de transferência e legislação de suporte;
- Mudanças organizacionais;
- Processo de implementação;
- Distribuição de água, manutenção e modernização da infraestrutura;
- Financiamento para o setor de irrigação.

No Brasil o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) e a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba (Codevasf)

foram as instituições utilizadas para desenvolver os Perímetros Irrigados que surgiram com a Lei nº 4.504 de 1964. A necessidade de criação dessas complexas estruturas técnicas administrativas surgiu da vontade de controlar a degradação ambiental e fornecer um modelo baseado na propriedade familiar, tendo como ponto de apoio o pequeno produtor. (Codevasf, 2011).

Segundo Costa et al. (2011), somente 15 anos após o surgimento da Lei que criou o Perímetro Irrigado, foi sancionado pelo Presidente da República, em 25 de junho de 1979, a Lei 6.662, mais conhecida como Lei de Irrigação, que dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação. Em seu capítulo III, Art. 8º, § 1º, define Projeto Público como aquele cuja infraestrutura de irrigação de uso comum é projetada, implantada e operada, direta ou indiretamente, sob a responsabilidade do Poder Público. De 1984 a 2007 seguiu a regulamentação da Lei de Irrigação.

O Estado até a década de 80 era responsável por algumas obras e ações dentro dos perímetros. Com as alterações na legislação, foi iniciada a emancipação dos perímetros públicos de irrigação, com a inclusão da transferência dos serviços do Poder Público ao setor privado. (BRASIL. DECRETO Nº 89.496, 2010).

Segundo Dourado et. al. (2006), o Programa de Emancipação dos Perímetros de Irrigação da CODEVASF foi concebido com o fim de promover o profundo e institucionalizado envolvimento dos usuários na administração, operação e manutenção da infraestrutura de irrigação de uso comum dos perímetros. A ideia central do programa era criar e habilitar, técnica e gerencialmente, associações de usuários para assumirem, com responsabilidade e segurança, o papel desempenhado pelo poder público na administração dos perímetros. Ficando estabelecidas três etapas para emancipação dos perímetros irrigados: Cogestão, Autogestão e Emancipação.

O modelo adotado no Brasil 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 na primeira experiência, adotou-se outro modelo de gestão, com alguma das características da experiência anterior, porém o modelo era voltado à administração coletiva, sendo os participantes organizados sob a forma de associação civil de direito privado sem fins lucrativos. 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”.

Com a sanção da Lei 10.204 (BRASIL, 2001), o Governo estabeleceu um prazo de cinco anos para que o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (Dnocs) concluísse a implantação do Programa de Emancipação dos Perímetros Irrigados (Proema), com a transferência definitiva das ações do Estado para as organizações de irrigantes ou para outras entidades de direito privado. (ALBUQUERQUE, 2008).

De acordo com o Plano Plurianual para o quadriênio 2004-2007 (BRASIL, 2003), ficou estabelecido que as atividades do Programa Irrigação e Drenagem passarão a ser desenvolvidas por meio de dois novos programas: Programa de Desenvolvimento da Agricultura Irrigada e Programa de Transferência da Gestão dos Perímetros Públicos de Irrigação. O segundo tem por objetivo transferir os perímetros públicos de irrigação à autogestão pelos usuários.

Ainda hoje, por motivos de infraestrutura os perímetros mais antigos, utilizam métodos de irrigação não pressurizados, ocasionando, ao nível de lote agrícola, um grande desperdício de água pela carência de informação técnica. Segundo Chistofidis (2002), cerca de 18% das terras cultivadas no mundo são irrigadas, e aproximadamente 56% desse total é irrigado por superfície. Segundo Censo Agropecuário (2006) observou-se uma área irrigada no Brasil de 4,45 milhões de hectares, correspondendo apenas a 7,4% da área agricultável, registrando um incremento de 42%, em relação ao último censo.

O cálculo da tarifa de água cobrada nos Perímetros Públicos do DNOCS é feito com base nas tarifas denominadas  $K_1$  e  $K_2$ . A primeira é baseada na recuperação dos investimentos feitos pela União na construção do Perímetro. Essa parcela é resultado da divisão entre o valor do investimento total (sem juros) pela área irrigada no período de 50 anos ( $R\$ \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). A segunda baseia-se nos custos operacionais relativos à infraestrutura de uso comum e ao consumo de água do Perímetro. O cálculo é efetuado somando-se as despesas totais de administração, operação e manutenção da infraestrutura de irrigação e drenagem de uso comum do sistema, dividido pela quantidade de água a ser consumida pelas culturas. A parcela do  $K_2$  subdivide-se em duas:

- **$K_{2.1}$** : é a parte que corresponde aos custos fixos, ou seja, independente do volume de água distribuído, repartidos por hectare, relativo aos custos com

pessoal, veículo, operação e manutenção da infraestrutura e despesas administrativas.

- **K<sub>2,2</sub>**: depende do volume fornecido, é uma despesa variável, baseando-se no consumo a ser bombeado na rede coletiva de distribuição. É calculado em relação ao consumo de água fornecido.

O desgaste dos equipamentos hidráulicos de medição de água relacionados aos Perímetros Irrigados mais antigos tais como calhas Parshall e vertedouros construídos nos próprios canais, impede que a tarifa mensal de água denominada K<sub>2</sub> seja cobrada efetivamente pela quantidade de água utilizada pelo irrigante, fazendo com que a tarifa seja cobrada apenas pelo tamanho da área, ocasionado desperdício muito maior. Entretanto, há uma forte tendência de conversão do método para pressurizado de baixa pressão. Essa modificação já é prevista no novo projeto de Lei para irrigação, relacionando a utilização de sistemas de irrigação mais eficientes que melhorem a economia de água e energia.

### **3.2 SUSTENTABILIDADE E DESEMPENHO NA AGRICULTURA IRRIGADA**

A sustentabilidade agrícola não tem um único significado. Em qualquer caso, como explicado por Hansen (1996), há um amplo consenso científico em considerar a sustentabilidade da agricultura como a capacidade dos sistemas agrícolas para satisfazer as diferentes demandas conforme a evolução da consciência social, ambiental e econômica da sociedade no tempo.

É importante ressaltar que esta definição de sustentabilidade tem várias dificuldades que limitam sua utilização empírica no mundo real. Primeiro, há a necessidade de lidar com a natureza temporal da sustentabilidade. De fato, este significado de sustentabilidade, que está relacionado com a manutenção da capacidade de produção, tem pouco valor prático, devido à inviabilidade da realização de experimentos de longa duração. Em segundo lugar, temos que lidar com a dificuldade de identificar as demandas que devem ser satisfeitas pelo setor agrícola.

A sustentabilidade pode ser interpretada como um conceito social que pode ser modificado em resposta às exigências da sociedade. Assim, o conceito de

sustentabilidade deve ser considerado como sendo específico para o tempo e lugar. Estas dificuldades têm limitado a utilização desse conceito como critério para orientar o desenvolvimento agrícola. (GÓMEZ-LIMÓN et al., 2009).

A fim de evitar as dificuldades mencionadas acima, um amplo consenso a respeito da sustentabilidade emergiu, incorporando três dimensões principais: ambiental, econômica e social (YUNLONG; SMIT, 1994). Assim, pode-se supor que um sistema agrícola é sustentável quando há vantagens e desvantagens entre os objetivos propostos para a avaliação pública de seu desempenho; objetivos econômicos, como o crescimento da renda ou da estabilidade macroeconômica, os objetivos sociais, tais como a equidade ou a cobertura de necessidades básicas, e os objetivos ecológicos, tais como a proteção dos ecossistemas ou recursos de regeneração natural, atingem valores aceitáveis para a sociedade como um todo (HEDIGER, 1999; STOORVOGEL et al., 2004). Essa aproximação com a sustentabilidade agrícola permite que seja usado um critério operacional, usando um conjunto de indicadores que abrange as três dimensões acima mencionadas.

A quantificação da sustentabilidade agrícola através de um conjunto de indicadores ainda tem algumas deficiências. O principal inconveniente vem da dificuldade de interpretar o conjunto completo de indicadores. A fim de evitar esse problema, tem sido sugerido que a análise da sustentabilidade agrícola possa ser avaliada através da agregação dos múltiplos indicadores em um único índice ou indicador composto. Esta abordagem tem sido utilizada por Andreoli e Tellarini (2000), Pirazzoli e Castellini (2000), Sands e Podmore (2000), Rigby et al. (2001), Van Calker et al. (2006) e Qiu et al. (2007).

A agregação de indicadores para a avaliação da sustentabilidade agrícola como feito anteriormente tem sido frequentemente criticada devido à subjetividade dos métodos empregados (as escolhas de uma forma única funcional para agregação e apenas uma técnica para estabelecer uma ponderação da importância relativa de cada indicador, os quais faltam à base teórica necessária) e a falta de comensurabilidade das informações. Ambos os tipos de problemas sugerem que a construção de indicadores compostos para a avaliação da sustentabilidade agrícola ainda está numa fase inicial, e novos desenvolvimentos são, de fato necessário. (GÓMEZ-LIMÓN et al., 2009).

Riesgo e Gómez-Limón (2006) mencionam 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 relatam que os indicadores devem ser considerados como critérios públicos em que as decisões políticas podem ser baseadas.

A seleção de propostas, bem como a maneira pela qual elas são calculadas, é baseada nas diretrizes publicadas pela Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico). (OCDE, 2001). (Tabela 1)

Tabela 1- Indicadores para a análise de longo prazo.

| Área em análise   | Indicadores                                 | Unidades de medida                    |
|-------------------|---|---------------------------------------|
| Impacto econômico | Lucro dos agricultores (margem bruta total) | € ha <sup>-1</sup>                    |
|                   | Subsídios públicos                          | € ha <sup>-1</sup>                    |
|                   | Receitas públicas devido a tarifas de água  | € ha <sup>-1</sup>                    |
| Impacto social    | Trabalho total                              | Dia pessoa ha <sup>-1</sup>           |
|                   | Emprego trabalho sazonal                    | %                                     |
| Impacto ambiental | Diversidade genética                        | Nº de culturas                        |
|                   | Cobertura do solo                           | %                                     |
|                   | Uso da água                                 | m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>       |
|                   | Balanço de nitrogênio                       | kg N ha <sup>-1</sup>                 |
|                   | Risco dos pesticidas                        | 10 <sup>3</sup> PR ha <sup>-1</sup>   |
|                   | Balanço de energia                          | 10 <sup>6</sup> kcal ha <sup>-1</sup> |

**Fonte:** Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE, 2001.

Segundo Gómez-Limón et al. (2009), os indicadores acima são apresentados como "equações de contabilidade" em modelos de simulação. Na verdade, estes indicadores são de interesse para os formuladores de políticas (objetivos públicos), mas eles geralmente não são levados em conta pelos agricultores no seu processo de decisão (que não constituem objetivos particulares).

A interpretação de cada indicador é explicada abaixo:

**a. Os indicadores econômicos:**

**A margem total bruta:** As receitas dos agricultores podem ser medidas em termos de margem bruta obtida pelas atividades agropecuárias. O uso deste indicador permite a



viabilidade financeira da irrigação a ser analisada. Assim, nenhuma atividade será considerada como economicamente sustentável se repetidamente produz um resultado financeiro negativo.

**Os subsídios públicos:** Este indicador mede a proteção recebida por atividades agrícolas. Ele é usado para analisar a forma como os subsídios diretos recebidos pela agricultura seriam afetados.

**Receitas públicas:** Este indicador calcula a receita obtida pelo Estado através de tarifas de água, permitindo assim que o nível de recuperação de custos para a prestação dos serviços públicos.

**b. Os indicadores sociais:**

**Total de trabalho:** O nível de emprego mostra a importância social do setor agrícola como fonte de renda para a população rural, a distribuição da renda.

**A sazonalidade do emprego:** A procura de trabalho agrícola está sujeito a variações sazonais que dependem da composição de culturas cultivadas e as operações necessárias por cada cultura ao longo do seu ciclo. Durante certos períodos, como a colheita, há picos de emprego agrícola, trabalho sazonal e geralmente trabalhadores são recrutados. Portanto, esse indicador analisa como o emprego agrícola é distribuído ao longo do ano, dadas as implicações sociais envolvidos (a mobilidade relativa da população, os fluxos migratórios, etc.). Nesse caso particular esse indicador é medido como a percentagem de procura de emprego durante os períodos críticos do ano agrícola, ou seja, meses com exigências de trabalho acima da média.

**c. Indicadores ambientais:**

**Diversidade genética:** Este indicador mostra o número de culturas diferentes na área cultivada, permitindo que o nível de biodiversidade agrícola a ser medido.

**Cobertura do solo:** cobertura vegetal é importante para solos agrícolas, devido à problemas causados pela erosão do solo. O indicador de cobertura do solo representa a percentagem de dias de um ano em que a vegetação protege o solo.

**Uso da água:** uso da água é quantificada em termos da quantidade de água necessária por área cultivada, medida em termos absolutos por hectare irrigado.

**Balanco de nitrogênio:** o nitrogênio em excesso pode ser prejudicial ao meio ambiente, especialmente da qualidade da água. Nesta análise, o balanço de nitrogênio é usado como um indicador que calcula a diferença física (excesso / falta) entre o teor de insumos aplicados (fertilizantes) e saídas (colheitas). A diferença dá o balanço de nitrogênio liberado para o ambiente (ar, solo e água).

**Balanco de energia:** O balanço energético é calculado usando o mesmo cálculo do balanço de nitrogênio. Adicionando a energia contido nos insumos agrícolas (sementes, fertilizantes, etc) e consumido em atividades agrícolas (máquinas, combustíveis, etc) nos dá a energia total contida nos insumos.

**Risco dos pesticidas:** Este indicador fornece informações sobre os produtos tóxicos lançados para o ambiente por meio de pesticidas. A quantidade de toxinas é estimada em termos de biomassa de organismos vivos que foram mortos por estes pesticidas.

No Brasil alguns trabalhos mostram de forma pontual a avaliação de perímetros irrigados por meio de indicadores de desempenho. Entretanto, sua abordagem é desconexa, não sendo possível uma avaliação de forma quantitativa e contínua do comportamento dos indicadores de forma a demonstrar o desempenho dos vários perímetros irrigados no país. Outra dificuldade recorrente na avaliação dessas áreas irrigadas diz respeito à falta de informação ano após ano da situação econômica, ambiental e social desses locais, tornando mais difícil a avaliação comparativa entre os perímetros irrigados e a sua perspectiva de autogestão voltada a sustentabilidade na sua essência.

Segundo Oliveira et al. (2004) os indicadores para perímetros irrigados podem ser divididos em:

- Indicadores de performance do serviço de operação e manutenção;

- Indicadores de performance da atividade agrícola; e
- Indicadores socioeconômicos.

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

### **3.3 ANÁLISE MULTIVARIADA**

A análise multivariada permite estudar e evidenciar as ligações, as semelhanças e diferenças existentes entre todas as variáveis envolvidas no processo (PREARO et al., 2010). Segundo Steiner (1995), a necessidade de entender a relação entre diversas variáveis aleatórias faz da análise multivariada uma metodologia com grande potencial de uso.

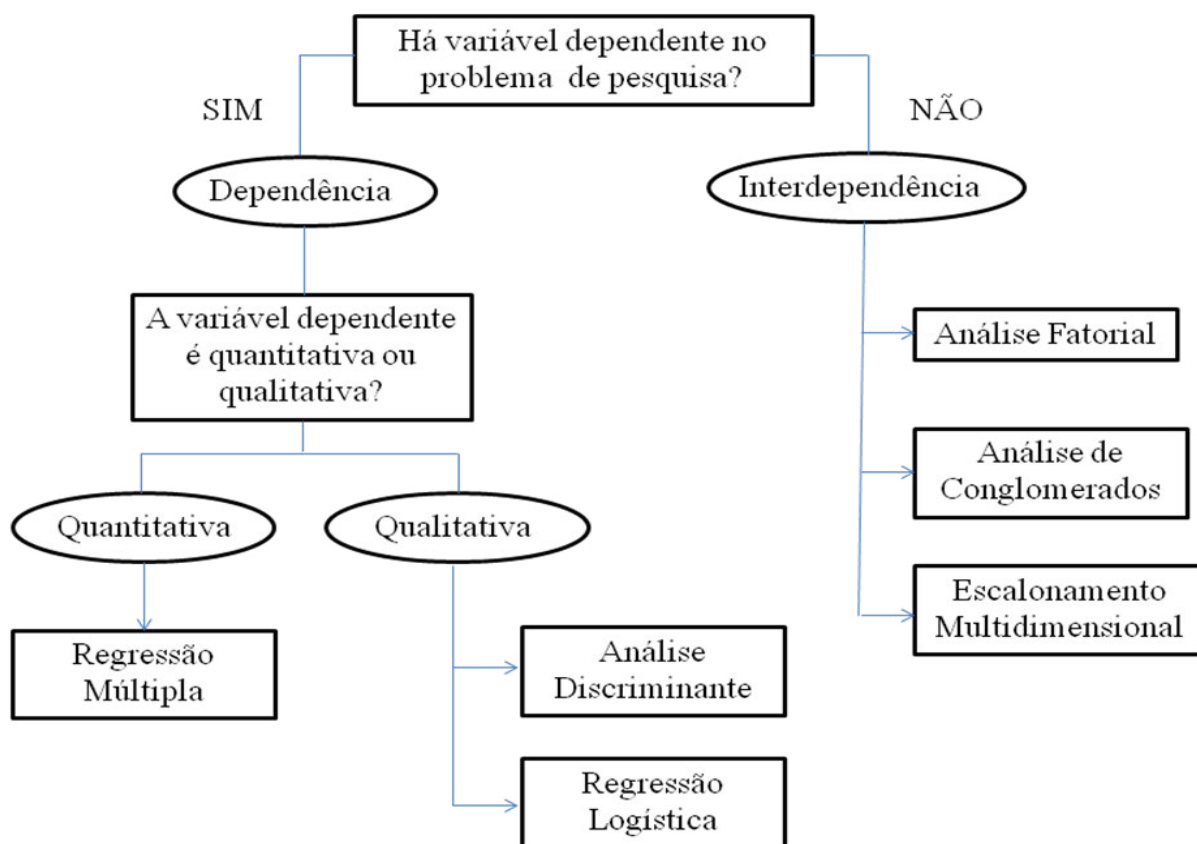
Para Lourenço e Matias (2001), por um lado, as técnicas estatísticas multivariadas são mais complexas do que aquelas da estatística univariada. Por outro lado, apesar de uma razoável complexidade teórica fundamentada na matemática, as técnicas multivariadas, por permitirem o tratamento de diversas variáveis ao mesmo tempo, podem oferecer ao pesquisador um material bastante robusto para a análise dos dados da pesquisa. Conforme Hair et al. (2005), a análise multivariada auxilia na formulação de questões relativamente complexas de forma específica e precisa, possibilitando a condução de pesquisas teoricamente significativas.

A escolha dos métodos e tipos de análises empregadas nos trabalhos científicos deve ser determinada pelo problema de pesquisa. Segundo Corrar et al. (2007), existem várias técnicas de estatística multivariada:

- Regressão Múltipla;
- Análise Discriminante;
- Regressão Logística;
- Análise Fatorial;

- Análise de Conglomerados; e
- Escalonamento Multidimensional.

Para a escolha do método faz-se necessário observar os seguintes questionamentos:



Fonte: CORRAR et al., 2009.

### 3.3.1 Análise Discriminante

A Análise Discriminante, também denominada Análise do Fator Discriminante ou Análise Discriminante Canônica, foi originalmente desenvolvida na

Botânica, e sua aplicação teve como objetivo fazer a distinção de grupos de plantas com base no tamanho e no tipo de folhas, para que, posteriormente, fosse possível classificar as novas espécies encontradas. Em 1936, Fischer foi o responsável pelo desenvolvimento da análise para dois grupos. (PREARO et al., 2010).

Entretanto, a aplicação da Análise Discriminante logo se generalizou a outras áreas do conhecimento sempre em situações em que é possível encontrar grupos de indivíduos e conhecer quais as características que os distinguem uns dos outros. Sobre os objetivos de aplicação, a Análise Discriminante enquadra-se na categoria de investigação da dependência entre as variáveis e na categoria predição. Não obstante aos objetivos fundamentais da técnica, Garson (2011) registra outros propósitos da técnica utilizados na produção científica:

- Determinar o modo mais parcimonioso de distinguir entre grupos;
- Avaliar a importância relativa das variáveis independentes;
- Descartar variáveis que têm pouco poder de distinção entre os grupos.

### **3.2 Premissas da técnica estatística de análise discriminante**

#### ➤ Sensibilidade ao tamanho da amostra

Aliado a um correto procedimento de amostragem, o tamanho da amostra (número de casos, indivíduos, observações, entrevistas) deve ser adequado para permitir a generalização dos resultados, os quais podem ser verificados quanto à significância estatística dos testes. As facilidades oferecidas pela maioria dos pacotes computacionais de aplicação estatística podem comprometer a observância do tamanho mínimo da amostra pelo pesquisador, fato esse que pode causar uma série de problemas importantes.

Para Hair et al. (2005), essa omissão pode resultar em:

- Baixíssimo poder estatístico dos testes de significância;
- Um ajuste muito adequado dos dados, tornando os resultados artificialmente bons.

### ➤ Homocedasticidade

Diz-se que, quando a variância dos termos de erro ( $e$ ) parece constante ao longo do domínio da variável preditora, tem-se homoscedasticidade (HAIR et al., 2005). Esta é uma propriedade fundamental que deve ser garantida, sob pena de invalidar toda a análise estatística. Espera-se que os erros sejam aleatórios e, se isto não ocorre, há heteroscedasticidade. Significa dizer que há chances de ocorrerem erros grandes (ou pequenos). Há tendências nos erros. Por exemplo: se, na avaliação de imóveis residenciais, a equação obtida indica erros maiores para os imóveis mais caros, progressivamente (quanto maior o imóvel, maior o erro), não há variância constante. A homoscedasticidade pode inicialmente ser verificada por meio de gráficos de resíduos (erros). Os gráficos dos erros contra os valores reais e contra os valores calculados pela equação são importantes. Se os pontos estão distribuídos aleatoriamente, sem demonstrar um comportamento definido, há homoscedasticidade. Mas se existe alguma tendência, então há heteroscedasticidade. Havendo heteroscedasticidade, podem ser tentadas transformações nas variáveis (geralmente transformações logarítmicas) ou outras soluções mais complexas.

A literatura consultada apresenta uma série de testes estatísticos para avaliação da homoscedasticidade, entre eles (Hair et al., 2005; Garson, 2011): Teste de Goldfeld-Quandt; Teste de Park; Teste de Breusch-Pagan-Godfrey; Teste de White's; Teste de Levene para Homogeneidade das Variâncias; Teste de Bartlett's para Homogeneidade das Variâncias; Teste F-max; Teste Box's M.

### ➤ Linearidade

Conforme Hair et al. (2005), de forma geral, os modelos lineares preveem valores que se ajustam a uma linha reta, que tem uma mudança com unidade constante da variável dependente em relação a uma mudança constante na variável independente.

A inspeção simples de gráficos, como o diagrama de dispersão (scatterplot), por exemplo, é um método simples e comum para a verificação de linearidade. Além disso, a análise de correlação e outros testes mais complexos são disponíveis para a detecção dessa premissa.

Ainda sobre a linearidade das relações, Eisenbeis (1997) e Huberty (1994) admitem o relaxamento dessa premissa quando a normalidade multivariada é atendida e quando a amostra é razoavelmente grande.

#### ➤ Normalidade multivariada

Nas técnicas de análise multivariada que se utilizam de variáveis métricas e testes estatísticos, a normalidade multivariada é a condição mais fundamental de aplicação.

A distribuição normal multivariada tem a forma de sinos tridimensionais simétricos quando o eixo de  $\underline{x}$  apresentar os valores de uma determinada variável; o eixo  $\underline{y}$  apresentar a contagem para cada valor da variável de  $x$ ; e o eixo de  $z$  apresentar os valores de qualquer outra variável em consideração.

Entretanto, Johnson e Wichern (1998) alertam que, para dados reais, a presença de variáveis com distribuição normal multivariada exata dificilmente ocorre. Nesse sentido, a densidade normal é frequentemente uma aproximação útil à verdadeira distribuição da população.

Para Sharma (1996), há poucos métodos disponíveis para testar a normalidade multivariada.

O índice de Mardia parece ser o teste para normalidade multivariada mais disponível para os usuários de pacotes estatísticos. Baseado nas funções de Skewness e Kurtosis, o índice de Mardia só é disponível no pacote estatístico LISREL e no pacote estatístico EQS. Valores menores que três, dessa estatística, sugerem a normalidade multivariada.

#### ➤ Multicolinearidade

Segundo Gujarati (2000), o termo multicolinearidade foi cunhado por Ragnar Frish, em 1934. Originalmente, significa a existência de uma “perfeita” (ou exata) relação linear entre algumas ou todas as variáveis explicativas de um modelo de regressão.

Formalmente, o termo multicolinearidade refere-se à existência de mais de uma relação linear exata, ao passo que o termo colinearidade refere-se à existência de uma única relação linear.

Algumas sugestões para tratamento de multicolinearidade, a partir da leitura de Tabachnick e Fidell (1996), Gujarati (2000), Pestana e Gageiro (2000), Hair et al (2005), Garson (2011):

- Ignorar, se o objetivo é prever;
- Eliminar variáveis;
- Reformular o modelo, usando, por exemplo, a razão entre variáveis;
- Aumentar o tamanho da amostra.

A literatura consultada apresenta uma série de testes estatísticos para avaliação da multicolinearidade, entre eles (HAIR et al., 2005; GARSON, 2011): Measure of Sampling Adequacy (MSA), Kaiser-Meyer-Olkin KMO), Variance inflation factor (VIF), Índice de condição e Índice de tolerância

#### ➤ Influência de dados extremos univariados e multivariados

As observações atípicas ou extremas (*outliers*) são aquelas substancialmente diferentes das outras. Podem ser identificadas no nível univariado, bivariado ou multivariado.

Segundo Hair et al. (2005) e Garson (2011), alguns fatores podem causar a presença de observações atípicas univariadas nos dados coletados, alterando o resultado de análise e também causando violações de normalidade:

- Erro de entrada de dados ou na codificação;
- Evento extraordinário: o pesquisador deve decidir se mantém ou não o dado extremo na análise;
- Observações extraordinárias para os quais o pesquisador não tem explicação;
- Observações que representam uma combinação única de valores das variáveis: o pesquisador deve manter o dado a menos que haja evidência específica para desconsiderá-lo.



Sobre os *outliers* multivariados, esses são casos com valores extremos no conjunto de múltiplas variáveis e são operacionalmente definidos por meio de três medidas mais comumente usadas e disponíveis na maioria dos pacotes estatísticos comerciais: Distância de Cook, Distância de Mahalanobis e Distância de Leverage.

### 3.4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A rede neural artificial é uma técnica de Inteligência Artificial (IA) que tenta simular o funcionamento do cérebro humano, de uma maneira simplificada. Ela é capaz de reconhecer padrões, extrair regularidades e detectar relações subjacentes em um conjunto de dados aparentemente desconexos. Além disso, ela apresenta habilidade de lidar com dados ruidosos, incompletos ou imprecisos, e de prever sistemas não lineares, o que torna a sua aplicação no mercado financeiro bastante eficiente.

As redes neurais são formadas por neurônios e conexões entre eles. O neurônio representa uma região onde informações são processadas. Seus três elementos básicos são: os pesos sinápticos, a função de soma e a função de transferência.

As conexões entre os neurônios, denominadas pesos sinápticos, são responsáveis pelo armazenamento das informações. Além disso, elas definem o efeito que a saída de um neurônio exerce sobre a entrada do neurônio seguinte. Os pesos sinápticos são de grande importância para uma rede neural, pois determinam toda a manipulação de valores da rede. (ALVES, 2001).

A função de soma processa os estímulos ponderados pelos respectivos pesos, ou seja:

$$Y_j = \sum_j^n X_i W_{ij} \quad (1)$$

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.

Já a função de transferência, também chamada de função de ativação, limita a amplitude do intervalo do sinal de saída do neurônio para algum valor finito, geralmente no intervalo normalizado  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$ .

Dentre as principais funções de ativação utilizadas, os tipos básicos são:

- a) **Função Degrau:** É o tipo mais simples de função de ativação. Sua resposta pode assumir dois valores: 0 ou 1, como demonstrado a seguir:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases}$$

- b) b) Função Linear. Um exemplo de função linear pode ser descrito como:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq \frac{1}{2} \\ x, & -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \\ 0, & x \leq -\frac{1}{2} \end{cases}$$

Onde  $(-\frac{1}{2}$  e  $\frac{1}{2})$  é o intervalo que define a saída linear e 0 e 1 são os limites mínimo e máximo da função.

- c) Função Sigmóide. Esta função assume valores em um intervalo contínuo entre 0 e 1. Sua fórmula é dada por:

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

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

Além dos três elementos básicos já citados, o neurônio pode ainda apresentar bias que tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação. (HAYKIN, 2001). O termo bias age como um peso extra nas conexões das unidades cuja entrada é sempre um (FAUSETT, 1994).

Usualmente as redes neurais apresentam três níveis de camadas de neurônios:

- a) **uma camada de entrada:** onde os padrões são apresentados à rede;
- b) **uma camada de saída:** onde o resultado é apresentado;
- c) **camadas intermediárias ou ocultas:** onde é feita a maior parte do processamento, através das conexões ponderadas. Elas situam-se entre a camada de entrada e a camada de saída e podem ser consideradas como extratoras de características.

A camada de entrada, na verdade, não é formada por neurônios reais, pois eles não realizam nenhum processamento. Eles simplesmente distribuem os valores das entradas da rede para os neurônios da primeira camada oculta. Já a camada intermediária tem a função de processar a informação provinda da camada de entrada. Ela também pode ser denominada camada oculta, pois sua saída não é conhecida pelo usuário.

O tipo de conexão, número de camadas de neurônios e o tipo de treinamento são os aspectos que diferem os tipos de redes neurais. Cada um é mais adequado para determinado tipo de tarefa. Os diferentes tipos de conexões entre os neurônios de uma rede determinam a topologia (ou arquitetura) desta rede. As principais topologias de rede são descritas a seguir.

- a) **Redes alimentadas adiante (*feedforward*)** – os neurônios estão dispostos em camadas conectadas por pesos unidirecionais na direção entrada → saída, ou seja, as conexões ocorrem apenas entre camadas diferentes e subsequentes. Esta estrutura é totalmente conectada uma vez que todas as saídas dos neurônios de uma camada são conectadas com as entradas de todos os neurônios da camada seguinte.

**b) Redes recorrentes** – um neurônio pode receber entradas de qualquer outra camada da rede. Destas fazem parte as redes com realimentação nas quais os neurônios da entrada recebem sinais vindos diretamente dos neurônios da saída.

A rede neural deve ter a capacidade de generalização, ou seja, ela deve ser capaz não apenas de classificar as entradas para as quais ela recebe treinamento, mas também de generalizar e classificar entradas que não tenham sido apresentadas. Isto é possível graças a um processo de aprendizagem ao qual a rede é submetida. Esta propriedade permite que a rede encontre respostas corretas mesmo quando os dados disponíveis para as entradas estão incompletos ou danificados.

O desenvolvimento de uma rede neural ainda é um processo de tentativa e erro. A seleção da rede envolve a escolha da topologia da rede (ou arquitetura), da função de transferência e do algoritmo de aprendizagem.

## 3.5 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.5.1 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.

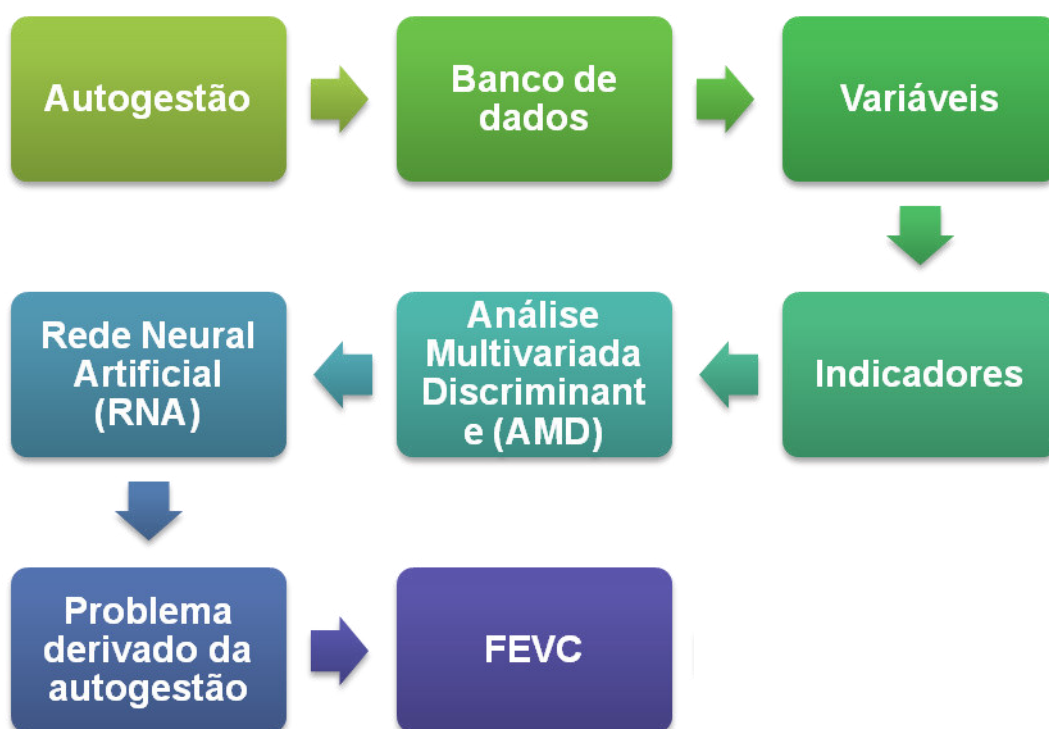
Essa técnica possibilita inicialmente identificar as variáveis mais importantes no processo discriminatório entre grupos, gerando um modelo estatístico que tem a capacidade de classificar determinados elementos em seus respectivos grupos conforme o seu padrão que reflete por meio de uma pontuação individual 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 necessário 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), parece ser 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.

É apresentado na Figura 1 o resumo da metodologia para a avaliação dos perímetros por meio das ferramentas de apoio as decisões. De acordo com a problemática gerada pela falta de gestão adequada do recurso água nos perímetros irrigados, a Fazenda Experimental Vale do Curú (FEVC) foi utilizada como estudo de caso.

Figura 1 – Metodologia resumo da aplicação das ferramentas de apoio às decisões.



Fonte: Autor (2010).

### 3.5.2 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 do Vale do São Francisco e Parnaíba (Codevasf).

### **3.5.2.1 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<sup>®</sup> versão 13.0 e o aplicativo Action para Excel<sup>®</sup>, 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-co-variância.

A Tabela 2 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 econômico, social e político. Trata-se de um processo que, para obter êxito, requer as seguintes etapas: cogestão, autogestão e emancipação.

Tabela 2 - Situação no período de 2010 da administração dos Perímetros Irrigados  
Codevasf e Dnocs.

| <b>Perímetros Irrigados</b> | <b>Administração</b> |
|-----------------------------|----------------------|
| 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             |
| Tabuleiro de Russas         | Cogestão             |
| Jaguaribe-Apodi             | Cogestão             |

Fonte: Codevasf; Dnocs. (2010)

É mostrado na Figura 2 o mapa de localização regional dos perímetros irrigados avaliados.



Figura 2 - Mapa de localização regional dos perímetros irrigados avaliados.



Fonte: Autor (2014).

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, nota 2 não aptos, portanto, ainda encontra-se no processo de cogestão.

Com o propósito de se utilizar um modelo estatístico para avaliar se um Perímetro Irrigado reúne as condições adequadas à Autogestão, foi desenvolvida uma função linear denominada de função desempenho -  $f(d)$ , sendo a mesma composta pelos indicadores mais significativos estatisticamente, onde:

$$f(d) = X_1EF + X_2IGCH + X_3CUT + X_4AD + X_5PAC + K$$

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; e

**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<sup>®</sup> 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<sup>®</sup> 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.

### **3.5.2.2 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<sup>®</sup> e Matlab R2012b como ferramenta facilitadora da criação, treinamento e teste da Rede Neural Artificial.

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

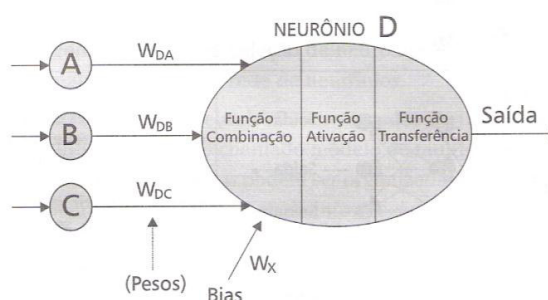
- **Learning Rate:** A taxa de aprendizado controla a taxa à qual a rede aprende. Normalmente, quanto mais alta a taxa de aprendizagem, mais rápido a rede aprende. Se a taxa de aprendizado é muito alta, a rede pode ficar instável.

- **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 3). (CORRAR et al., 2009).

Figura 3 – Elementos do processo



Fonte: CORRAR et al., 2009.

O tipo de função combinação utilizada foi à soma ponderada (Equação 1), 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.

$$Y_j = \sum_j^n X_i W_{ij} \quad (1)$$

A função ativação utilizada foi a logística ou sigmóide (Equação 2), caracterizada como uma função não linear.

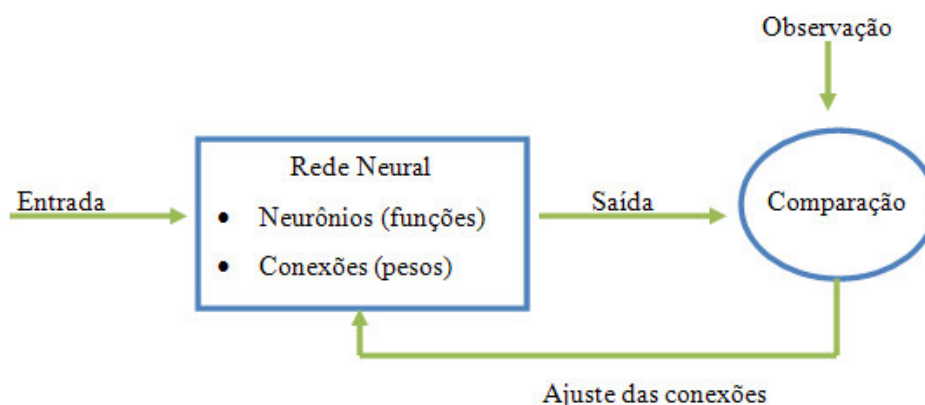
$$\text{Sigmóide}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

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 4.

Figura 4 - Processo de aprendizado da Rede Neural Artificial



Fonte: Autor (2014).

### 3.5.3 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 do Vale do São Francisco e 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<sup>3</sup>.

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 <sub>2</sub> F (R\$) | K <sub>2</sub> R (R\$) | (VAC) (mil m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------|---------------|-----------|-----------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 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                      |
| Curaçá 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                   |
| Jaíba                   | 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                   |
| Nilo 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                   |

Fontes: Codevasf; Dnocs. (2010)

### 3.5.4 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  $K_2$ ) e o custo de Operação e Manutenção (O & M) necessário à manutenção e operacionalidade do Perímetro Irrigado, conforme a expressão:

$$EF = \frac{K_2 \text{ arrecadado}}{\text{Custo O \& M}} \quad (3)$$

em que:

**EF:** indicador de eficiência financeira (R\$ R\$<sup>-1</sup>)

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

**$K_2$  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:

$$IHP = \frac{\text{Custo O \& M}}{\text{Área cultivada}} \quad (4)$$

em que:

**IHP:** indicador do custo de um hectare em produção (R\$ ha<sup>-1</sup>);

**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:

$$IVPNM = \frac{O \& M}{VBP} \quad (5)$$

em que:

**IVPNM:** percentual do valor bruto da produção necessária à operação e manutenção do perímetro (R\$ R\$<sup>-1</sup>);

**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:

$$IGCH = \frac{VBP}{AC} \quad (6)$$

em que:

**GRH:** índice de geração de receita por hectare (R\$ ha<sup>-1</sup>);

**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:

$$CUT = \frac{\text{Área irrigada}}{\text{Área entregue ao irrigante}} \quad (7)$$

em que:

**CUT:** Coeficiente de Utilização da Terra ( $\text{ha ha}^{-1}$ );

**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 ( $\text{R\$ R\$}^{-1}$ ) é dada pela relação entre a tarifa de água recebida e a tarifa de água faturada ou devida.

$$\text{Adimplência} = \frac{\text{Tarifa de água recebida}}{\text{Tarifa de água faturada ou devida}} \quad (8)$$

### **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.

$$\text{ITP} = \frac{\text{O \& M (R\$)}}{\text{VBP (R\$)}} \quad (9)$$

### **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 (volume captado). Expresso pela equação a seguir:

$$\text{PAC} = \frac{\text{VBP}}{\text{Volume de água}} \quad (10)$$

em que:

**PAC:** produtividade da água captada (R\$ m<sup>-3</sup>);

**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 m<sup>3</sup> utilizado.

### 3.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.6.1 Indicadores de desempenho

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos indicadores de desempenho para cada Perímetro Irrigado com suas respectivas unidades para o período de 2010.

Tabela 4 – Indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados.

| Perímetro de Irrigação  | EF<br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | ICHP<br>(R\$ ha <sup>-1</sup> ) | IVPNM<br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | GRH<br>(R\$ ha <sup>-1</sup> ) | PAC<br>(R\$ m <sup>-3</sup> ) | CUT<br>(ha ha <sup>-1</sup> ) | ITP<br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | Ad<br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 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                           |
| Curaçá 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                           |
| Nilo 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                       | 4.812,93                      | 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                           |

Fonte: Autor (2014).

Na Tabela 5 é apresentada a estatística resumo da situação geral dos indicadores de desempenho dos Perímetros Irrigados

Tabela 5 – Estatística resumo dos Perímetros Irrigados.

| <b>Perímetro de Irrigação</b> | <b>EF</b><br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | <b>ICHP</b><br>(R\$ ha <sup>-1</sup> ) | <b>IVPNM</b><br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | <b>GRH</b><br>(R\$ ha <sup>-1</sup> ) | <b>PAC</b><br>(R\$ m <sup>-3</sup> ) | <b>CUT</b><br>(ha ha <sup>-1</sup> ) | <b>ITP</b><br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | <b>Ad</b><br>(R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------------|---------------------------------------|--|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
| 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                                     | -                                     | -                                    | 0,9                                  | 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                                  | 338.854,59                             | 0,08                                     | 42.701.687,52                         | 7.259.700,52                         | 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                                   | 3,2                                   |
| Soma                          | 22,23                                 | 21.013,13                              | 4,57                                     | 262.482,41                            | 36.260,20                            | 20,67                                | 4,57                                   | 27,31                                 |

Fonte: Autor (2014).

Os Perímetros Irrigados Jaguaribe-Apodi e Tabuleiros Litorâneos apresentaram os melhores desempenhos quanto ao indicador Eficiência Financeira quando comparados 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.

Já o Perímetro Tabuleiros de Russas apresentou um baixo desempenho em relação ao indicador Eficiência Financeiro, certamente em razão do também baixo coeficiente de utilização da terra no momento da avaliação (24,2%). Isso favorece o desequilíbrio entre o total de irrigantes utilizando a infraestrutura de uso comum e o potencial real de utilização, acarretando um maior ônus. 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% micro-aspersão e 50% gotejamento), entretanto, a diferença no volume de água utilizado é cerca de 96,5% para o Perímetro Tabuleiros Litorâneos, isso pode ser 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<sup>-1</sup>. 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. Cultura 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 Litorâneo e Platôs de Guadalupe se destacam com os maiores níveis de adimplência.

### **3.6.2 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*.

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 |

Fonte: Autor (2010).

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.

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   |

Fonte: Autor (2010).

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

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

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

Fonte: Autor (2014).

A maioria dos indicadores apresentou correlações positivas fracas, inferiores a 0,5. Os indicadores CUT e GRH apresentaram as menores correlações, 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 10 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    |

Fonte: Autor (2014).

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.

Tabela 10 - Coeficientes que compõem a Função Discriminante Canônica.

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

Fonte: Autor (2010).

São demonstrados na Tabela 11 e Tabela 12 os centróides dos grupos e as respectivas probabilidades para a obtenção do ponto de corte (“*cut-off point*”).

Tabela 11 - Classificação dos grupos por centróide

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

Fonte: Autor (2014).

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.

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        |
| <b>Total</b>  | 1                    | 29                      | 29        |

Fonte: Autor (2014).

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 Gorutuba 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.

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 |

Fonte: Autor (2014).

### 3.6.3 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

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.

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

| Perímetros Irrigados   | Indicadores |       |       |       |       | Alvo da RNA |
|------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------------|
|                        | EF          | GRH   | PAC   | CUT   | Ad    | $f(d)$      |
| 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      |

Fonte: Autor (2014).

Para o software QwikNet V.2.23<sup>®</sup> 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. Para o software Matlab R2012b obtiveram-se os melhores resultados para a função `trainlm`, que é uma função de treinamento de rede que atualiza pesos e bias conforme a otimização de Levenberg-Marquardt.

Do total de registros (3) submetidos ao teste, todos se encaixaram no perfil aprendido pela rede (Tabela 15 e 16).

Tabela 15 – Resultado estimado pela Rede Neural na classificação dos Perímetros Irrigados (QwikNet V.2.23<sup>®</sup>).

| Perímetros Irrigados | EF (R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | IGCH (R\$ ha <sup>-1</sup> ) | PAC (R\$ m <sup>-3</sup> ) | CUT (ha ha <sup>-1</sup> ) | Ad (R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | Desempenho Perímetros $f(d)$ (entrada) | Desempenho Perímetros (saída) |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Bebedouro            | 0,97                        | 12.313,94                    | 757,06                     | 0,54                       | 0,99                        | 0,677                                  | 0,664                         |
| Boacica              | 0,22                        | 3.112,08                     | 139,42                     | 0,78                       | 0,68                        | -0,925                                 | -0,906                        |
| Curaçá I             | 0,91                        | 22.064,92                    | 2.075,84                   | 0,90                       | 0,89                        | 1,748                                  | 1,735                         |

Fonte: Autor (2014).

Tabela 16 – Resultado estimado pela Rede Neural na classificação dos Perímetros Irrigados (Matlab R2012b).

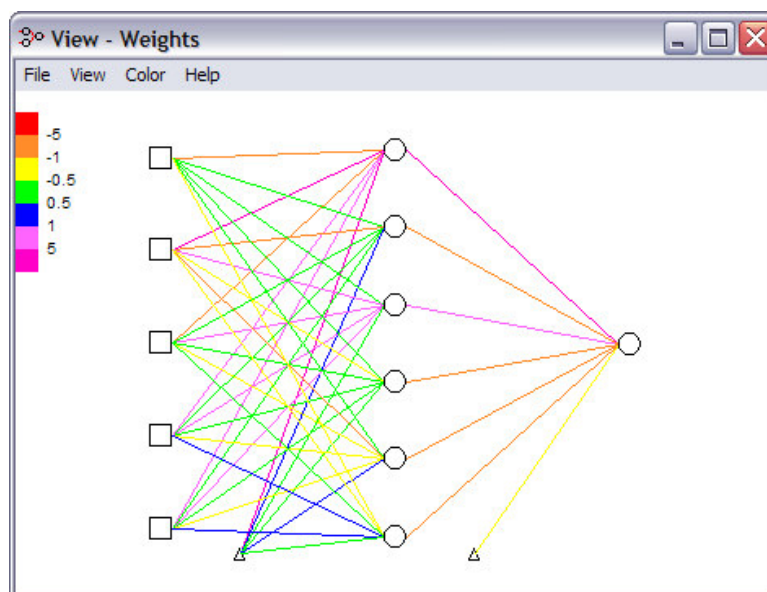
| Perímetros Irrigados | EF (R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | IGCH (R\$ ha <sup>-1</sup> ) | PAC (R\$ m <sup>-3</sup> ) | CUT (ha ha <sup>-1</sup> ) | Ad (R\$ R\$ <sup>-1</sup> ) | Desempenho Perímetros $f(d)$ (entrada) | Desempenho Perímetros (saída) |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------|
| Bebedouro            | 0,97                        | 12.313,94                    | 757,06                     | 0,54                       | 0,99                        | 0,677                                  | 0,6790                        |
| Boacica              | 0,22                        | 3.112,08                     | 139,42                     | 0,78                       | 0,68                        | -0,925                                 | -0,9243                       |
| Curaçá I             | 0,91                        | 22.064,92                    | 2.075,84                   | 0,90                       | 0,89                        | 1,748                                  | 1,7459                        |

Fonte: Autor (2014).

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 5 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.



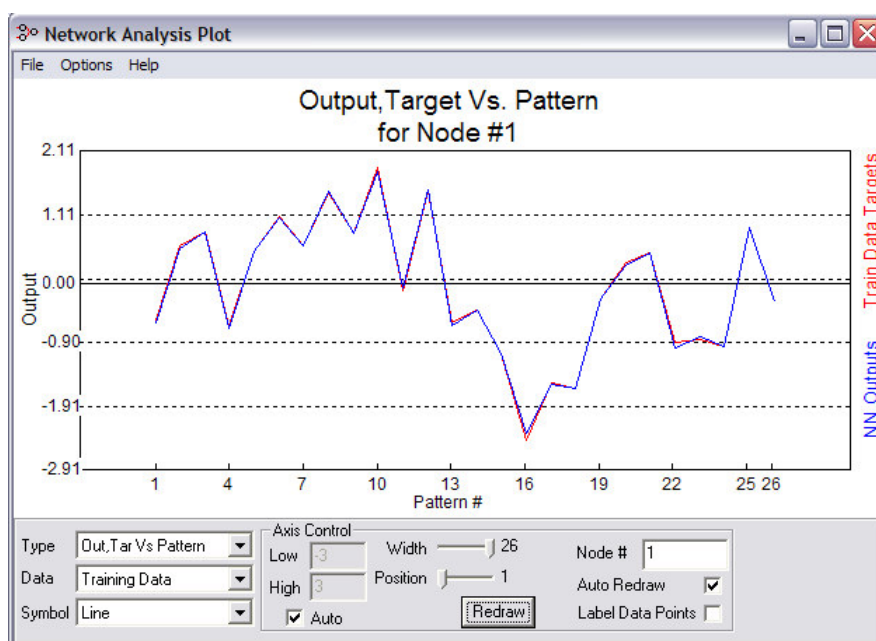
Figura 5 - Arquitetura e os pesos gerados para a Rede Neural Artificial.



Fonte: Autor (2010).

Na Figura 6 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 mesma. Praticamente as cores se sobrepõem, demonstrando, assim, um excelente resultado no treinamento.

Figura 6 – Treinamento da Rede Neural, alvo versus padrão

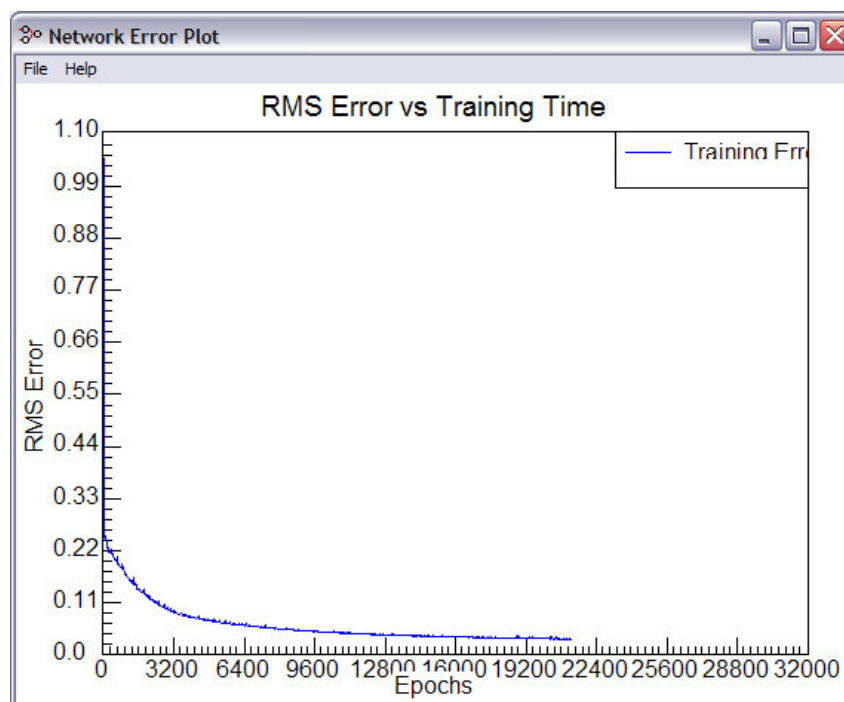


Fonte: Autor (2014).

Segundo Kenny (2009), a avaliação do treinamento pode ser medida pelas comparações entre os resultados atingidos e os valores de saída esperados. Uma avaliação rigorosa pode ser feita com uma análise de regressão linear.

Na Figura 7 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.

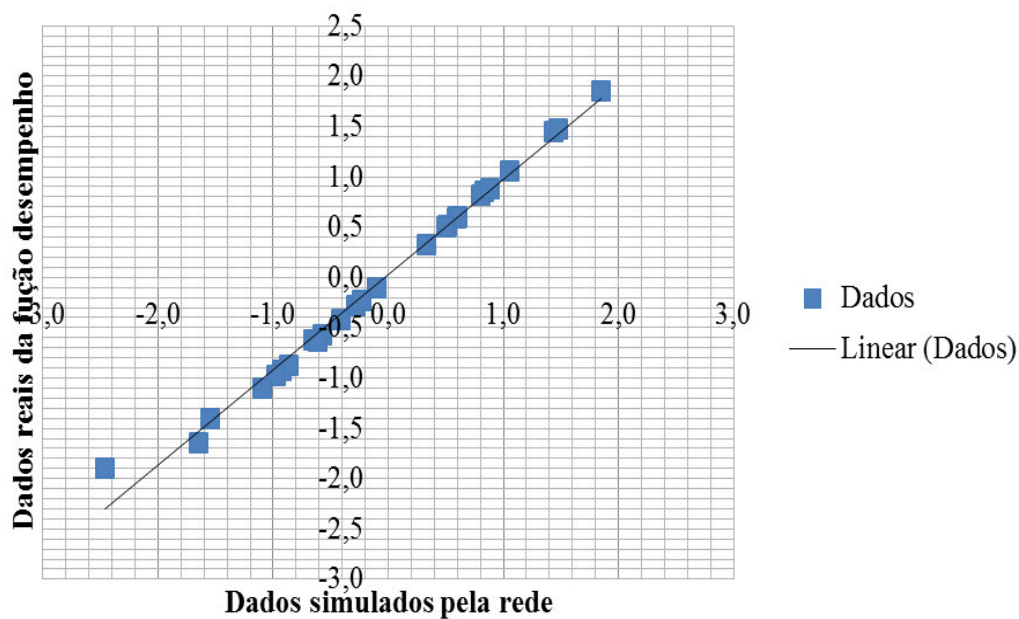
Figura 7 – Relação entre erro e treinamento da Rede Neural artificial



Fonte: Autor (2014).

A rede neural criada a partir do software Matlab R2012b apresentou, também, um excelente resultado, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Relação de dados simulados e dados reais.



Fonte: Autor (2014).

### 3.6.4 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.

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) (Tabela 15), indicando também quais as variáveis (indicadores) que influenciaram de forma contundente esse processo (Tabela 10).

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 e 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.

### 3.7 CONCLUSÕES

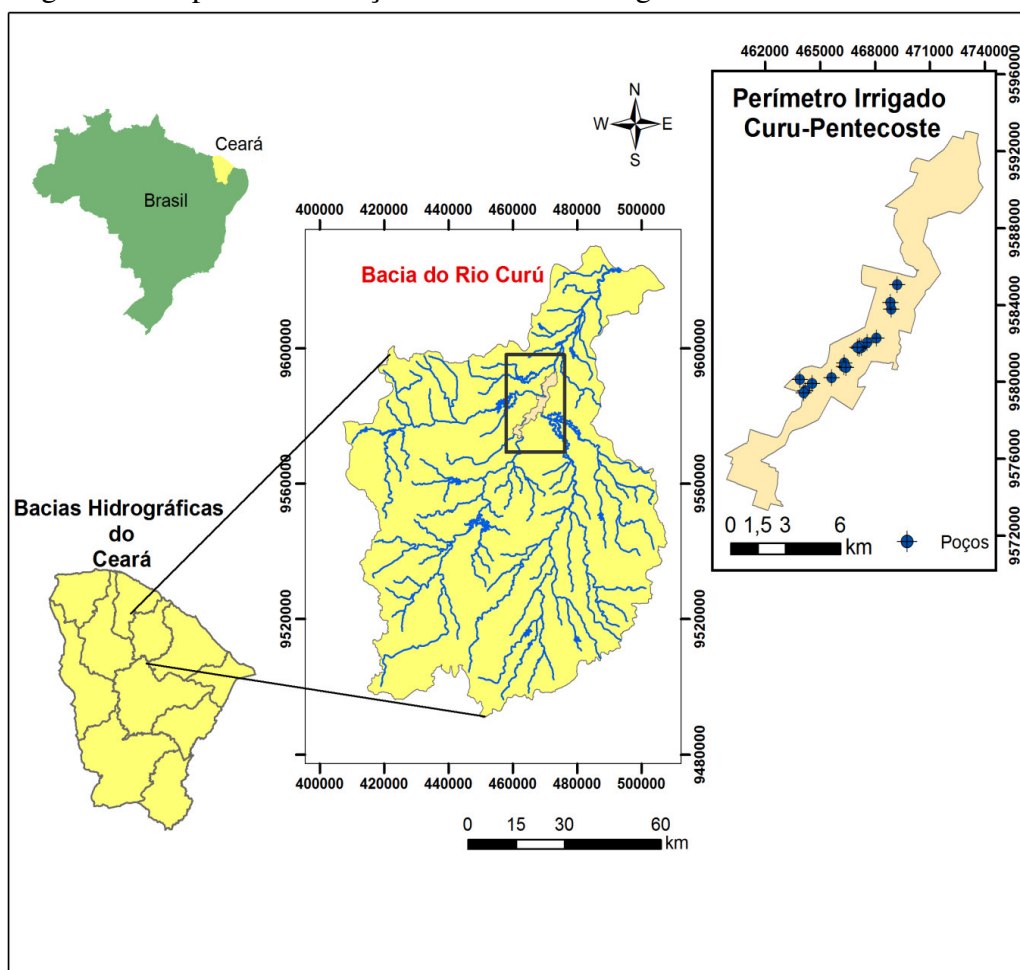
- Com base nos resultados obtidos na Análise Multivariada Discriminante, observou-se o indicador Geração de Receita por Hectare (GRH) como o mais importante no processo discriminatório entre os Perímetros Irrigados quanto a Autogestão. A ausência dos outros indicadores demonstra o grau de semelhança dessas variáveis entre os Perímetros Irrigados.
- Os Perímetros com os melhores desempenhos em relação à Autogestão foram: Nilo Coelho, Curaçá I, Pirapora e Maniçoba (Perímetros CODEVASF). Fica evidente a necessidade de se reavaliar a gestão dos Perímetros Irrigados que estão administrativamente sob a responsabilidade do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (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 à avaliação do desempenho dos Perímetros Irrigados no decorrer do tempo e como ferramenta de alocação de recursos financeiros e avaliação.

## 4 SUSTENTABILIDADE DO USO DA ÁGUA EM PERÍMETROS IRRIGADOS

### 4.1 RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO CURU

A bacia Hidrográfica do Rio Curu (Figura 9) está localizada no centro-norte do Estado do Ceará. Com suas divisas, a leste, com a bacia Metropolitana, a oeste com as bacias do Acaraú e do Litoral e ao sul com a sub-bacia do rio Banabuiú, integrante do Sistema Jaguaribe. (CEARÁ, 2009).

Figura 9 - Mapa de localização do Perímetro Irrigado Curu Pentecoste - Ceará.



Fonte: Silveira (2014)

O principal afluente da bacia do Curu é o rio Canindé, que se encontra na margem direita, e drena praticamente todo o quadrante sudeste da bacia. Pela margem

esquerda destaca-se o rio Caxitoré. O rio Curu possui uma extensão de 195 km e corre preferencialmente no sentido sudoeste-nordeste. Drena uma área de 8.750,75 km<sup>2</sup>, o equivalente a 6% do território cearense e apresenta-se como coletor principal. (CEARÁ, 2009).

Quanto à pluviometria, esta se verifica mais acentuadamente no baixo curso. A média pluviométrica para o conjunto da bacia margeia os 919,1 mm ao ano. O clima tropical quente semiárido propicia uma média térmica anual em torno dos 27°C. (CEARÁ, 2009).

A bacia caracteriza-se pelo alto nível de açudagem, chegando próximo ao nível de saturação, devido à topografia da área, apresentando Índice de Vulnerabilidade Global (IVG) de 0,38 em uma escala que varia de 0 a 1. (COGERH, 2008). Possui um total de 818 reservatórios, destes, 229 apresentam área superior a 5,0 ha. (FUNCEME, 2008), indicando problemas na área sob o ponto de vista do seu atual aproveitamento hídrico.

Na bacia do rio Curu destacam-se os açudes General Sampaio e Pentecoste, responsáveis por quase 70% do volume de acumulação da bacia. Os reservatórios com capacidade inferior a 10 milhões de m<sup>3</sup> não servem como reservas interanuais, pois, na ocorrência de anos secos consecutivos, tais reservatórios não apresentam volume para o atendimento às demandas. Entretanto, dos 13 principais reservatórios da região, oito possuem capacidade maior que 10 milhões de metros cúbicos, servindo como reservas interanuais. (CEARÁ, 2005).

Com relação às reservas subterrâneas, são dois os sistemas de aquíferos na bacia do Curu: o das rochas sedimentares (porosos e aluviais) e os das rochas cristalinas (fissurais). (CEARÁ, 2009). Segundo Cordeiro et al. (2009), existem 1.418 pontos d'água, sendo: 1.389 poços tubulares; 28 poços amazonas e uma fonte natural. Com base nos dados dos poços cadastrados que captam água dos aquíferos da bacia do Curu, tem-se que a disponibilidade efetiva instalada é de 9,21 milhões de m<sup>3</sup> ano<sup>-1</sup>.

Com relação às características de salinidade da água dos reservatórios subterrâneos (cristalino) para irrigação, as mesmas são classificadas como de salinidade alta. Em relação à análise da sodicidade para irrigação mostram que estas águas possuem baixos riscos. (CEARÁ, 2009).

As águas dos sistemas aquíferos sedimentares são de excelente qualidade química, principalmente nos aquíferos de constituição arenosa, que não contém íons



salinos em sua composição mineralógica. Quanto aos sistemas cristalino as suas águas são, geralmente, de qualidade regular. (CEARÁ, 2009).

Existe uma demanda para irrigação de  $82.879.000 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ ,  $79.650.000 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$  para atendimento aos perímetros públicos, com área total de 4.425 ha e  $3.229.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para áreas privadas, com área total de 538 ha. Já a demanda hídrica humana para esta bacia corresponde a  $9.877.000 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ . Segundo o mesmo autor, o Perímetro Irrigado Curu Pentecoste apresenta uma área de 1.068 ha e Curu Paraipaba uma área de 3.357 ha, com uma demanda respectiva de  $19,224 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$  e  $60,426 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$ . Portanto, a maior demanda de água é constituída pela irrigação. A vazão regularizada total com 90% de garantia, isto é, com os reservatórios atendendo à demanda em 90% dos meses, é de  $11,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  para essa bacia. (CEARÁ, 2009).

Segundo os últimos levantamentos realizados na bacia, verificou-se que a demanda total é da ordem de  $3,175 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e sendo a vazão regularizada de  $11,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , tem-se um superávit da ordem de  $8,355 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , considerando-se somente a oferta hídrica superficial. A disponibilidade efetiva instalada referente às águas subterrâneas equivale a  $0,292 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . (CEARÁ, 2009).

## **4.2 BASES PARA O PLANEJAMENTO VOLTADO AOS RECURSOS HÍDRICOS E A IRRIGAÇÃO**

A disponibilidade de água para a agricultura está ameaçada pela concorrência dos usos domésticos e industriais. Cerca de 70% do total do consumo de água no mundo é destinada a agricultura irrigada. Esse valor é estimado para ser ainda maior, da ordem de 90%, para muitos países em desenvolvimento. (KIJNE, 2001). A área irrigada no mundo por pessoa diminuiu de forma constante a partir de um pico de  $48 \text{ ha } 1000^{-1}$  pessoas no final de 1970 devido ao crescimento populacional superior à taxa de crescimento regional da irrigação. Por exemplo, no Paquistão, que é altamente dependente da irrigação para a produção de alimentos, foram mais de  $180 \text{ ha } 1000^{-1}$  pessoas em 1975, para 110 em 1997 e deverá diminuir para cerca de  $70 \text{ ha } 1000^{-1}$  pessoas em 2015. (KIJNE, 2001).

Em zonas áridas e semiáridas, a utilização da irrigação é essencial no aumento da produção agrícola. A oferta total de grãos voltados para alimentação em Haryana na Índia passou de 2,6 milhões de toneladas em 1967 para cerca de 13,0 milhões de toneladas em 2005, por meio do incremento da área irrigada que passou de 1,7 milhões de hectares para 5,4 milhões de ha. A agricultura irrigada deverá fornecer muito mais alimentos no futuro, usando menos água que hoje (APPELGREN, 1996; VAN DAM et al., 2006). No entanto, sem o adequado planejamento, a agricultura irrigada pode tornar-se prejudicial ao meio ambiente, podendo comprometer a sustentabilidade da técnica. Nas últimas décadas, áreas irrigadas em várias partes do mundo enfrentaram níveis crescentes de problemas com a qualidade, níveis de água e salinização do solo (AGARWAL; ROEST, 1996). A crescente escassez de água de boa qualidade dita a sustentabilidade da agricultura irrigada. O adequado planejamento voltado às políticas públicas, com relação à gestão da água, modelos e técnicas para melhorar a eficiência do uso tornam-se indispensáveis devido aos impactos ambientais causados pela atividade.

Segundo o Ministério de Meio Ambiente da Espanha (1998), muitos países da União Europeia (EU), durante as últimas décadas, amadureceram com relação à economia de água, como é o caso da própria Espanha. Esse processo de amadurecimento tem demonstrado a crescente preocupação com a escassez relativa deste recurso natural e incentivado uma intensa discussão sobre a eficiência da água e sua utilização na agricultura irrigada, que é responsável por 80% do consumo na Espanha.

De acordo com as melhores estimativas disponíveis, cerca de dois terços da demanda de alimentos complementares a partir da crescente população mundial em 2020 deverá vir do aumento da produção em terras irrigadas. (KIJNE, 2001).

O que se percebe em algumas regiões do planeta com condições ambientais, climáticas e econômicas distintas é a preocupação com a melhor forma de utilizar os seus recursos hídricos na agricultura.

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2008), a conferência “Uso da Água na Produção de Alimentos e Segurança Ambiental” realizada no final de 2000, na República Democrática do Sri Lanka, discutiu as questões específicas de utilização da água na agricultura e sua otimização. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (2011), a América do Norte já utiliza 12% de seus

recursos hídricos em irrigação, enquanto a América do Sul somente 1%. A agricultura nos Estados Unidos utiliza 71%, enquanto que no México 64%. A área irrigada nas Américas é de 48.384.878 ha, dos quais 57,7% estão nos Estados Unidos, 13,3% no México e 6,5% no Brasil.

Constata-se que a agricultura irrigada é, de longe, o maior usuário: cerca de  $\frac{3}{4}$  do total consumido são atribuídos à irrigação. Outro dado importante é que mais da metade da água consumida no Brasil é utilizada na agricultura irrigada, apesar de que o País tem só cerca de 5% de área cultivada irrigada. (PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000).

O Brasil está inserido na categoria de países com escassez econômica de água, devido apresentar regiões, onde, há má distribuição espacial e temporal de precipitações, o que implica em investimentos na construção de reservatórios para armazenamento e regularização hídrica e em construção de sistemas de condução, como forma de garantir a utilização da água no seu desenvolvimento sustentável. (INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE – IWMI, 2011).

Segundo dados do Plano Nacional de Recursos Hídricos (2006), no Brasil 69% da água consumida têm utilização na agricultura irrigada, com eficiência média de 64%, ou seja, 36% da água derivada para a irrigação no país constituem-se em perdas por condução e por distribuição nas infraestruturas hidráulicas, provocando um grande desperdício no uso da água na agricultura, quando nos referimos a utilização dessa água pelos irrigantes em suas áreas agrícolas. Diante das novas tecnologias, modernos equipamentos e profissionais especializados, o Brasil tem avançado lentamente nas questões do manejo da irrigação e do uso racional da água.

### **4.3 POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS NACIONAL E DO CEARÁ**

A sociedade mostra-se altamente angustiada com os distúrbios da natureza ocasionados por desequilíbrios ecológicos provenientes da ação antrópica. É necessário que haja uma discussão sobre os aparatos legais disponíveis para combater os desperdícios, no que se refere à utilização dos recursos hídricos.

É necessário, inicialmente, conceituar o Direito de Águas, chamado de Direito Hidráulico, para começarmos a falar sobre a legislação de recursos hídricos. Podemos definir o Direito Hidráulico como: “conjunto de princípios e normas jurídicas que disciplinam o domínio, uso, aproveitamento, a conservação e preservação das águas, assim como a defesa contra suas danosas consequências.” (POMPEU, 2004).

A estreita vinculação das normas jurídicas relativas às águas com o ciclo hidrológico, que desconhecem limites no seu percurso, faz com que o Direito de Águas contenha tanto normas tradicionalmente colocadas no campo do direito privado, como no do direito público. (POMPEU, 1985).

Segundo Senra e Vilella (2011), baseada na necessidade de dar mais atenção à questão dos recursos hídricos, o Governo Federal, no âmbito do Ministério do Meio Ambiente criou no ano de 1995 a Secretaria de Recursos Hídricos (SRH-MMA), com a responsabilidade de propor a formulação da Política Nacional dos Recursos Hídricos, bem como acompanhar e monitorar sua implementação.

Segundo os mesmos autores, diante desse contexto e depois de muita discussão por parte da sociedade e no Congresso Nacional, no ano de 1997, foi editada a Lei 9.433 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos.

A Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se nos seguintes fundamentos: a água é um bem de domínio público; a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. (BRASIL, 2011).

A PNRH apresenta vários objetivos, dentre os quais, são destacados a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Diante dos instrumentos disponíveis à prática dessa política, dois merecem destaque: a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos e a cobrança pelo uso de recursos hídricos.

Com relação ao regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos, o Art. 11 objetiva assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. De acordo com o Art. 12, estão sujeitos à outorga os seguintes usos: derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo; extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo; dentre outros. Dentre outros objetivos, a cobrança pelo uso de recursos hídricos visa incentivar a racionalização do uso da água; obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contempladas nos planos de recursos hídricos.

Segundo a Política Nacional dos Recursos Hídricos (1997), constitui infração das normas de utilização de recursos hídricos superficiais ou subterrâneos: derivar ou utilizar recursos hídricos para qualquer finalidade, sem a respectiva outorga de direito de uso; perfurar poços para extração de água subterrânea ou operá-los sem a devida autorização; fraudar as medições dos volumes de água utilizados ou declarar valores diferentes dos medidos; infringir normas estabelecidas no regulamento desta Lei e nos regulamentos administrativos, compreendendo instruções e procedimentos fixados pelos órgãos ou entidades competentes.

Segundo Senra e Vilella (2011), após a instituição do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), no ano de 2000, foi criada a Agência Nacional de Águas (ANA), que tem como finalidade implementar, em sua esfera de atribuições, a Política Nacional de Recursos Hídricos, integrando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Segundo os mesmos autores, ainda não há uma uniformidade no desenvolvimento e aplicações devidas aos instrumentos da PNRH e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos preconizados pela Lei 9.433 de 1997 em todo o território nacional. Os autores afirmam uma necessidade de adaptação da política de implantação desses instrumentos, devido à alta diversidade nacional, para que posteriormente se possa obter o perfeito gerenciamento dos recursos hídricos de forma mais sustentável.

Atualmente temos a Lei Estadual de Recursos Hídricos Nº 14.884 de 2010. A Política Estadual de Recursos Hídricos tem como elementos básicos o plano estadual dos recursos hídricos, o sistema integrado dos recursos hídricos e fundo estadual de recursos hídricos.

A Política Estadual de Recursos Hídricos tem investido no setor estruturante, realizando ações de reserva de água através da construção de açudes interanuais, e de transferências de água, sejam em canais ou adutoras, que visam assegurar o abastecimento humano e gerar desenvolvimento nas regiões do Estado, com a oferta de água para a produção na indústria e na agropecuária. (CEARÁ, 2009).

Outros documentos foram produzidos no Estado do Ceará com o intuito de realizar um diagnóstico sobre as reais condições dos recursos hídricos no mesmo, como é o caso do Pacto das Águas. A discussão do Pacto das Águas pautou-se em quatro grandes eixos temáticos considerados estratégicos: Água para Beber; Convivência com o Semiárido; Água e Desenvolvimento e Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos.

#### **4.4 POLÍTICA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO**

Diante da atual preocupação com o meio ambiente, devido à necessidade de meios de produção organizados e de técnicas administrativas voltadas ao desenvolvimento sustentável, faz-se necessário tratar das Leis que fundamentam e dão suporte às decisões tomadas por qualquer que seja o meio produtivo ou exploratório voltado ao ambiente que vivemos.

A política de irrigação foi concebida na década de 1970 e ficou bastante caracterizada pelos perímetros públicos de irrigação que tinham como finalidade a inserção de famílias de agricultores, objetivando mudanças no processo produtivo, saindo de uma agricultura tradicional para uma exploração racional dos solos e água respeitando a legislação sobre recursos hídricos, para a construção dos projetos públicos de irrigação. A Lei de Irrigação foi o marco legal dessa política, estabelecendo critérios de desapropriação de terras e consequente transformação das áreas desapropriadas em perímetros públicos de irrigação.

Segundo o Ministério da Integração Nacional (2008), a Lei constitui como disciplinamentos principais:

- Estabelece que as diretrizes da política nacional de irrigação sejam de responsabilidade do Poder Executivo Federal;

- Define o Ministério do Interior como gestor da política;
- Define os tipos de projetos;
- Regulamenta, no âmbito dos projetos públicos, o uso dos solos, da água e da infraestrutura, que é declarada de domínio público e inalienável;
- Estabelece que, nos projetos públicos, as terras sejam fracionadas em lotes que poderão ser alienados ou cedidos a irrigantes, cooperativas ou sociedades civis agrícolas;
- Estabelece que, nos projetos de interesse social, as terras devem ser divididas em lotes familiares e define as características de tais lotes;
- Define o “status” de irrigante e estabelece os seus deveres;
- Estabelece que os irrigantes devam, obrigatoriamente, ressarcir as despesas com administração, conservação, operação e manutenção da infraestrutura, bem como amortizar os investimentos realizados pelo setor público;
- Prioriza a implantação de projetos públicos em terras públicas, facultando o Presidente da República para declarar de utilidade pública as terras selecionadas para projetos e, em consequência, passíveis de desapropriação;

Em 21 de maio de 1993, foi editada a Lei n° 8.657, que acrescenta parágrafos ao artigo 27 da Lei de Irrigação.

Decorrente das várias transformações aplicadas na Lei de Irrigação, o aparato jurídico tem as seguintes características principais:

- Opta pela irrigação como forma de aproveitamento racional de solos e água;
- Enfatiza a função social da implantação de projetos de irrigação;
- Centraliza o processo de implementação dos projetos públicos de irrigação no Poder Executivo, em suas três esferas;
- Estimula a participação do setor privado muito mais de forma conceptual do que efetivamente se observa na prática, pois, na verdade funciona como um fator inibidor à atração do setor privado na conjuntura atual;
- Caracteriza como de propriedade pública as obras de infraestrutura de uso comum;
- Amortiza de forma teórica as obras por parte dos usuários, haja vista o tópico anterior;
- Não há nenhuma previsão para garantir o financiamento permanente da implantação de projetos;

- Conceitua o projeto público de irrigação muito mais voltado para a desapropriação de terras e implantação de obras, em detrimento da importante função de ente produtivo;
- Exige a presença obrigatória de lotes familiares nos projetos públicos;
- Desconhece o predomínio da irrigação privada no País, por estar defasada;
- Inexistência, como consequência do ponto anterior, de interação entre programas ligados à irrigação pública e privada.

A antiga Política Nacional de Irrigação era regulamentada pela Lei nº 6.662, de 1979, construída sob regime político, econômico e constitucional totalmente diverso do que vivemos atualmente. Desde então, houve enorme expansão da agricultura irrigada em nosso país, desenvolveram-se novas tecnologias e, talvez mais significativo, mudaram-se os entendimentos sobre as funções do Estado e do poder público e estabeleceram-se novas relações entre os entes da Federação. O fato é que o desenvolvimento da agricultura brasileira, inclusive da irrigação, nos últimos anos, decorre muito mais da iniciativa privada, da visão, vontade e determinação do próprio setor agrícola do que de políticas públicas a ela direcionadas. Complementa-se essa visão quando se observa a mudança da rota administrativa e econômica dos últimos governantes, movidos pelo sistema capitalista de economia mista.

A nova Lei (12.787 de 11 de janeiro de 2013) é composta por 45 artigos, organizados em nove capítulos. (BRASIL, 2013). A seguir são enumeradas as suas disposições básicas:

- Define como política de irrigação a geração de emprego e renda, aumento da produtividade da terra, otimização do consumo agrícola de água;
- As infraestruturas de irrigação são classificadas como de uso comum, de apoio à produção, parcelar e social. Os projetos de irrigação poderão ser mistos, privados e públicos;
- A política de irrigação deve estar integrada com as de meio ambiente, recursos hídricos e saneamento;
- Os sistemas devem preferir técnicas que economizem água;
- Postula a integração com a iniciativa privada e a gestão participativa dos projetos de irrigação;
- Prevê a participação da iniciativa privada através de concessões e parcerias;
- Define os instrumentos da política de irrigação;



- Faz obrigatória a instalação de um lote para pesquisa nos projetos públicos e mistos;
- Estabelece o prazo máximo de dez anos para a emancipação dos projetos públicos;
- Permite a transferência da propriedade da infraestrutura de uso comum, ao final do período de amortização, ao condomínio formado pelos irrigantes;
- Estabelece critérios para a seleção dos irrigantes, devendo ser levada em consideração a experiência agrícola;
- Promove o apoio à propriedade familiar para a utilização dos seus recursos hídricos; e
- Estabelece penalidades para a inadimplência do irrigante.

A Lei, de alguma forma, compatibiliza os projetos de irrigação com as novas realidades nacionais, em particular com a exigência de outorga de direito de uso de recursos hídricos e com o licenciamento ambiental. Introduce a necessidade de zelar pela utilização sustentável dos recursos naturais e confirma a bacia hidrográfica como unidade para o planejamento das ações de irrigação. Cria a possibilidade de gestão de perímetros irrigados públicos mediante concessão e parcerias público-privadas.

A Lei necessita deixar clara a regulamentação para o setor, sendo, fundamental para que os investidores privados se sintam seguros em colocar recursos nessa atividade, muitas vezes com longo prazo de maturação.

O financiamento do setor poderá continuar a depender da disposição do executivo em alocar verbas para a construção de sistemas públicos, não se prevendo formas, nem fontes concretas para financiar a implantação de projetos e, como extensão, o seu desenvolvimento agrícola. Para projetos mistos e privados não estão definidas formas objetivas que possam se converter em realidade.

Estabelecer um prazo máximo para emancipação dos projetos públicos de irrigação não pode ser encarada como uma ação definitiva sem que esteja presente um rígido estudo de viabilidade, pois ela somente deverá acontecer quando da autossuficiência financeira dos projetos, nem sempre alcançada em prazo fixo pré-determinado.

#### 4.5 OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA E CONTEXTUALIZAÇÃO

Segundo Moradi-Jalal et al. (2007), a otimização do uso da água em projetos de irrigação proporciona melhor resposta para reduzir os desperdícios de recursos hídricos nos Perímetros Irrigados. Há uma demanda sempre crescente por água para irrigação e a escassez da mesma nas regiões áridas e semiáridas, a avaliação de desempenho e operacionalização dos reservatórios são importantes e particularmente difíceis. Geralmente, a otimização das áreas irrigadas associada com a operação de reservatórios é essencial para aumentar a eficiência global de ambas as partes. O aspecto mais importante na operacionalização do sistema é a liberação da quantidade certa de água no momento adequado às áreas de irrigação para obter os maiores benefícios.

Vários autores vêm demonstrando estudos voltados à otimização do uso da água e outros insumos em Perímetros Irrigados. Paul et al. (2000) apresentaram uma abordagem estocástica para resolver um problema de programação multi-cultura e multi-nível de irrigação utilizando um esquema de decomposição DP. Singh et al. (2001) utilizaram a programação linear (PL) para determinar os padrões de cultivo, Haouari e Azaiez (2001) propuseram um modelo PL para determinar os padrões de cultivo sob déficit hídrico em regiões áridas. Teixeira e Mariño (2002) apresentaram uma metodologia de otimização de operação de reservatório acoplado a um esquema de escalonamento de irrigação para maximizar o lucro líquido em um Distrito de Irrigação. Vedula et al. (2005) apresentaram uma abordagem de modelagem conjuntiva de culturas e irrigação.

Todo problema de programação linear caracteriza-se pelo estabelecimento de relações lineares, ou seja, todas as equações envolvidas são necessariamente representadas por relações lineares entre variáveis. Um problema de programação linear pode ser abordado da seguinte forma: considere  $n$  variáveis não negativas  $X_j (j = 1, 2, 3, \dots, n)$  e uma função linear  $Z$  destas variáveis que deve ser maximizada ou minimizada.

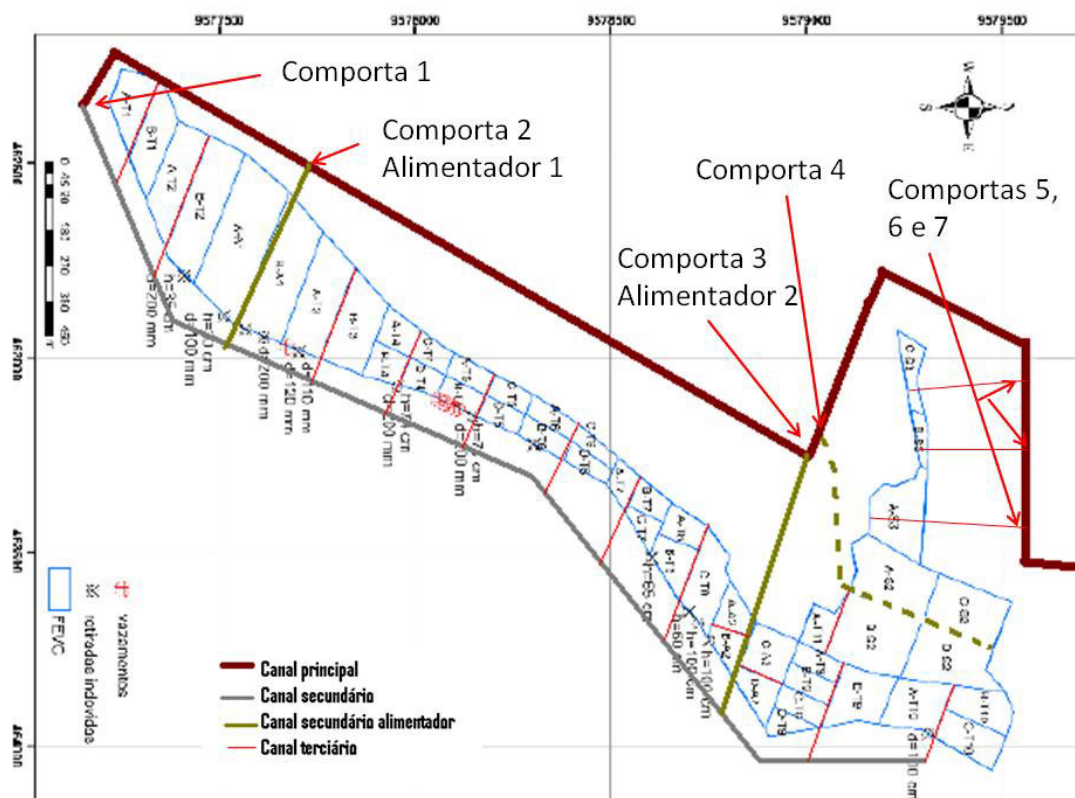
## 4.6 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.6.1 Caracterização da área

A pesquisa foi realizada na Fazenda Experimental Vale do Curu (FEVC) (Figura 10), pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, no município de Pentecoste - CE, a 110 km de Fortaleza, geograficamente localizada entre os paralelos 3° 45' e 4° 00' de latitude Sul e os meridianos 39° 15' e 39° 30' Oeste, com altitude de aproximadamente 47 metros.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, caracterizando-se como quente e seco. A precipitação média é de 806,5 mm distribuídas irregularmente, e a umidade relativa média do ar e a temperatura média mínima mensal são respectivamente, 73,8% e 21,9° C. A demanda evaporativa é de 234,0 mm mês<sup>-1</sup>.

Figura 10 – Disposição dos lotes e comportas da FEVC utilizados para modelagem matemática



Fonte: Autor (2014).

#### **4.6.2 Ferramentas para otimização do uso da água**

Foi utilizado um modelo matemático de programação linear para determinar a forma mais racional de liberar água para as áreas irrigadas, baseado na necessidade hídrica das culturas.

#### **4.6.3 Modelo matemático de programação linear**

O modelo apresenta como variável de decisão as comportas que fornecem água aos lotes da FEVC, num total de sete comportas que abastecem 45 subáreas. De acordo com a disposição das comportas, a comporta 1 (C1) não sofre influência de nenhuma outra comporta à montante, assim como as comportas 4 (C4), 5 (C5), 6 (C6) e 7 (C7). Já a comporta 2 (C2) sofre influência da comporta 1 e a 3 (C3) sofre influência das comportas 1 e 2. Essa influência entre comportas diz respeito à provável utilização de água de uma comporta pela outra quando ocorrer sobras de água em um determinado instante.

As áreas irrigadas avaliadas no estudo são apresentadas na Tabela 17, com suas respectivas áreas e influência das comportas de abastecimento hídrico no ano de 2010.

Tabela 17 – Identificação dos lotes e suas respectivas áreas associadas às comportas de abastecimento hídrico.

| <b>Comportas</b> | <b>Identificação</b> | <b>Ocupação</b> | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> |
|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| C1               | AT <sub>1</sub>      | Alecrim         | 11.410                      |
| C1               | BT <sub>1</sub>      | Girassol        | 15.000                      |
| C1               | AT <sub>2</sub>      | Girassol        | 21.102                      |
| C1               | BT <sub>2</sub>      | Bananeira       | 27.867                      |
| C1               | AA <sub>1</sub>      | Alecrim         | 46.229                      |
| C1/C2            | BA1                  | Alecrim         | 40.210                      |
| C1/C2            | AT <sub>3</sub>      | Alecrim         | 29.807                      |
| C1/C2            | BT <sub>3</sub>      | Alecrim         | 23.426                      |
| C1/C2            | AT <sub>4</sub>      | Coqueiro        | 9.567                       |
| C1/C2            | BT <sub>4</sub>      | Goiabeira       | 6.540                       |
| C1/C2            | CT <sub>4</sub>      | Mangueira       | 6.842                       |
| C1/C2            | DT <sub>4</sub>      | Goiabeira       | 5.180                       |
| C1/C2            | AT <sub>5</sub>      | Mangueira       | 7.609                       |
| C1/C2            | BT <sub>5</sub>      | Goiabeira       | 5.529                       |

Fonte: Autor (2014).

Tabela 17 – Identificação dos lotes e suas respectivas áreas associadas às comportas de abastecimento hídrico.

| <b>Comportas</b> | <b>Identificação</b> | <b>Ocupação</b> | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> |
|------------------|----------------------|-----------------|-----------------------------|
| C1/C2            | CT5                  | Feijoeiro       | 5.305                       |
| C1/C2            | DT5                  | Bananeira       | 4.720                       |
| C1/C2            | AT6                  | Feijoeiro       | 5.375                       |
| C1/C2            | BT6                  | Bananeira       | 5.667                       |
| C1/C2            | CT6                  | Feijoeiro       | 3.547                       |
| C1/C2            | DT6                  | Feijoeiro       | 6.000                       |
| C1/C2            | AT7                  | Feijoeiro       | 7.622                       |
| C1/C2            | BT7                  | Feijoeiro       | 5.412                       |
| C1/C2            | CT7                  | Capim           | 6.400                       |
| C1/C2            | AT8                  | Capim           | 8.762                       |
| C1/C2            | BT8                  | Cunhã           | 7.500                       |
| C1/C2            | CT8                  | Capim           | 14.685                      |
| C1/C2/C3         | AA2                  | Capim           | 6.947                       |
| C1/C2/C3         | BA2                  | Capim           | 6.947                       |
| C1/C2/C3         | CA2                  | Capim           | 12.842                      |
| C1/C2/C3         | DA2                  | Capim           | 8.920                       |
| C1/C2/C3         | AT9                  | Capim           | 5.508                       |
| C1/C2/C3         | BT9                  | Capim           | 8.608                       |
| C1/C2/C3         | CT9                  | Capim           | 8.007                       |
| C1/C2/C3         | DT9                  | Capim           | 5.305                       |
| C1/C2/C3         | ET9                  | Capim           | 16.825                      |
| C1/C2/C3         | AT10                 | Capim           | 15.744                      |
| C1/C2/C3         | BT10                 | Capim           | 10.822                      |
| C1/C2/C3         | CT10                 | Capim           | 11.494                      |
| C4               | AT11                 | Capim           | 4.870                       |
| C4               | BS2                  | Capim           | 31.124                      |
| C4               | DS2                  | Capim           | 21.746                      |
| C5               | AS3                  | Coqueiro        | 25.057                      |
| C6               | BS3                  | Coqueiro        | 4.007                       |
| C7               | CS3                  | Coqueiro        | 4.455                       |

Fonte: Autor (2014).

#### 4.6.3.1 Procedimento da coleta de dados para o modelo de otimização do uso das comportas de abastecimento hídrico

A coleta das informações necessárias para a construção do modelo matemático de otimização do uso das comportas na FEVC foi baseada em informações de origem primária e secundária. Por meio de levantamentos primários foram

quantificadas as subáreas de cultivo, as culturas estabelecidas e as informações hidráulicas relativas aos canais e comportas, além de informações sobre o desempenho da irrigação. Quanto ao levantamento de dados secundários foram coletadas séries históricas de precipitação e evapotranspiração de referência, características físicas do solo e informações sobre os coeficientes de cultivo.

#### 4.6.3.2 Plano de ocupação

O plano de ocupação foi realizado com base nas culturas já instaladas nas subáreas que compõem o plano sistematizado da FEVC (Tabelas 18 e 19).

Tabela 18 – Plano de ocupação anual das subáreas da FEVC.

| <b>Mês</b> | <b>Alecrim<br/>pimenta</b> | <b>Girassol</b> | <b>Bananeira</b> | <b>Coqueiro</b> | <b>Goiabeira</b> |
|------------|----------------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Jan        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Fev        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Mar        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Abr        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Mai        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Jun        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Jul        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Ago        | xx                         | xx              | xx               | xx              | xx               |
| Set        | xx                         | xx              | xx               | xx              | xx               |
| Out        | xx                         | xx              | xx               | xx              | xx               |
| Nov        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |
| Dez        | xx                         |                 | xx               | xx              | xx               |

Fonte: Autor (2014).

Tabela 19 – Plano de ocupação anual das subáreas da FEVC.

| <b>Mês</b> | <b>Mangueira</b> | <b>Feijão</b> | <b>Cunhã</b> | <b>Capim elefante</b> |
|------------|------------------|---------------|--------------|-----------------------|
| Jan        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Fev        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Mar        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Abr        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Mai        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Jun        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Jul        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Ago        | XX               | XX            | XX           | XX                    |
| Set        | XX               | XX            | XX           | XX                    |
| Out        | XX               | XX            | XX           | XX                    |
| Nov        | XX               |               | XX           | XX                    |
| Dez        | XX               |               | XX           | XX                    |

Fonte: Autor (2014).

#### 4.6.3.3 Necessidades hídricas das culturas

Para calcular o requerimento mensal de água pelas culturas perenes considerou-se a necessidade mensal durante o período de franca produção, estabelecendo-se o seguinte procedimento:

- Evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ): Os dados de entrada para o cálculo de  $ET_o$  foram obtidos de uma série histórica na FEVC relativa ao período 1970–1998 (Tabela 20).



Tabela 20 - Evapotranspiração de referência, em  $\text{mm dia}^{-1}$ , obtida pelo método de Penman Monteith / FAO (1991), para a FEVC no período de 1970 a 1998.

| <b>Mês</b> | <b>ET<sub>o</sub> (PM)<br/>mm dia<sup>-1</sup></b> |
|------------|--|
| Janeiro    | 6,15   |
| Fevereiro  | 5,33   |
| Março      | 4,14   |
| Abril      | 4,14   |
| Mai        | 4,28   |
| Junho      | 4,61   |
| Julho      | 5,21   |
| Agosto     | 6,85   |
| Setembro   | 7,83   |
| Outubro    | 7,97   |
| Novembro   | 7,77   |
| Dezembro   | 7,27   |

Fonte: Castro et al. (2007).

- Coeficientes das culturas ( $K_c$ ) (Tabela 21): Nas culturas perenes utilizou-se um  $K_c$  no estágio de pleno desenvolvimento e para culturas de ciclo curto utilizou-se um  $K_c$  para cada estágio de desenvolvimento.

Tabela 21 – Coeficiente de cultivo das culturas instaladas na área de estudo.

| <b>Culturas</b> | <b>Coeficiente de cultivo<br/>(<math>K_c</math>)</b> |      |      | <b>Referências</b>    |
|-----------------|--|------|------|-----------------------|
| Feijão          | 0,75   | 1,20 | 0,70 | Allen et al. (1998)   |
| Girassol        | 0,39   | 1,05 | 0,77 | Acosta (2009)         |
| Banana          |  | 1,20 |      | Allen et al. (1998)   |
| Goiabeira       |  | 0,63 |      | Ferreira (2004)       |
| Coqueiro        |  | 1,00 |      | Allen et al. (1998)   |
| Mangueira       |  | 0,71 |      | Azevedo et al. (2003) |
| Capim elefante  |  | 1,25 |      | Allen et. al. (1998)  |
| Cunha*          |  | 1,20 |      | Allen et. al. (1998)  |
| Alecrim-pimenta | 0,98   | 1,20 | 1,52 | Allen et. al. (1998)  |

\*Utilizou-se o coeficiente da alfafa como alternativa ao da cunha.

Fonte: Autor (2014).

- Evapotranspiração da cultura (ETc): Foi obtida através da expressão  $ETc = ETo \times Kc$ .

- Precipitação efetiva (Pe): Calculada conforme a expressão:

$$Pe = \frac{(125 - 0,2P_m)P_m}{125}, \text{ sendo } P_m \text{ a precipitação média.}$$

- Necessidade de Irrigação (NI): Calculada conforme a expressão:

$$NI = ETm - Pe$$

- Requerimento mensal de irrigação ou lâmina bruta (Lb) – Calculada através da

expressão:  $Lb = \frac{NI}{Ea}$

Onde:

Ea - Eficiência de aplicação.

Na Tabela 22 são apresentados os valores relativos aos requerimentos mensais de irrigação ou lâminas brutas (mm) das culturas instaladas nas áreas de estudo.

Tabela 22 - Requerimento mensal de água ou lâminas brutas (mm) para as culturas instaladas na área de estudo.

| <b>CULTURAS</b> |               |                 |               |                  |                 |                  |                       |              |                        |
|-----------------|---------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| <b>Meses</b>    | <b>Feijão</b> | <b>Girassol</b> | <b>Banana</b> | <b>Goiabeira</b> | <b>Coqueiro</b> | <b>Mangueira</b> | <b>Capim elefante</b> | <b>Cunhã</b> | <b>Alecrim pimenta</b> |
| Janeiro         | 0             | 0               | 307,62        | 97,292           | 233,82          | 126,81           | 232,91                | 307,62       | 226,44                 |
| Fevereiro       | 0             | 0               | 160,83        | 0,000            | 101,14          | 14,58            | 125,54                | 160,83       | 160,83                 |
| Março           | 0             | 0               | 29,80         | 0,000            | 0,00            | 0,00             | 30,45                 | 29,80        | 111,93                 |
| Abril           | 0             | 0               | 43,38         | 0,000            | 0,00            | 0,00             | 39,86                 | 43,38        | 0,00                   |
| Maiο            | 0             | 0               | 151,66        | 0,000            | 98,59           | 21,63            | 117,80                | 151,66       | 151,66                 |
| Junho           | 0             | 0               | 245,50        | 87,837           | 190,18          | 109,96           | 185,23                | 245,50       | 334,01                 |
| Julho           | 0             | 0               | 325,65        | 141,524          | 261,04          | 167,37           | 244,14                | 325,65       | 254,58                 |
| Agosto          | 310,18        | 157,29          | 501,30        | 259,22           | 416,36          | 293,19           | 373,24                | 501,30       | 501,30                 |
| Setembro        | 557,99        | 487,52          | 557,99        | 290,20           | 464,03          | 327,78           | 415,34                | 557,99       | 708,32                 |
| Outubro         | 340,92        | 375,51          | 587,99        | 306,33           | 489,16          | 345,86           | 437,64                | 587,99       | 479,28                 |
| Novembro        | 0             | 0               | 554,46        | 288,73           | 461,22          | 326,02           | 412,69                | 554,46       | 554,46                 |
| Dezembro        | 0             | 0               | 503,29        | 246,37           | 413,14          | 282,43           | 375,59                | 503,29       | 647,53                 |

Fonte: Autor (2014).

#### 4.6.4 Modelo matemático

A técnica analítica utilizada neste trabalho foi a programação linear, por ser um procedimento amplamente empregado para a solução de problemas referentes à otimização do uso de recursos. Em termos gerais, a formulação do modelo básico de programação linear, quando se deseja otimizar uma função objetivo, consiste em determinar os valores que devem adquirir as variáveis  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , não negativas, e que satisfaçam às condições de linearidade (HILLIER; LIEBERMAN, 1988), ou seja:

Função objetivo:

$$\text{MIN } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq b_i$$

Sendo:

Z - função objetivo que define o resultado a otimizar;

$X_j$  - nível ótimo da atividade j ( $j = 1, 2, \dots, n$ );

$C_j$  - coeficientes técnicos que se supõem constantes, e que indicam a quantidade de cada variável de decisão;

$a_{ij}$  - coeficientes técnicos que se supõem constantes, e que indicam as quantidades utilizadas dos recursos i ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), por unidade da atividade j;

$b_i$  - parâmetro do modelo que representa a quantidade do recurso i, disponível para as n atividades ( $b_i \geq 0$ ).

#### 4.6.4.1 Descrição do modelo

O modelo de programação linear proposto consistiu de uma função-objetivo de minimização, sujeita às restrições do uso da água baseada nas necessidades hídricas das culturas já instaladas no local durante o período de irrigação com disponibilidade para irrigação por subárea de 24 horas por semana (dois dias consecutivos com jornada de trabalho diária de 12 horas) e da disponibilidade de água de cada comporta (Tabela 23). O modelo é descrito abaixo:

$$\text{MIN } Z = C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7$$

Sendo:

MIN Z – Minimização da liberação de água pelas comportas por dia;

C1 – Comporta 1

C2 – Comporta 2

C3 – Comporta 3

C4 – Comporta 4

C5 – Comporta 5

C6 – Comporta 6

C7 – Comporta 7

Tabela 23 – Características hidráulicas das comportas da FEVC.

| Características Hidráulicas | Entradas de água |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | 1                | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
| Diâmetro (m)                | 0,15             | 0,15  | 0,15  | 0,15  | 0,15  | 0,1   | 0,1   |
| Carga (m)                   | 1,03             | 0,92  | 0,98  | 0,96  | 0,93  | 0,85  | 0,96  |
| Vazões (L s <sup>-1</sup> ) | 77,81            | 73,54 | 75,90 | 75,12 | 73,94 | 31,42 | 33,39 |

Fonte: Autor (2014).

As variáveis da função – objetivo representam o volume de água liberado pelas comportas conforme as necessidades hídricas de cada lote.

Função Objetivo:  $MIN Z = C1+C2+C3+C4+C5+C6+C7$

### 1. Demanda hídrica mensal

DEM JUL)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 6.453,82 \text{ m}^3$

DEM AGO)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 12.168,69 \text{ m}^3$

DEM SET)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 16.285,36 \text{ m}^3$

DEM OUT)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 13.590,70 \text{ m}^3$

DEM NOV)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 12.282,96 \text{ m}^3$

DEM DEZ)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 12.577,32 \text{ m}^3$

DEM JAN)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 5.897,44 \text{ m}^3$

DEM FEV)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 4.168,04 \text{ m}^3$

### 2. Oferta hídrica mensal

OFERTA1)  $C1+C2+C3 \leq 19.634,53 \text{ m}^3$

OFERTA2)  $C1 \leq 6.722,95 \text{ m}^3$

OFERTA3)  $C2 \leq 6.353,83 \text{ m}^3$

OFERTA4)  $C3 \leq 6.557,75 \text{ m}^3$

OFERTA5)  $C1+C2 \leq 13.076,78 \text{ m}^3$

OFERTA6)  $C4 \leq 6.490,48 \text{ m}^3$

OFERTA7)  $C5 \leq 6.388,27 \text{ m}^3$

OFERTA8)  $C6 \leq 2.714,37 \text{ m}^3$

OFERTA9)  $C7 \leq 2.884,66 \text{ m}^3$

### 3. Necessidade hídrica mensal

A1 JUL1)  $C1 \Rightarrow 1.583,24 \text{ m}^3$

A1 AGO1)  $C1 \Rightarrow 3.236,15 \text{ m}^3$

A1 SET1)  $C1 \Rightarrow 4.931,79 \text{ m}^3$

A1 OUT1)  $C1 \Rightarrow 3.837,81 \text{ m}^3$

A1 NOV1)  $C1 \Rightarrow 3.160,64$

A1 DEZ1)  $C1 \Rightarrow 3.423,21 \text{ m}^3$

A1JAN1) C1=> 1.441,63 m<sup>3</sup>

A1FEV1) C1=> 916,80 m<sup>3</sup>

A2JUL1) C1+C2=> 4.533,75 m<sup>3</sup>

A2JUL2) C2=>2.950,51 m<sup>3</sup>

A2AGO1) C1+C2=> 9.233,34 m<sup>3</sup>

A2AGO2) C2=>5.997,18 m<sup>3</sup>

A2SET1) C1+C2=> 13.018,87 m<sup>3</sup>

A2SET2) C2<=>8.087,08 m<sup>3</sup>

A2OUT1) C1+C2=> 10.148,85 m<sup>3</sup>

A2OUT2) C2=>6.311,04 m<sup>3</sup>

A2NOV1) C1+C2=> 9.037,29 m<sup>3</sup>

A2NOV2) C2=>5.876,65 m<sup>3</sup>

A2DEZ1) C1+C2=> 9.623,44 m<sup>3</sup>

A2DEZ2) C2=>6.200,22 m<sup>3</sup>

A2JAN1) C1+C2=> 4.065,71 m<sup>3</sup>

A2JAN2) C2=>2.624,08 m<sup>3</sup>

A2FEV1) C1+C2=> 2.438,84 m<sup>3</sup>

A2FEV2) C2=>1.522,04 m<sup>3</sup>

A3JUL1) C1+C2+C3=> 5.114,09 m<sup>3</sup>

A3JUL2) C3=> 580,34 m<sup>3</sup>

A3AGO1) C1+C2 +C3=> 10.120,55 m<sup>3</sup>

A3AGO2) C3=> 887,21 m<sup>3</sup>

A3SET1) C1+C2 +C3=> 14.006,16 m<sup>3</sup>

A3SET2) C3=> 987,29 m<sup>3</sup>

A3OUT1) C1+C2+C3=> 11.189,14 m<sup>3</sup>

A3OUT2) C3=> 1.040,30 m<sup>3</sup>

A3NOV1) C1+C2+C3=> 10.018,29 m<sup>3</sup>

A3NOV2) C3=> 981,00 m<sup>3</sup>

A3DEZ1) C1+C2+C3=> 10.516,24 m<sup>3</sup>

A3DEZ2) C3=> 892,81 m<sup>3</sup>



A3JAN1)  $C1+C2+C3 \Rightarrow 4.619,35 \text{ m}^3$

A3JAN2)  $C3 \Rightarrow 553,64 \text{ m}^3$

A3FEV1)  $C1+C2 +C3 \Rightarrow 3.479,14 \text{ m}^3$

A3FEV2)  $C3 \Rightarrow 1.040,30 \text{ m}^3$

A5JUL)  $C4 \geq 939,78 \text{ m}^3$

A5AGO)  $C4 \geq 1.436,71 \text{ m}^3$

A5SET)  $C4 \geq 1.598,78 \text{ m}^3$

A5OUT)  $C4 \geq 1.684,62 \text{ m}^3$

A5NOV)  $C4 \geq 1.588,59 \text{ m}^3$

A5DEZ)  $C4 \geq 1.445,78 \text{ m}^3$

A5JAN)  $C4 \geq 896,54 \text{ m}^3$

A5FEV)  $C4 \geq 483,24 \text{ m}^3$

A6JUL)  $C5 \geq 436,06 \text{ m}^3$

A6AGO)  $C5 \geq 695,51 \text{ m}^3$

A6SET)  $C5 \geq 775,14 \text{ m}^3$

A6OUT)  $C5 \geq 817,13 \text{ m}^3$

A6NOV)  $C5 \geq 770,45 \text{ m}^3$

A6DEZ)  $C5 \geq 690,14 \text{ m}^3$

A6JAN)  $C5 \geq 390,59 \text{ m}^3$

A6FEV)  $C5 \geq 168,94 \text{ m}^3$

A7JUL)  $C6 \geq 69,73 \text{ m}^3$

A7AGO)  $C6 \geq 111,22 \text{ m}^3$

A7SET)  $C6 \geq 123,96 \text{ m}^3$

A7OUT)  $C6 \geq 130,67 \text{ m}^3$

A7NOV)  $C6 \geq 123,21 \text{ m}^3$

A7DEZ)  $C6 \geq 110,36 \text{ m}^3$

A7JAN)  $C6 \geq 62,46 \text{ m}^3$

A7FEV)  $C6 \geq 27,02 \text{ m}^3$

A8JUL)  $C7 \geq 77,53 \text{ m}^3$

A8AGO)  $C7 \geq 123,66 \text{ m}^3$

A8SET)  $C7 \geq 137,82 \text{ m}^3$

A8OUT)  $C7 \geq 145,28 \text{ m}^3$

A8NOV)  $C7 \geq 136,98 \text{ m}^3$

A8DEZ)  $C7 \geq 122,70 \text{ m}^3$

A8JAN)  $C7 \geq 69,45 \text{ m}^3$

A8FEV)  $C7 \geq 30,04 \text{ m}^3$

#### **4.6.4.2 Solução do problema**

Utilizou-se para solucionar o modelo formulado, o Software LINDO (1996) - Linear Interactive and Discrete Optimizer, o qual tem o propósito geral de resolver sistemas de equações lineares, utilizando para isto o método simplex.

## 4.7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.7.1 Solução ótima do modelo de programação linear

São apresentados na Tabela 24 os volumes ótimos de água diário derivados no sistema de distribuição para as áreas irrigadas.

Tabela 24 – Solução ótima para a liberação de água por comporta.

| Comportas    | Volume ótimo das variáveis básicas (m <sup>3</sup> ) | Preço-sombra |
|--------------|--|--------------|
| C1           | 6.707,83   | 0,0          |
| C2           | 6.311,04   | 0,0          |
| C3           | 3.266,49   | 0,0          |
| C4           | 1.684,62   | 0,0          |
| C5           | 817,13   | 0,0          |
| C6           | 130,67   | 0,0          |
| C7           | 145,28   | 0,0          |
| <b>TOTAL</b> | 19.063,06  |              |

Fonte: Autor (2014).

Os resultados demonstram que todas as variáveis do modelo estão na base, sendo que os volumes de água derivados pelas comportas C1 + C2 + C3 representam 85% do volume total de água liberado.

De acordo com Frizzone (1996) e Rodrigues (2000), as variáveis não básicas na solução do modelo, apresentam preços-sombra, não sendo este o caso para este problema de programação linear (PPL), tendo em vista que todas as variáveis do modelo participam da base.

Os resultados demonstram ainda que os meses de setembro e outubro requeiram maior atenção quanto à disponibilidade de água às áreas irrigadas que compreendem o abastecimento das comportas 1, 2 e 3, pois o sistema trabalha “sem folga” em setembro e com uma das menores folgas em outubro quando comparada com os demais meses (Tabela 25). Isso pode ser explicado pela alta demanda hídrica exigida pelas culturas

no período de setembro a outubro e por compreender a maior quantidade de áreas irrigadas. As comportas devem trabalhar em conjunto nos meses de setembro e outubro, principalmente para as áreas de influência das comportas 1 e 2 para que consigam suprir as necessidades hídricas demandadas.

Tabela 25 – Análise de sensibilidade do volume de água diário demandado pelas áreas abastecidas pelas comportas 1, 2 e 3, conforme o mês.

| Meses     | Demanda C1+C2+C3 (m <sup>3</sup> ) | Folga (m <sup>3</sup> ) | Preço sombra |
|-----------|------------------------------------|-------------------------|--------------|
| Julho     | 6.453,82                           | 9.831,54                | 0,00         |
| Agosto    | 12.168,69                          | 4.116,67                | 0,00         |
| Setembro  | 16.285,36                          | 0,00                    | -1           |
| Outubro   | 13.590,70                          | 2.694,66                | 0,00         |
| Novembro  | 12.282,96                          | 4.002,40                | 0,00         |
| Dezembro  | 12.577,32                          | 3.708,04                | 0,00         |
| Janeiro   | 5.897,44                           | 1.0387,92               | 0,00         |
| Fevereiro | 4.168,04                           | 1.2117,32               | 0,00         |

Fonte: Autor (2014).

O preço sombra é o valor das variáveis do problema dual. Representa a melhoria marginal da função objetivo causado pela flexibilidade da restrição em uma unidade. A interpretação econômica seria até quanto estaríamos dispostos a pagar por uma unidade adicional de um recurso. É zero quando este recurso apresenta folga.

O LINDO reporta o valor do preço sombra como um valor positivo, negativo ou zero. Com relação aos resultados apresentados na Tabela 25, o preço sombra foi negativo para setembro, mostrando que o incremento de uma unidade na constante da restrição resulta na diminuição do valor da função objetivo.

A análise de sensibilidade de uma atividade básica compreende as possíveis variações nos coeficientes da função objetivo sem causar alteração nos níveis da solução ótima (FRIZZONE, 1996; RODRIGUES, 2000).

Na Tabela 26 são apresentados os valores atuais dos coeficientes da função objetivo utilizados no modelo e os intervalos permitidos, obtidos na solução ótima do problema, cujos limites são identificados pelos incrementos e decréscimos em relação aos valores utilizados no modelo.

Tabela 26 – Análise de sensibilidade dos coeficientes da função objetivo.

| Variáveis de decisão | Coeficientes da função objetivo | Incrementos | Decréscimos |
|----------------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| C1                   | 1                               | 0           | 0           |
| C2                   | 1                               | INFINITO    | 0           |
| C3                   | 1                               | 0           | 1           |
| C4                   | 1                               | INFINITO    | 1           |
| C5                   | 1                               | INFINITO    | 1           |
| C6                   | 1                               | INFINITO    | 1           |
| C7                   | 1                               | INFINITO    | 1           |

Fonte: Autor (2014).

Os dados demonstram que as variáveis permanecerão na base, quando se observar acréscimos e decréscimos nos coeficientes dessas variáveis conforme sugerido na Tabela 26, numa condição de análise individual de cada uma dessas variáveis básicas, com tudo mais permanecendo constante.

Na Tabela 27 é mostrada a disponibilidade de água conforme a utilização das comportas. Devido às características climáticas da região, as quais apresentam anos de grande escassez de água devido a baixas precipitações, optou-se também em demonstrar a disponibilidade de água de forma reduzida com 60%, 40% e 20% do total de água disponível.

Tabela 27 – Oferta de água por comporta em m<sup>3</sup>.

| Combinação de comportas | 100% do volume total | 60% do volume total | 40% do volume total | 20% do volume total |
|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| C1+C2+C3<=              | 19.634,53            | 11.780,7            | 7.853,81            | 3.926,91            |
| C1<=                    | 6.722,95             | 4.033,77            | 2.689,18            | 1.344,59            |
| C2<=                    | 6.353,83             | 3.812,3             | 2.541,53            | 1.270,77            |
| C3<=                    | 6.557,75             | 3.934,65            | 2.623,1             | 1.311,55            |
| C1+C2<=                 | 13.076,78            | 7.846,07            | 5.230,71            | 2.615,36            |
| C4<=                    | 6.490,48             | 3.894,29            | 2.596,19            | 1.298,1             |
| C5<=                    | 6.388,27             | 3.832,96            | 2.555,31            | 1.277,65            |
| C6<=                    | 2.714,37             | 1.628,62            | 1.085,75            | 5.42,874            |
| C7<=                    | 2.884,66             | 1.730,8             | 1.153,86            | 5.76,932            |

Fonte: Autor (2014).

Observou-se que a combinação de comportas C1, C2 e C3 torna-se inviável com a redução de 60% de sua capacidade para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. Diante dessas condições, deve-se trabalhar com um volume nas comportas acima da redução de 60%, devido à demanda demonstrada na Tabela 25. Já a redução de 40% do volume total de água só poderá ser utilizada para os meses de julho, janeiro e fevereiro, não sendo viável a redução de 20% do total de água disponível.

Na Tabela 28 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados conforme a combinação entre as comportas C1 e C2.

Tabela 28 – Viabilidade da redução dos volumes para a combinação entre as comportas 1 e 2 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| AGOSTO     | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| SETEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| OUTUBRO    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| NOVEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| DEZEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

Observa-se que só existe viabilidade para a redução de volume para o nível de 60% e 40% para os meses de julho, janeiro e fevereiro. Já para o nível de 20%, apenas o mês de fevereiro é viável.

Na Tabela 29 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C1.

Tabela 29 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 1 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| AGOSTO     | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| SETEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| OUTUBRO    | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| NOVEMBRO   | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| DEZEMBRO   | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

Observa-se uma grande inviabilidade da redução de volume para a maioria dos meses. Podemos destacar o mês de setembro que apresenta uma das maiores demandas hídricas nesse período.

Na Tabela 30 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C2.

Tabela 30 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 2 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| AGOSTO     | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| SETEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| OUTUBRO    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| NOVEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| DEZEMBRO   | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    | INVIÁVEL                    |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |

Fonte: Autor (2014).

A comporta 2 (C2) apresenta um desempenho semelhante à comporta 1, entretanto, como a C2 tem uma área muito maior quando comparada a área de influência da comporta 1 podemos observar que na maioria dos meses temos inviabilidade para as reduções de volume, pois a demanda hídrica é superior.

Na Tabela 31 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C3.

Tabela 31 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 3 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| AGOSTO     | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| SETEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| OUTUBRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| NOVEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| DEZEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

Devido à área de influência da comporta 3 ser bem menor que as duas últimas citadas, a mesma suporta a redução de volume em todos os meses trabalhados pela comporta.

Na Tabela 32 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C4.



Tabela 32 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 4 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| AGOSTO     | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| SETEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| OUTUBRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| NOVEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| DEZEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | INVIÁVEL                    |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

A comporta 4 apresenta suas maiores restrições hídrica para o nível de 20% nos meses de agosto a dezembro.

Na Tabela 33 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C5.

Tabela 33 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 5 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| AGOSTO     | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| SETEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| OUTUBRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| NOVEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| DEZEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

Na Tabela 34 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C6.

Tabela 34 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 6 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| AGOSTO     | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| SETEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| OUTUBRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| NOVEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| DEZEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

Na Tabela 35 são mostradas as situações viáveis para os meses trabalhados pela comporta C7.

Tabela 35 - Viabilidade da redução do volume para a comporta 7 para sua área de influência.

| <b>MÊS</b> | <b>60% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>40% VOLUME<br/>TOTAL</b> | <b>20% VOLUME<br/>TOTAL</b> |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| JULHO      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| AGOSTO     | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| SETEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| OUTUBRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| NOVEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| DEZEMBRO   | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| JANEIRO    | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |
| FEVEREIRO  | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      | VIÁVEL                      |

Fonte: Autor (2014).

As comportas 5, 6, e 7 apresentaram o mesmo comportamento de viabilidade de redução de volume, suportando as reduções de 20, 40 e 60% do volume total disponível. Esse fato pode ser explicado devido às áreas de influência das comportas serem menores quando comparadas com outras áreas.

#### 4.8 CONCLUSÕES

- O período de irrigação com disponibilidade para irrigação constituído de duas jornadas de trabalho de 12 horas diária com intervalo de entrega de água semanal mostrou-se viável para o manejo da irrigação na Fazenda Experimental Vale do Curu.
- Os meses de setembro e outubro necessitam de maior atenção quanto à demanda hídrica. Em setembro o sistema de abastecimento funciona sem folga utilizando a combinação das comportas 1, 2 e 3.
- A alocação definida pela modelagem matemática mostrou-se adequada para as necessidades das culturas estabelecidas, mostrando a utilização mais racional da água por meio da interligação entre comportas.

## 5 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A. de. **Avaliação do programa de transferência da gestão em perímetros públicos de irrigação: o caso de morada nova.** (Dissertação de Mestrado). 2008, 94p.

ALVES, C. A. M. **Uma Ferramenta de Extração de Regras de Redes Neurais.** 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.

ANDREOLI, M.; TELLARINI, V. **Farm sustainability evaluation: methodology and practice.** *Agric. Ecosyst. Environ.* 2000.

APPELGREN, B.G. **A management approach to national water scarcity.** In: Howsan, P., Carter, R.C. (Eds.), *Water Policy: Allocation and Management in Practice.* Proc. International Conference on Water Policy, Cranfield University, September 23–24, 1996, pp. 61–67.

BIALOSKORSKI NETO, Sigismundo; NAGANO, Marcelo Seido; MORAES, Marcelo Botelho da Costa. **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.

BRASIL. **Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão.** Plano Plurianual 2004-2007. Brasília, DF, 2003.

BRASIL. **Decreto nº 89.496, de 29 de março de 1984.** Regulamenta a Lei n. 6.662, de 25 de junho de 1979, que dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/114571/decreto-89496-84>>. Acesso em: 25 mar 2011.

BRASIL. **Lei de Irrigação nº 6.662, de 25 de junho de 1979.** Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br/principal/legislacao/leis/lei-no-6-662-de-25-de-junho-de-1979>>. Acesso em: 25 mar de 2011.

BRASIL. **Lei n. 12.787.** Dispõe sobre a Política Nacional de Irrigação, altera o art. 25 da Lei n. 10.438, de 26 de abril de 2002, revoga as Leis n. 6.662, de 25 de junho de 1979, 8.657, de 21 de maio de 1993, e os Decretos-Lei n. 2.032, de 9 de junho de 1983, e 2.369, de 11 novembro de 1987, e dá outras providências. Brasília: Congresso Nacional, 2013.

CASTRO, R. P. de; COSTA, R. N. T.; SILVA, L. A. C. da; GOMES FILHO, R. R. **Modelos de decisão para otimização econômica do uso da água em áreas irrigadas da Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste, CE.** *Irriga, Botucatu*, v. 12, n. 3, p. 377-392, julho-setembro, 2007.

CEARÁ. **Assembleia Legislativa.** Caderno regional da bacia do Curu / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro

Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza : INESP, 2009. 113p. : il. – (Coleção Cadernos Regionais do Pacto das Águas. v. 4).

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos (Planerh)**. Fortaleza: SRH, 2005.

CHEVALLIER, P. Aquisição e Processamento de Dados. IN: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2003. 485 - 525.

CHRISTOFIDIS, D. **Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos**. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília: ABID, n.54, p. 46-55, 2002.

CODEVASF. **Programas e ações**. Disponível em: [http://www.codevasf.gov.br/programas\\_acoas](http://www.codevasf.gov.br/programas_acoas). Acesso em: 15 jul 2011.

COGERH. **Política Estadual de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://portal.cogerh.com.br/publicacoes/o-caminho-das-aguas/politica-estadual-de-recursos-hidricos/?searchterm>>. Acesso em: 25 mar de 2011.

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MARIN. **Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.11, n.2, p.229- 236, 2003.

CORDEIRO, W.; LUNA, R. M.; CORDEIRO, V. F.; CAVALCANTE, I. N. **Águas Subterrâneas nas Bacias Hidrográficas do Ceará**. Fortaleza, 2009.

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.

DIÓGENES, F. C. A. **Indicadores de desempenho para o perímetro irrigado de brumado na perspectiva de sua autogestão**. Fortaleza Ceará – Brasil. 2008. (Dissertação de Mestrado).

DOURADO, A. et. al. **Perímetros públicos de irrigação: propostas para o modelo de transferência da gestão**. MBA Gestão Pública, 2006.

EISENBEIS, R. **Pitfalls in the Application of Discriminant Analysis in Business, Finance and Economics**. The Journal of Finance, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 875-900, 1997.

FALKENMARK, M. **Dilemma when entering 21st century** Frapid change but lack of sense of urgency. Water Policy, 1(4), 421–436. 1998.

FAUSETT, L. **Fundamentals of Neural Networks – Architecture, Algorithms, and Applications**. [S.l.]: Prentice Hall International, Inc., 1994.

FRIZZONE, J. A. **Modelo de programação linear para otimizar o uso da água em Perímetros Irrigados e sua aplicação no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 57p. Tese (Livre Docente), 1996.

FUNCEME. **Mapeamento dos Espelhos D’água do Brasil.** Fortaleza: Funceme, 2008.

GARSON, G. D. **Testing of Assumption.** In: GARSON, G. D. Statnotes:Topics in Multivariate Analysis. Disponível em: <<http://www2.chass.ncsu.edu/garson/pa765.statnote.html>>. Acesso em 20 jul. 2011.

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.

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.

GONÇALVES et al. **Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral-Ce.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.3, n.2, p.71–77, 2009 ISSN 1982-7679 (On-line).

GUJARATI, D. N. **Econometria Básica.** São Paulo: Makron Books, 2000.

HAIR, J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HANSEN, J.W. **Is agricultural sustainability a useful concept?** Agric. Syst. 50 (1), 117–143. 1996.

HAOUARI, M., AZAIEZ, M.N. **Optimal cropping patterns under water deficits.** Eur. J. Operat. Res. 130 (1), 133–146. 2001.

HAYKIN, S. **Redes Neurais, Princípios e Prática.** 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HEDIGER, W. **Reconciling ‘weak’ and ‘strong’ sustainability.** Int. J. Soc. Econ. 26 (7/8/9), 1120–1143. 1999.

HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J. **Introdução a pesquisa operacional.** São Paulo: EDUSP, 1988. 805p.

HUBERTY, C. J. **Applied discriminant analysis.** New York: John Wiley, 1994. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Censo agropecuário.** Rio de Janeiro, p.1-146, 2006.

International Water Management Institute - IWMI. Disponível em: <<http://www.iwmi.cgiar.org/>>. Acesso em: 25 mar 2011.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis.** 4<sup>th</sup>. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

KAMARA, A.B.; KOPPEN, B. VAN; MAGINGXA L. **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.

KENNY, E. D. **Avaliação do impacto da poluição ambiental no processo da corrosão atmosférica de metais através de redes neurais artificiais.** 2009. 110 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2003.

KIJNE, J. W. "Lessons learned from the change from supply to demand water management in irrigated agriculture: a case study from Pakistan." *Water Policy* 3(2): 109-123. 2001.

KRUGMAN, P. **Increasing returns and economic geography.** *Journal of Political Economy*, v. 99, n. 3, p. 483-499, 1994.

LOURENÇO, A.; MATIAS, R. P. **Estatística Multivariada.** Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2001.

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.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **A irrigação no Brasil: situação e diretrizes / Ministério da Integração Nacional -- Brasília: IICA, 2008. 132 p.**

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. **Libro blanco del agua.** MIMAM, Madrid. 1998.

MORADI-JALAL, M. et al. **Reservoir operation in assigning optimal multi-crop irrigation areas.** *Agricultural Water Management* Volume 90, Issues 1–2, 24 May 2007, Pages 149–159.

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

OLIVEIRA, F. (Coord.). **Relatório do Grupo de Trabalho Designado pela Determinação nº025/2004 do Diretor da Área de Produção.** Brasília: CODEVASF. 2004. 37 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/irrigationmap/index20.stm>>. Acesso em: 25 mar 2011.

PAUL, S., PANDA, S., NAGESH-KUMAR, D. **Optimal irrigation allocation: a multilevel approach.** *J. Irrig. Drain. Eng.* 126 (3), 149–156. 2000.

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, 2000.

PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. **Análise de Dados para Ciências Sociais: a complementaridade do SPSS**. 2. ed. Lisboa: Editora Silabo, 2000.

PIRAZZOLI, C.; CASTELLINI, A. **Application of a model for evaluating the environmental sustainability of cultures in hill and mountain areas. The case of berries and fruit chestnut in Northern Italy**. *Agric. Econ.* 2000.

POMPEU, C. T. **Direito de Águas no Brasil**. Bauru: Office, 2004, 227p.

POMPEU, C. T. **Direito de Águas**. In. FRANÇA, R.L. *Enciclopédia Saraiva do Direito*. São Paulo: Saraiva, 1977. p. 1972-1982

PREARO, L. C., GOUVEA, M. A., MONARI, C. **Avaliação do emprego da técnica de análise discriminante em teses e dissertações de algumas instituições de ensino superior**. *R. Adm. FACES Journal Belo Horizonte* · v. 9 n. 1 p. 129-147 jan./mar. 2010. ISSN 1984-6975 (online). ISSN 1517-8900 (Impressa).

QIU, H.J., ZHU, W.B., WANG, H.B., CHENG, X. **Analysis and design of agricultural sustainability indicators system**. *Agric. Sci. China*. 2007.

RIESGO, L.; GÓMEZ-LIMÓN J. A. **Multi-criteria policy scenario analysis for public regulation of irrigated agriculture**. *Agricultural Systems* 91(1-2): 1-28. 2006.

RIGBY, D.; WOODHOUSE, P.; YOUNG, T.; BURTON, M. **Constructing a farm level indicator of sustainable agricultural practice**. *Ecol. Econ.* 2001.

RODRIGUES, J. A. L.; COSTA, R. N. T.; FRIZZONE, J. A. & AGUIAR, J. V. de. **Plano Ótimo de Cultivo no Projeto de Irrigação Morada Nova, Ceará, Utilizando Modelo de Programação Linear**. *Revista Irriga, Botucatu, SP*, v.5, n.3, p.199-221, 2000.

RUMELHART et al. **Learning representations by backpropagation errors**. *Nature*, 323:533–536. 1986.

SANDS, G.R., PODMORE, T.H. **A generalized environmental sustainability index for agricultural systems**. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2000.

SANTOS, L et al. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Secretaria de Fiscalização e Avaliação de Programas de Governo - Programa de desenvolvimento, 2001. 372p.

SENRA, J. B.; VILELLA, W. M. da C. **Legislação e política nacional de recursos hídricos**. 2011.

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.

SHARMA, S. **Applied Multivariate Techniques**. New York: Willey & Sons, 1996.

SINGH, D.K., JAISWAL, C.S., REDDY, K.S., SINGH, R.M., BHANDARKAR, D.M. **Optimal cropping pattern in a canal command area**. *Agricult. Water Manage.* 50 (1), 1–8. 2001.

STEINER, M. T. A. **Uma metodologia para o reconhecimento de padrões multivariados com resposta dicotômica**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 1995. Disponível em: <[http://www.eps.ufsc.br/teses/steiner/capit\\_2/cap2\\_ste.htm](http://www.eps.ufsc.br/teses/steiner/capit_2/cap2_ste.htm)> Acesso em: 28 out. 2011.

STOORVOGEL, J.J.; ANTLE, J.M.; CRISSMAN, C.C.; BOWEN, W. **The trade-off analysis model: integrated bio-physical and economic modeling of agricultural production systems**. *Agric. Syst.* 80 (1), 43–66. 2004.

STUDART, T. M. C. **Escoamento Superficial**. Disponível em: <<http://www.deha.ufc.br/ticianahidrologia/apostila.htm>>. Acesso em: 28 out. 2011.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. **Using Multivariate Statistics**. 3. ed. New York: Harper Collins, 1996.

TEIXEIRA, A.D., MARIÑO, M.A. **Coupled reservoir operation irrigation scheduling by dynamic programming**. *J. Irrig. Drain. Eng.* 128 (2), 63–73. 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. Irrigação e Drenagem. Brasília, 2002.

TURRAL, H. **Devolution of management on public irrigation systems: Cost shedding, empowerment and performance, a review**. Working Paper 80. London: Overseas Development Institute. 1995.

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.

VAN DAM, J.C.; SINGH, R.; BESSEMBINDER, J.J.E.; LEFFELAAR, P.A.; BASTIAANSEN, W.G.M.; JHORAR, R.K.; KROES, J.G.; DROOGERS, P. **Assessing options to increase water productivity in irrigated river basins using remote sensing and modeling tools**. *Int. J. Water Resour. Dev.* 22, 115–133. 2006.

VEDULA, S., MUJUMDAR, P.P., CHANDRA SEKHAR, G. **Conjunctive use modeling for multicrop irrigation**. *Agricult. Water Manage.* 73 (3), 193–221. 2005.

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.

YUNLONG, C.; SMIT, B. **Sustainability in agriculture:** a general review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 49 (2), 299–307. 1994.