

UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**USO DE INSTRUMENTOS ECONÔMICOS PARA INCREMENTO DA  
EFICIÊNCIA NA IRRIGAÇÃO: APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO  
PARDO COM RIZICULTURA**

***EDER NONNEMACHER***

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental*

**Orientador:** Prof. Carlos André Bulhões Mendes, Ph.D.

**Banca Examinadora:**

Prof <sup>ª</sup> . Tânia Nunes da Silva	Escola de Administração/UFRGS
Prof. André Luiz Lopes da Silveira	IPH/UFRGS
Prof <sup>ª</sup> . Nilza Maria dos Reis Castro	IPH/UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2008.

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

## **APRESENTAÇÃO**

O presente trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do prof. Carlos André Bulhões Mendes.

*Querido pai: você está presente em  
todos os momentos de minha vida.*

† 05/04/1951 – 26/02/2003 .

*“Os livros são amigos que nunca nos decepcionam”*

*Thomas Carlyle*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Carlos André Bulhões Mendes pelo dispêndio de tempo e pela valorosa orientação;

Aos professores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela dedicação e pelo conhecimento transmitido;

À minha esposa Lívia, cujas palavras nos momentos difíceis me ajudaram a seguir adiante. Muito obrigado pelo amor e compreensão. Te amo muito.

Ao meu filho Dezinho, que chegou em meio a este trabalho e, com seu sorriso, me alegrou em todos momentos. Te amo muito meu filho.

A minha família que, mesmo distante, torceu e acreditou em mim. Mãe, Mana, Vany e Dinda, amo muito vocês.

Ao meu grande amigo Juan Martin Bravo, pela amizade e grande ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os colegas que se tornaram amigos durante o curso, em especial a Martin Delgado e sua família.

A todos meus amigos pelo incentivo e apoio oferecido.

## RESUMO

O crescimento da população mundial tem demandado um aumento na produção de alimentos, fazendo com que avancem as áreas agrícolas e evoluam as tecnologias de produção. O aumento das áreas agrícolas gera uma maior demanda de água para irrigação, causando muitas vezes, conflito entre os diversos usuários deste bem. Dentre as culturas que mais consomem água se encontra a do arroz irrigado, responsável por grande parte dos conflitos nas Bacias Hidrográficas do Rio grande do Sul, pois seu período de plantio se dá justamente nos meses de verão. Então, alguma metodologia se faz necessária para estudar a possibilidade da maximização dos benefícios ou redução dos custos para uma área de cultivo de arroz. Por outro lado, a Economia fornece instrumentos para maximizar os benefícios produzidos através de um bem. Neste trabalho, será aplicada a Teoria Econômica dos Recursos Naturais Renováveis, através de um modelo proposto, considerando como Estoque do Recurso Natural a área cultivada com arroz irrigado em cada tempo e para cada sistema de cultivo, tendo como restrição as Vazões de Referência adotadas (Vazões Ecológicas). Desta forma, a água utilizada em excesso será considerada como a externalidade. Para conversão desta externalidade em valores de moeda, ela será multiplicada por um Custo de Oportunidade. Após, seu valor será agregado aos Custos de Produção do arroz. Através de Cenários, obtidos do cruzamento de algumas Vazões de Referência e de algumas Taxas de Juros, pode-se fazer uma análise dos Benefícios Líquidos ( $W$ ) gerados por esta cultura. Os Resultados mostram que a internalização das externalidades não inviabiliza economicamente a prática desta cultura.

**Palavras-chave:** Recursos Hídricos, Arroz Irrigado, Recursos Renováveis, Otimização.

## **ABSTRACT**

Agricultural areas are increasing and production technologies in developing given the global population growth and given the resulting increase of food necessities. Increase in water demands for agricultural also conflicts with other purposes of this scarce source that have its availability reduced. Rice is one of the most water consuming crops, and at the Rio Grande do Sul watersheds, it is responsible of the bigger conflicts between water users because planting takes place, precisely, in the months of summer, when water demands for urban supply are higher. Then, some methodology is needed to study the feasibility of rice cultivation for the area with the maximization of benefits or minimization of the cost. Economics provides tools to maximize benefits produced by different elements. This study applies Renewable Natural Resources economic theory through the previously presented problem by a developed model presented in this study. The Natural Resources Supply is the rice cultivated area in each time step and for each cultivation methodology, where the restrictions are based on references streamflow, as the Ecological streamflow. Thus, water used in excess will be the externality. To convert this externality in monetary values, it will be multiplied by a cost of opportunity. Then, its value will be added to the rice production cost. Several scenarios were tested based on different streamflow reference and interests rate values. Results shown the rice cultivation is economically feasible also with the internalization of externalities.

**Keywords:** Water Resources, Irrigated Rice, Renewable Resources, Optimization.



# SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO .....	1
1.1- O PROBLEMA .....	1
1.2 – JUSTIFICATIVA .....	3
1.3- OBJETIVO DA PESQUISA .....	4
2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	5
2.1- PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL .....	5
2.2- TEORIA ECONÔMICA DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS.....	8
2.2.1- Função Crescimento.....	9
2.2.2- Função de Produção e Função Exploração .....	12
2.2.3- Gerenciamento de Recursos Renováveis .....	15
2.3- EXTERNALIDADES .....	19
2.4- MODELAGEM E FERRAMENTAS DE OTIMIZAÇÃO .....	22
2.5- ANÁLISE ECONÔMICA ÁGUA-AGRICULTURA.....	24
2.6- SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO .....	27
2.7- FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	29
3- METODOLOGIA .....	31
3.1- OBTENÇÃO DOS DADOS .....	31
3.1.1- Dados da Bacia.....	32
3.1.2- Dados da Orizicultura .....	32
3.1.3- Dados do Custo de Oportunidade .....	33
3.2- CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES ECONÔMICAS .....	33
3.3- APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO .....	36
3.4- ANO DE REFERÊNCIA E HORIZONTE DE PROJEÇÃO .....	39
3.5- RESULTADOS E CENÁRIOS .....	39
4-ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PARDO .....	40
4.1- CARACTERIZAÇÃO DA BACIA .....	40
4.1.1- Descrição Geral da Bacia .....	40
4.1.2- Área dos Municípios Inserida na Bacia .....	42
4.1.3- Uso do Solo .....	42
4.1.4- Área de Arroz Irrigado .....	44
4.1.5- Disponibilidade Hídrica Superficial.....	45
4.1.6- Demanda Hídrica e Consumo Hídrico .....	46

4.2- DADOS ORIZÍCOLAS .....	48
4.2.1- Sistemas de cultivo praticados na Bacia (Tecnologias de Produção) .....	48
4.2.2- Consumo de água por Tecnologia de Produção .....	49
4.2.3- Custo de produção de Arroz.....	52
4.2.4-Preço do Arroz .....	54
4.3- DADOS DO CUSTO DE OPORTUNIDADE.....	54
4.4- CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES ECONÔMICAS .....	55
4.4.1- Função Crescimento e Estoque .....	55
4.4.2- Função Custo de Produção .....	57
4.4.3- Função Preço .....	59
4.4.4- Função Custo das Externalidades.....	60
4.5- CONDIÇÕES ADOTADAS PARA O MODELO .....	62
4.5.1- Número de Dias de Irrigação do Arroz .....	62
4.5.2- Vazões de Referência.....	62
4.5.3- Tendências dos Sistemas de Cultivo .....	63
4.5.4- Taxa de Juros.....	65
4.5.5- Horizonte de Projeção .....	65
4.5.6- Cenários.....	65
5- RESULTADOS E APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	67
5.1- CASO 1: LUCRATIVIDADE E CUSTO DE OPORTUNIDADE FIXOS.....	67
5.2- CASO 2: TAXA DE JUROS E CUSTO DE OPORTUNIDADE FIXOS.....	76
5.3- CASO 3: LUCRATIVIDADE E TAXA DE JUROS FIXOS.....	78
6- CONCLUSÕES.....	81
7- RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MODELO .....	83
8-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
ANEXOS .....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Conflitos entre Usuários de Água .....	5
Figura 2.2: Organismos do Sistema Nacional de Recursos Hídricos .....	6
Figura 2.3: Ciclo de Uma População Simples .....	9
Figura 2.4: Gráfico de Uma Função Crescimento .....	10
Figura 2.5: O Efeito da Colheita em Mudanças Populacionais .....	13
Figura 2.6: Benefício da Colheita $Y(t)$ quando $P(t)=D(Y(t))$ .....	18
Figura 2.7: Equilíbrio dos Mercados Competitivos .....	20
Figura 2.8: Externalidades Negativas em Mercados Competitivos .....	21
Figura 2.9: Externalidades Positivas em Mercados Competitivos .....	22
Figura 2.10: Consumo de água por setor de consumo .....	25
Figura 2.11: Sistemas de Cultivo de Arroz por Área no Rio Grande do Sul .....	29
Figura 3.1: Fluxograma Metodológico .....	31
Figura 3.2: Fluxo de Recursos Econômicos em Uma Bacia Hidrográfica .....	34
Figura 3.3: Função Crescimento e Função Crescimento Biológico do Recurso .....	35
Figura 3.4: Áreas “j” dos Sistemas de Cultivo “i” na Bacia .....	36
Figura 3.5: Externalidades geradas pelo uso de água acima da $Q_{ref}$ .....	37
Figura 3.6: Maximização do Benefício Líquido .....	37
Figura 4.1: Mapa da bacia do Rio Pardo .....	41
Figura 4.2: Demanda Superficial de Água por Tipo de Uso .....	47
Figura 4.3: Consumo de Água para Três Sistemas de Cultivo de Arroz .....	49
Figura 4.4: Consumo de Água para Cinco Sistemas de Cultivo de Arroz .....	50
Figura 4.5: Volume Retirado de Água por Três Sistemas de Cultivo .....	50
Figura 4.6: Volume Retirado e Efetivamente Consumido por Três Sist. de Cultivo de Arroz ..	51
Figura 4.7: Variação Temporal do Consumo de Água para Três Sistemas de Cultivo de Arroz	51
Figura 4.8: Ajuste da Função Estoque $X(t)$ .....	56
Figura 4.9: Ajuste da Função Crescimento $F(t)$ .....	57
Figura 4.10: Ajuste da Função Custo de Produção ( $C(t)$ ) (Sistema Convencional) .....	58
Figura 4.11: Ajuste da Função Preço $P(t)$ .....	59
Figura 4.12: Função Preço e Função Custo Ajustadas .....	60
Figura 4.13: Ajuste da Função Custo das Externalidades $C_{ext}(t)$ .....	61
Figura 4.14: Evolução das Áreas dos Sistemas de Cultivo: Bacia do Rio Pardo .....	63
Figura 4.15: Posse da Terra de Cultivo de Arroz no RS .....	64
Figura 5.1: Evolução do Benefício Líquido para o CASO 1 .....	68
Figura 5.2: Evolução da Lucratividade Percentual para o CASO 1 .....	69

Figura 5.3: Evolução das Externalidades para o CASO 1 .....	70
Figura 5.4: Evolução das Áreas do Sistema de Cultivo para Q90%Pond do CASO 1 .....	71
Figura 5.5: Evolução das Áreas do Sistema de Cultivo para Q90%Jan do CASO 1 .....	71
Figura 5.6: Evolução das Áreas dos Sistemas de Cultivo para Q95%Pond e Q95%Jan do CASO 1 .....	72
Figura 5.7: Evolução da Rentabilidade por m <sup>3</sup> de Água .....	73
Figura 5.8: Evolução do Custo por m <sup>3</sup> de Água .....	73
Figura 5.9: Fluxo de Caixa para Três Cenários do CASO 1 .....	74
Figura 5.10: Comparativos das Diferenças nos Ganhos para os Três Cenários .....	75
Figura 5.11: Fluxo de Caixa para Três Cenários do CASO 1 .....	75
Figura 5.12: Comparativos das Diferenças nos Ganhos para os Três Cenários .....	76
Figura 5.13: Evolução do Benefício Líquido para o CASO 2.....	77
Figura 5.14: Evolução da Lucratividade Percentual para o CASO 2 .....	78
Figura 5.15: Evolução do Benefício Líquido para o CASO 3.....	79
Figura 5.16: Evolução da Lucratividade Percentual para o CASO 3 .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Benefícios e Custos, Privados, Externos e Sociais.....	20
Tabela 4.1: Áreas Totais dos Municípios na Bacia do Rio Pardo .....	42
Tabela 4.2: Áreas das Classes de Uso do Solo .....	43
Tabela 4.3: Evolução da Área de Arroz Irrigado por Município.....	44
Tabela 4.4: Evolução da Área de Arroz Irrigado Inserida na Bacia por Município.....	44
Tabela 4.5: Disponibilidades Hídricas Superficiais Naturais da Bacia.....	45
Tabela 4.6: Trecho Final da Curva de Permanência da Bacia (Janeiro).....	46
Tabela 4.7: Demanda superficial (m <sup>3</sup> /s) por Uso Consuntivo .....	47
Tabela 4.8: Coeficientes de Retorno para cada Uso.....	47
Tabela 4.9: Consumo superficial (m <sup>3</sup> /s) na Bacia por Uso Consuntivo .....	48
Tabela 4.10: Consumo de Água Adotado por Sistema de Cultivo.....	52
Tabela 4.11: Evolução do Custo de Produção (Sistema Convencional) .....	53
Tabela 4.12: Custo de Produção para Três Sistemas de Cultivo.....	53
Tabela 4.13: Evolução do Preço do Arroz (Fev., Seco e Limpo).....	54
Tabela 4.14: Evolução da Tarifa Média de Água.....	55
Tabela 4.15: Evolução das Áreas de Arroz na Bacia .....	56
Tabela 4.16: Fatores Adotados para o Custo de Produção dos Sistemas de Cultivo .....	59
Tabela 4.17: Vazões de Referência Adotadas .....	62
Tabela 5.1: CASO 1 – Benefício Líquido para Cada Cenário.....	68
Tabela 5.2: CASO 2 – Benefício Líquido para Cada Cenário.....	77
Tabela 5.3: CASO 3 – Benefício Líquido para Cada Cenário.....	79

## LISTA DE SÍMBOLOS

ANA	Agência Nacional de Águas
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
GAMS	General Algebraic Modeling System
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
MMA	Ministério do Meio Ambiente
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
AGSM	Sub-modelo agrícola (Agricultural sub-model)
$A_k$	Área total disponível para a categoria k
$C$	Custo de produção
$c$	Custo unitário de um recurso natural
$C(i,t)$	Custo de Produção de arroz para cada sistema de cultivo
$C_{ext}$	Custo unitário das externalidades
$D$	Demanda de um recurso natural
$E$	Esforço
$Ext(t)$	Vazão utilizada acima da $Q_{ref}$
$F$	Função crescimento de um recurso natural
$F(t)$	Varição da área plantada total de arroz irrigado na bacia
$H$	Função produção de um recurso natural
$h$	Número de animais na unidade agrícola
$i$	Tipo de sistema de cultivo (Tecnologia de Produção)
$K$	Capacidade de suporte ambiental
$MSY$	Retirada máxima sustentável
$p$	Preço unitário de um recurso natural
$P(t)$	Preço do arroz em cada tempo
$q$	Colheita de um recurso natural ou uma constante
$Q(i)$	Vazão consumida por cada tecnologia de produção
$Q_{ref}$	Vazão de Referência (Vazão Ecológica)
$R$	Receita bruta
$r$	Taxa de crescimento intrínseco de uma população (ou recurso natural)
$t$	Tempo

$U$	Fluxo de benefícios sociais (Utilidade)
$w$	Número de recrutas em uma população
$W, N$	Benefício Líquido
$W_{ij}$	Demanda de água do tipo $i$ por unidade de área da atividade $j$ ;
$WRC_j$	Contribuição água-relacionada (water-related contribution) da atividade $j$ ;
$X$	Estoque de um recurso natural
$x(i,t)$	Área de cada tecnologia de produção
$X(t)$	Área cultivada com arroz irrigado total da bacia
$X_{ini}$	Área cultivada com arroz irrigado total inicial da bacia
$X_j$	Área total usada pela atividade $j$ .
$y$	Número de jovens em uma população
$Y$	Taxa de retirada de um recurso natural
$\alpha, \beta$	Constantes iguais a 1
$\delta$	Taxa de desconto
$\pi$	Renda na unidade agrícola
$\rho$	Fator de desconto

# 1- INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita a exposição do problema, a descrição do objetivo, levantamento da hipótese e questões da pesquisa, além de ser apresentada a justificativa para a escolha do tema.

## 1.1- O PROBLEMA

Segundo Mundigeo (2007), o dia 12 de Outubro de 1999 entrou para a história como aquele em que o planeta Terra ultrapassou a marca de seis bilhões de habitantes. O crescimento populacional mundial faz com que aumente a demanda por alimentos, obrigando a expansão das áreas agrícolas concomitantemente com o processo de melhoria das tecnologias de produção. Com o aumento das áreas cultivadas, apesar das melhorias nos sistemas de produção, é comum que ocorra o aumento do consumo de água, principalmente através da irrigação de culturas, ocasionando em muitos casos, conflitos entre os diversos segmentos consumidores deste bem. No Brasil, para sanar problemas de conflito entre os setores de usuários de água e na tentativa de promover um desenvolvimento sustentável, foi promulgada a LEI 9.433/97 que estabelece o Sistema Nacional de Recursos Hídricos e define quais instrumentos de gestão serão utilizados neste processo. Estes instrumentos, até o presente momento, não têm se mostrado eficientes, o que torna viável a busca por soluções em outros campos, dentre os quais está a economia.

A água é um bem fundamental a manutenção da vida na Terra e utilizada nas diversas atividades do homem tais como a geração de energia elétrica, abastecimento humano, dessedentação de animais, irrigação de culturas entre outros (LIMA *et al.*, 2004). Conforme Furtado e Luca (2003), a irrigação de culturas é a maior usuária de água em nível mundial e, em particular, a cultura de arroz irrigado é a maior consumidora agrícola desse recurso.

Para gerenciar problemas de escassez e conflitos entre os setores usuários da água foram desenvolvidos diversos modelos de otimização e de simulação de sistemas, empregando técnicas matemáticas como, por exemplo, a Programação Linear. Já para os Recursos Naturais Renováveis os modelos são baseados na teoria econômica, desenvolvida principalmente para gerenciamento de recursos de pesca, e que podem ser expandidas para



aplicação na otimização de sistemas de outros Recursos Naturais Renováveis, dentre os quais, a água.

Para Hanley *et al.* (1997) é razoável supor que a economia de Recursos Naturais tenha base na economia de capital. O Estoque de Recursos Naturais pode ser visto como bem de capital com um grupo específico de características que descrevem, para o caso dos Recursos Renováveis, o crescimento biológico.

Décadas antes do aparecimento da Matemática Bioeconômica (teoria econômica aplicada aos recursos naturais), muitos economistas têm reconhecido que todos os Recursos Naturais constituem capital “natural”. Um dos pioneiros na moderna economia dos recursos naturais foi o economista Canadense Anthony Scott (MUNRO, 1992). Ainda segundo Munro (1992), o modelo de Recursos Naturais foi desenvolvido por outro economista Canadense, H. Scott Gordon, no famoso artigo “A Teoria Econômica de um Recurso em Propriedade Comum: a Pesca”.

O problema central em que a Teoria Econômica dos Recursos Naturais esta focada é o “uso ótimo” desses recursos, o qual é resolvido através de instrumentos da Microeconomia neoclássica (LUSTOSA *et al.*, 2003).

Em virtude de os instrumentos de gestão preconizados na LEI 9.433/97 ainda não se mostrarem eficientes na solução de problemas geradores de conflitos entre usuários de água, a presente pesquisa será desenvolvida aplicando a Teoria Econômica dos Recursos Naturais Renováveis, onde fatores como a área da bacia, áreas cultivadas com arroz irrigado, água disponível para a irrigação, custo de produção e preço do arroz serão utilizados dentro de um modelo de otimização como algumas das variáveis de estado e restrições.

Assim, a água será considerada como Recurso Natural Renovável e esta pesquisa buscará o incremento da eficiência da irrigação dos principais sistemas de cultivo de arroz da bacia do Rio Pardo.

## 1.2 – JUSTIFICATIVA

A quantidade de água existente na natureza é finita e sua disponibilidade diminui gradativamente devido ao crescimento populacional, à expansão das fronteiras agrícolas e à degradação do meio ambiente (LIMA *et al.*, 2004).

Segundo Shiklomanov (1998), do volume total de 1.386 milhões de km<sup>3</sup> de água na Terra, 97,5% são de água salgada e os 2,5% restantes são de água doce. Somente 0,266% da água doce representa toda a água dos lagos, rios e reservatórios (significa 0,007% do total de água doce e salgada existente no planeta). Além disso, a água não é distribuída uniformemente no planeta, fazendo com que regiões a tenham em abundância enquanto outras sofrem com a escassez desse recurso. Ainda, as atividades humanas causaram a degradação de grande parte dos mananciais de água doce, gerando conflitos entre usuários e crises de abastecimento.

Com o crescimento populacional, a humanidade se vê compelida a usar a maior quantidade possível de solo agricultável, o que vem impulsionando o uso da irrigação, não só para complementar as necessidades hídricas das regiões úmidas, como para tornar produtivas as áreas áridas e semi-áridas do globo, que constituem cerca de 55% de sua área continental total. Atualmente, mais de 50% da população mundial depende de produtos irrigados (LIMA *et al.*, 2004).

Para resolver o problema da escassez da água encontramos na bibliografia consultada uma grande quantidade de modelos nos quais são utilizadas técnicas de otimização ou simulação. Nesses modelos são utilizados, como variáveis de estado e restrições, elementos físicos, econômicos ou biológicos, geralmente tratados individualmente. Mas, os modelos em que são levadas em consideração as variáveis de crescimento do Recurso Natural são raros.

A aplicação da Teoria Econômica dos Recursos Naturais Renováveis nesta pesquisa buscará incrementar a eficiência de irrigação nos sistemas de cultivo de arroz e a metodologia desenvolvida pretende integrar esses elementos na análise.

### **1.3- OBJETIVO DA PESQUISA**

Como foi visto nos itens anteriores, o arroz irrigado se enquadra entre as atividades que mais consomem água. Com isso, em períodos de escassez, ocorrem conflitos entre os diversos setores de usuários deste recurso natural.

Então, o uso da água pela cultura de arroz irrigado gera prejuízos a terceiros (externalidades), que não estão incorporados aos custos de produção desta atividade agrícola.

Na tentativa de resolver o problema é levantada a hipótese de que, utilizando-se o ferramental econômico e a Teoria dos Recursos Naturais Renováveis, é possível desenvolver um modelo que maximize o Benefício Líquido do cultivo de arroz irrigado para uma unidade de estudo, internalizando os custos gerados a terceiros pelo consumo de água, sem inviabilizar economicamente esta prática agrícola.

Com base nesta hipótese, o presente estudo tem por objetivo geral apresentar um modelo que agregue aos custos de produção do setor orizícola os prejuízos causados a terceiros por sua atividade (externalidades), gerados pelo uso da água.

## 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas as teorias que norteiam este trabalho. Serão abordados assuntos como Planejamento de Recursos Hídricos, Teoria dos Recursos Naturais Renováveis, externalidades, dentre outros.

### 2.1- PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

O planejamento e a gestão dos recursos hídricos no Brasil seguem a Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 que instituiu a Política e o Sistema Nacional de Recursos Hídricos. Esta lei surgiu para tentar resolver problemas como os mostrados na Figura 2.1, obtida de Mendes (2008), onde é exemplificado o aparecimento dos conflitos entre os diversos setores usuários de água.

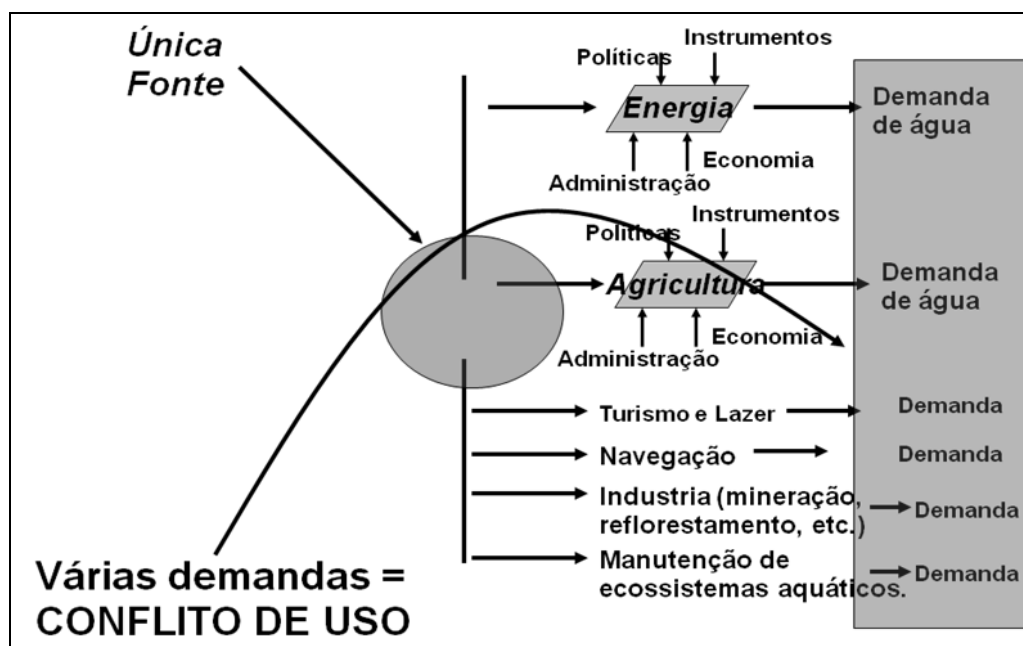


Figura 2.1: Conflitos entre Usuários de Água

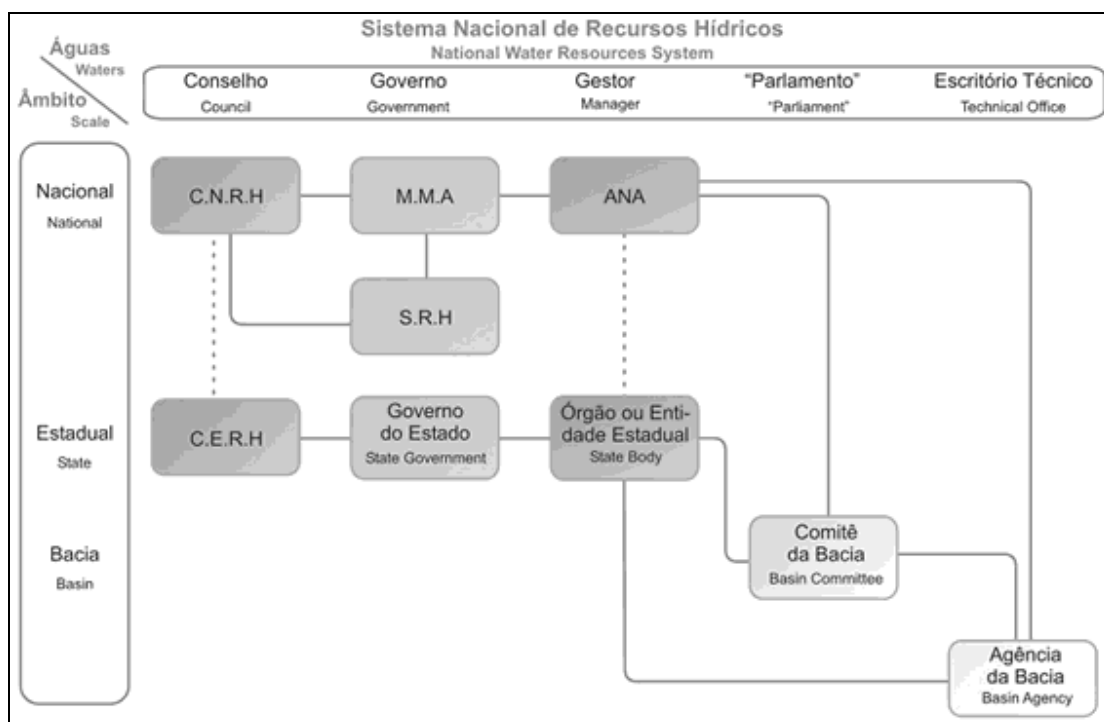
Fonte: Mendes (2008)

Nota-se que, enquanto a água é fornecida por uma fonte única, a demanda é exigida por diversos setores.

Conforme a ANA (2002) “Em 1997 concretizou-se a decisão do país de enfrentar, com um instrumento inovador e moderno (Lei 9.433), o desafio de equacionar a demanda crescente de água para fazer face ao crescimento urbano, industrial e agrícola, os potenciais conflitos gerados pelo binômio disponibilidade-demanda e o preocupante avanço

da degradação ambiental de nossos rios e lagos. Foi definida, então, a Política Nacional de Recursos Hídricos e criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.”

Na Figura 2.2 é apresentado um esquema dos organismos integrantes do Sistema Nacional de Recursos Hídricos e logo abaixo são resumidas as principais atribuições de cada um deles, ambos adaptados de SRH/MMA (Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente).



**Figura 2.2: Organismos do Sistema Nacional de Recursos Hídricos**

Fonte: SRH/MMA (2007)

- **CNRH e CERH** (Conselhos Nacional e Estadual de Recursos Hídricos) - subsidiar a formulação da Política de Recursos Hídricos e dirimir conflitos;
- **MMA/SRH** (Ministério do Meio Ambiente e Secretaria de Recursos Hídricos) - formular a Política Nacional de Recursos Hídricos e subsidiar a formulação do Orçamento da União;
- **ANA** (Agência Nacional de Águas) - implementar o Sistema Nacional de Recursos Hídricos, outorgar e fiscalizar o uso de recursos hídricos de domínio da União;
- **Órgão Estadual** - outorgar e fiscalizar o uso de recursos hídricos de domínio do Estado;
- **Comitê da Bacia** - decidir sobre o Plano de Recursos Hídricos (quando, quanto e para que cobrar pelo uso de recursos hídricos);

- **Agência da Bacia** - escritório técnico do comitê da Bacia.

A Lei 9.433/97 estabelece em seu artigo 1º que a bacia hidrográfica é a unidade de gestão do sistema.

Como se pode ver na figura 2.2, o sistema envolve esferas políticas dos níveis federal e estadual, e, embora não fique exposta, também envolve a esfera municipal, já que a unidade de gestão é a Bacia Hidrográfica. Para Lanna (2004), o grande desafio do sistema é a articulação entre os dois níveis jurisdicionais. Essa dificuldade sistêmica é visível no âmbito das bacias de rios sob domínio federal que têm muitos de seus afluentes com domínio estadual, por terem nascente e foz em território de um mesmo estado. Com isto, as ações estaduais nos afluentes terão repercussão no rio principal, de domínio federal. O mesmo pode ocorrer entre comitês de bacia e de sub-bacia de rios no mesmo domínio, seja federal ou estadual.

A Lei 9.433/97 também deixa claro o caráter público da água, e estabelece os instrumentos para sua gestão.

Apesar de todos os dispositivos previstos por esta lei, ela ainda não tem se mostrado eficiente em seu objetivo principal: resolver conflitos entre os diversos usuários, fazendo com que cada um deles utilize a água de forma sustentável.

Como exemplo do problema apresentado pode-se citar a própria implantação da lei em diversas Bacias Hidrográficas. Apesar do tempo decorrido desde a promulgação da lei, apenas algumas bacias já tem seu Plano formalizado. Outro problema sério é a força política de cada setor de usuário na fase do Plano de Bacia, onde cada um tenta obter mais benefícios, podendo gerar grandes prejuízos para a Bacia Hidrográfica como um todo.

Com isto, o presente trabalho visa apresentar um modelo que agregue aos custos de produção de um setor de usuário de água os prejuízos causados a terceiros por sua atividade, gerados pelo uso deste bem. O modelo proposto otimizará o uso da água, através da maximização do Benefício Líquido, para um segmento dentro do setor nomeado na Figura 2.1 como "Agricultura". Procedimento semelhante poderá ser adotado para cada um dos outros setores individualmente, ou para o conjunto de setores.

## 2.2- TEORIA ECONÔMICA DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS

Para Conrad e Clark (1992), por um Recurso Natural Renovável entende-se uma população de plantas ou animais com capacidade de reprodução e crescimento (árvores, peixes, etc.) ou massa inanimada (ou fonte de energia) sujeita a um fluxo periódico ou constante (água, vento, etc.).

Para Hanley *et al.* (1997) Recurso Natural Renovável é aquele capaz de se auto-reproduzir. Já para Lustosa *et al.* (2003) a capacidade de recomposição de um recurso no horizonte do tempo humano tem sido o principal critério para a classificação dos Recursos Naturais em renováveis e exauríveis.

Lustosa *et al.* (2003) também afirmam que “o aspecto crucial que responde em grande parte pelo desaparecimento dos recursos renováveis é a incompatibilidade entre as dinâmicas biológica (que determina sua evolução) e econômica (que determina o ritmo da exploração do recurso). Pela demanda biológica, o estoque de recurso renovável não é fixo; ele cresce na medida em que apresenta condições de se expandir, porém sua expansão está submetida a um limite máximo que é definido pela capacidade de suporte do ecossistema. A dinâmica econômica, por sua vez, pressiona para o declínio de um recurso na medida em que sua taxa de extração exceder, de modo persistente, a taxa de crescimento do recurso”.

Ricklefs (1996) menciona que “mesmo as espécies de reprodução mais lenta cobririam a terra num curto espaço de tempo se as populações crescessem sem restrições”.

Assim, a Teoria Econômica dos Recursos Naturais Renováveis deve levar em conta a trajetória de crescimento ou extinção de uma população submetida a um dado nível de exploração.

Conrad e Clark (1992) descrevem a dinâmica de um estoque de recurso biológico, representada por  $F(X_t)$ , onde o seu tamanho no tempo  $t$  é denotado por  $X_t$ , ou no tempo contínuo,  $X(t)$ , pelas seguintes equações:

- Na forma discreta:

$$F(X_t) = X_{t+1} - X_t \tag{2.1}$$

- Na forma contínua:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{X} = F(X(t)) \tag{2.2}$$

$F(.)$  é denominada Função Crescimento e representa a variação do estoque do recurso no tempo.

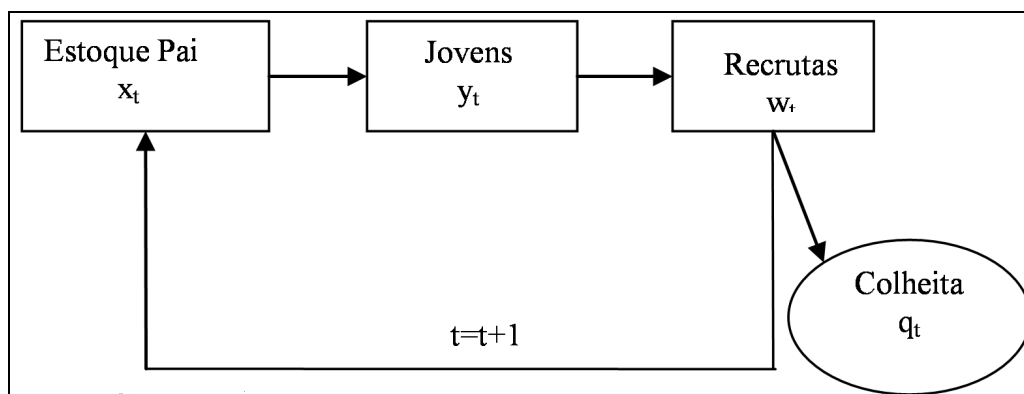
Neste trabalho, os conceitos de Função Crescimento e Estoque do Recurso são de grande importância, já que serão associados ao modelo de otimização em busca da maximização do Benefício Líquido. No modelo, a Função Crescimento será considerada como a variação do Estoque de área cultivada com arroz irrigado.

Nos itens a seguir, será desenvolvida toda fundamentação da Teoria dos Recursos Naturais Renováveis, aplicada sobre uma equação denominada logística. Outros conceitos da Economia também serão aplicados, tais como Benefício Líquido, Receita e Custo.

Cabe salientar que não foram encontrados na literatura pesquisada outros trabalhos que utilizassem a Teoria dos Recursos Naturais Renováveis pra resolver problemas relacionados com as externalidades. Também é muito raro encontrar algo sobre esta própria teoria em publicações nacionais. Por este motivo, ela foi desenvolvida em detalhes neste trabalho.

### 2.2.1- Função Crescimento

Hanley *et al.* (1997) descrevem o modelo de crescimento dos recursos renováveis para a forma discreta conforme a figura 2.3.



**Figura 2.3: Ciclo de Uma População Simples**

Fonte: Hanley *et al.* (1997)

Neste modelo, o estoque pai  $x_t$  origina um numero de jovens  $y_t$  que após se tornam recrutas  $w_t$ . Alguns desses recrutas são colhidos, mas outros “escapam” para formar o estoque pai no próximo período.



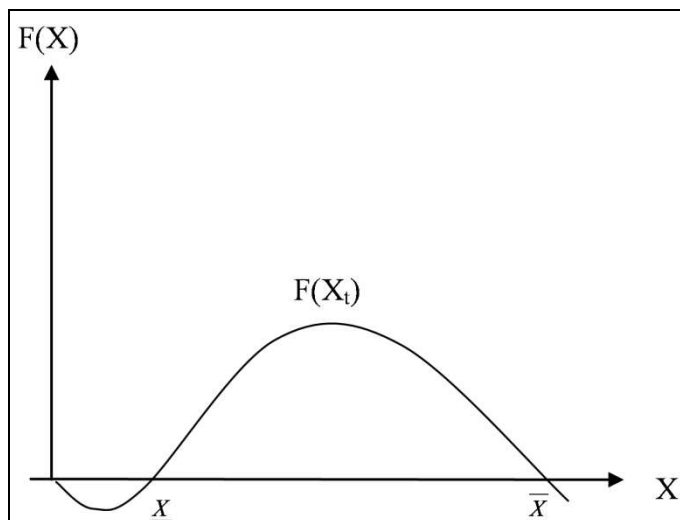
Conrad e Clark (1992) definem a função crescimento para um recurso natural renovável no intervalo  $X \geq 0$  e assume que existem 2 valores  $\underline{X} < \bar{X}$  para os quais:

$$F(X) \leq 0 \dots \dots \dots \text{se} \dots 0 \leq X \leq \underline{X}$$

$$F(X) > 0 \dots \dots \dots \text{se} \dots \underline{X} \leq X \leq \bar{X}$$

$$F(X) < 0 \dots \dots \dots \text{se} \dots \bar{X} \leq X$$

- Se  $\underline{X} = 0$  e  $F(\cdot)$  é côncava, a função crescimento é dita puramente compensatória. A taxa de crescimento é  $r(X) = F(X)/X$ .
- Se  $\underline{X} = 0$  e  $F(\cdot)$  é inicialmente convexa e depois côncava (figura 2.4), a função crescimento exibe uma depensação crítica e  $\underline{X}$  é chamado de população mínima viável.



**Figura 2.4: Gráfico de Uma Função Crescimento**

Fonte: Conrad e Clark (1992)

Existem muitas possíveis funções  $F(\cdot)$ . Uma das mais simples e mais conhecidas é a equação logística, citada por vários pesquisadores, dentre os quais Duarte (1991) e Hanley *et al.* (1997), e dada por:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{X} = F(X(t)) = rX(t) \left( 1 - \frac{X(t)}{K} \right) \tag{2.3}$$

Onde:

- $r$ : taxa de crescimento intrínseco
- $K$ : capacidade de suporte ambiental;

Para Lustosa *et al.* (2003) a capacidade de suporte  $K$  “é o estoque máximo que pode ser mantido indefinidamente sem comprometer a capacidade de regeneração do recurso.”

Segundo Hanley *et al.* (1997) a função logística padrão é puramente compensatória, isto é, a taxa de crescimento proporcional,  $\dot{X} / X$ , é uma função decrescente de  $X$ . Para Conrad e Clark (1992),  $\bar{X} = K$  é um equilíbrio estável global.

Duarte (1991) escreve a equação logística na forma discreta como uma equação de diferenças:

$$X_{t+1} - X_t = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) \quad (2.4)$$

Duarte (1991) ainda cita que a função logística exhibe o seguinte comportamento:

- Se  $0 < r \leq 1$  a função aproxima-se de  $K$  sem oscilar;
- Se  $1 < r \leq 2$  a população cresce e tem uma oscilação decrescente em torno de  $K$  se aproximando deste;
- Se  $2 < r \leq 2,449$  então a população oscila ciclicamente em torno de  $K$  (ciclo de 2 pontos);
- Se  $2,449 < r \leq 2,570$  a população oscila em torno de  $K$  com  $2^n$  ( $n > 1$ ) pontos (o valor de  $n$  depende de  $r$ );
- Se  $r > 2,570$  a população oscila de maneira irregular em torno de  $K$ . este fenômeno é conhecido como “Teoria do Caos”.

Conrad e Clark (1992) descrevem outra função  $F(\cdot)$ , a Função de Gompertz, dada por:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{X} = F(X(t)) = rX(t) \ln\left(\frac{K}{X(t)}\right) \quad (2.5)$$

### 2.2.2- Função de Produção e Função Exploração

Hanley *et al.* (1997) citam que a economia dos recursos naturais renováveis foi desenvolvida para o gerenciamento da pesca, mas a teoria tem sido estendida a exploração de outras populações de animais e vegetais.

Conrad e Clark (1992) descrevem que a função de produção para recursos naturais renováveis pode ser expressa como:

$$Y(t) = H(E(t), X(t)) \quad (2.6)$$

Onde:

- $Y(t)$ : taxa de retirada (colheita);
- $X(t)$ : estoque do recurso;
- $E(t)$ : “esforço” (medida agregada de várias entradas econômicas dedicadas à colheita)

Conrad e Clark (1992) ainda mencionam que uma função de produção comumente usada em gerenciamento de pesca é:

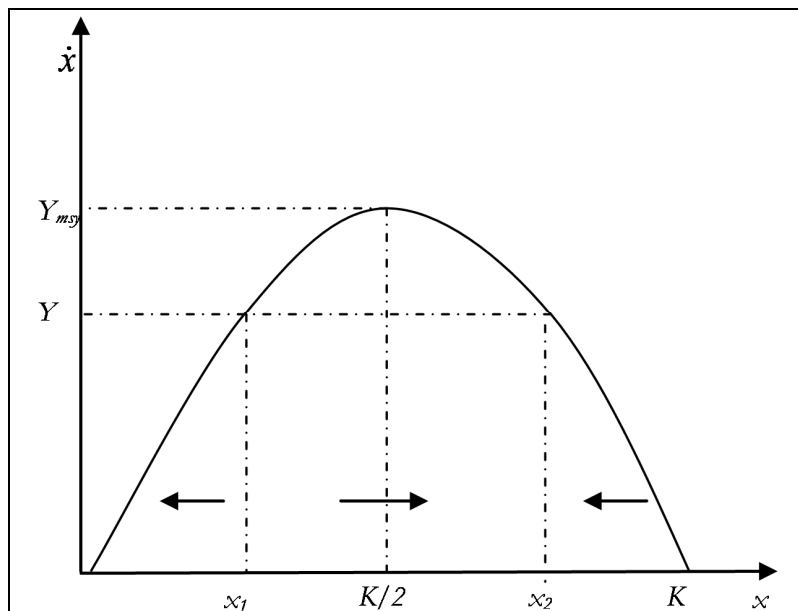
$$Y(t) = qE(t)^\alpha X(t)^\beta \quad (2.7)$$

Onde  $q$  é uma constante. Será usado  $\alpha, \beta=1$ .

Para Duarte (1994), em modelos bioeconômicos tradicionais, se o sistema é globalmente estável implica assumir que o estoque do recurso deve tender assintoticamente para um nível de equilíbrio  $X$ , que é solução da equação abaixo: Já Conrad e Clark (1992) apontam que a taxa de mudança no estoque do recurso deve refletir o crescimento e a retirada do mesmo. Então:

$$X_{t+1} - X_t = F(X_t) - Y_t \quad \text{e} \quad \dot{X} = F(X(t)) - Y(t) \quad (2.8)$$

Para um instante, se a taxa de retirada é constante e a curva de crescimento é logística, existem dois pontos de equilíbrio,  $x_1$  e  $x_2$ . O equilíbrio resultante depende do estoque inicial. Se o estoque inicial está acima de  $x_2$ , a retirada o reduz até que esta se iguale ao crescimento do estoque. Se o estoque está acima de  $x_1$ , a taxa de crescimento excede a retirada e a população aumenta até  $x_2$ . Se o estoque é menor que  $x_1$ , então a retirada reduz o estoque. Logo, segue que  $x_2$  é um equilíbrio estável e  $x_1$  é um equilíbrio instável. O nível de retirada  $Y_{msy}$  representa a colheita máxima sustentável e para a curva logística isto ocorre em  $x=K/2$  (HANLEY *et al.*,1997). A Figura 2.5 simplifica estes processos.



**Figura 2.5: O Efeito da Colheita em Mudanças Populacionais**

Fonte: Hanley *et al.* (1997)

A função exploração (sustentável) é um equilíbrio conceitual que exprime a retirada sustentável como uma função do esforço. Isso significa que  $X$ ,  $Y$  e  $E$  devem ser constantes no tempo (CONRAD e CLARK, 1992). Então:

$$\dot{X} = F(X) - Y = 0 \quad (2.9)$$

$$Y = H(E, X) \quad (2.10)$$

Desenvolvendo matematicamente temos:

- Para a equação logística (chamado Modelo de Schaefer):

$$Y = qEX = qKE \left(1 - \frac{qE}{r}\right) \quad (2.11)$$

Conrad e Clark (1992) dizem que essa função é parabólica e para grandes esforços ( $E > r/q$ ) a retirada é zero. Se a taxa relativa de retirada ( $qE$ ) excede a taxa de crescimento intrínseco da população ( $r$ ), então a população caminha para a extinção.

- Para a equação de Gompertz (chamado modelo de Gompertz)

$$Y = qKE e^{-\left(\frac{q}{r}\right)E} \quad (2.12)$$

Dados de pesca consistem de uma série temporal de retiradas anuais  $Y_t$  e níveis de esforço  $E_t$ . Esses dados podem ser usados para obter uma estimativa da curva de exploração sustentável fazendo (CONRAD e CLARK, 1992):

$$\frac{Y}{E} = qK - \frac{q^2 K}{r} E = a - bE \dots \dots \text{para..Schaefer} \quad (2.13)$$

$$\frac{Y}{E} = qK e^{-\left(\frac{qE}{r}\right)} = a e^{-bE} \dots \dots \text{para..Gompertz} \quad (2.14)$$

Os coeficientes  $a$  e  $b$  podem ser estimados pela média de uma regressão linear.

### 2.2.3- Gerenciamento de Recursos Renováveis

Um dos objetivos do gerenciamento dos recursos renováveis é a manutenção do estoque  $X(t) \equiv X$  bem como fornecer uma retirada máxima sustentável ( $MSY$ ). Matematicamente, em termos do modelo contínuo, para maximizar a retirada sustentável  $Y=F(X)$ , requer  $F'(X)=0$ . Então, Conrad e Clark (1992) expressam isso da seguinte maneira:

- Para a função logística,  $F'(X)=0$  em:

$$X_{MSY} = K / 2 \quad e \quad Y_{MSY} = rK / 4 \quad (2.15)$$

- Para a função Gompertz,  $F'(X)=0$  em:

$$X_{MSY} = K / e \quad e \quad Y_{MSY} = rK / e \quad (2.16)$$

Para Lustosa *et al.* (2003), a primeira vista, manter o estoque em  $MSY$  no nível de produção máxima sustentável parece ser a melhor opção. No entanto, existem diversas objeções a esta opção:

- Trata-se de uma regra de origem biológica válida para uma espécie isolada e de comportamento padrão. As espécies ligadas entre si ou as espécies com grandes variações naturais não podem ser submetidas a uma exploração baseada no rendimento máximo sustentável;
- É baseada em critérios exclusivamente biológicos e não econômicos;
- O fato de deixar completamente de lado qualquer noção de custo leva a crer que o rendimento máximo sustentável não pode representar o "ótimo", de um ponto de vista econômico.

Conrad e Clark (1992) ainda acrescentam:

- *MSY* não é realmente sustentável em longo prazo devido à flutuação natural no estoque do recurso;
- *MSY* ignora completamente todas as considerações sociais e econômicas de gerenciamento de recursos renováveis;
- *MSY* também ignora o valor de preservação derivado dos usos não consuntivos do estoque do recurso.

Então, é necessário introduzirmos funções econômicas para descrevermos adequadamente o modelo.

Os economistas vêem os recursos naturais como um tipo de capital que deve ser gerenciado para maximizar seu valor para a sociedade. Logo, as considerações biológicas na forma de equações de crescimento tornam-se restrições para um problema de otimização dinâmica.

Assim, Conrad e Clark (1992) citam o desenvolvimento econômico e matemático desenvolvido a seguir.

Em um estado geral, a sociedade obtém benefícios do recurso que dependem da retirada (exploração)  $Y(t)$  e do estoque (ou população)  $X(t)$ .

Matematicamente:

$$U(t) = U(Y(t), X(t)), \quad (2.17)$$

Onde  $U(t)$  é o fluxo de benefícios sociais (ou utilidade) no instante  $t$ .

A maximização do valor presente dos benefícios é:

$$\max \int_0^T U(Y(t), X(t)) e^{-\delta t} dt \quad (2.18)$$

Onde  $\delta$  é a taxa de desconto.

Na forma discreta:

$$\max \sum_0^T \rho^t U(Y_t, X_t) \quad (2.19)$$

Onde  $\rho = 1/(1+\delta)$  é o fator de desconto.

A função benefício líquido  $U(.)$  será especificada para 2 casos: Preços constantes e demanda com inclinação decrescente.

**Preços constantes:** Sem o valor de preservação, o Benefício Líquido é equivalente a receita líquida. Se  $p$  é o preço unitário do recurso colhido e  $c$  o custo unitário do esforço então:

Receita Bruta:

$$R(t) = pY(t); \quad (2.20)$$

Custo Total:

$$C(t) = cE(t). \quad (2.21)$$

Logo:

$$U(X, E) = pY - cE \quad (2.22)$$

$$Y = H(X, E) \quad (2.23)$$

$$U(X, E) = pH(X, E) - cE \quad (2.24)$$

Então o problema de otimização torna-se:

$$\max \int_0^T \{ pH(X(t), E(t)) - cE(t) \} e^{-\delta t} dt \quad (2.25)$$

$$\text{s.a } \dot{X} = F(X(t)) - H(X(t), E(t)), \dots X(0) = X_0 \quad (2.26)$$

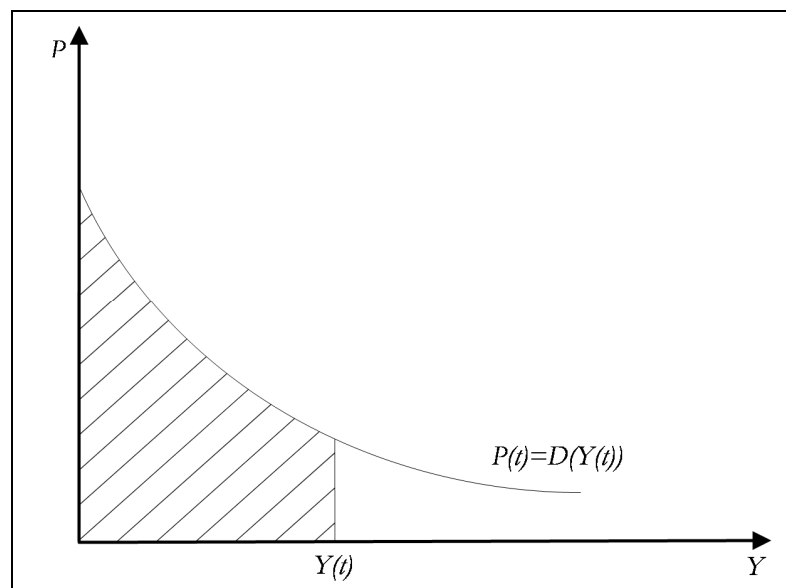


Para o caso discreto:

$$\max \sum_0^T \rho^t \{ p H(X_t, E_t) - c E_t \} \quad (2.27)$$

$$X_{t+1} - X_t = F(X_t) - H(X_t, E_t) \dots X_0 \text{..dado} \quad (2.28)$$

**Demanda com inclinação decrescente:** supondo que o preço por unidade colhida não é constante, mas varia de acordo com a curva de demanda  $p(t)=D(Y(t))$ , onde  $D'(\cdot) < 0$ . Assumindo que  $D(\cdot)$  é uma aproximação razoável para a curva de demanda, então o benefício social associado com a colheita  $Y(t)$  é a área mostrada no gráfico abaixo.



**Figura 2.6: Benefício da Colheita  $Y(t)$  quando  $P(t)=D(Y(t))$**

Fonte: Conrad e Clark (1992)

Matematicamente:

$$B(Y(t)) = \int_0^{Y(t)} D(s) ds \quad (2.29)$$

Se o custo unitário permanece constante em  $c$  e a função produção é linear com o esforço, o benefício líquido será:

$$N(t) = B(H(X(t), E(t))) - cE(t) \quad (2.30)$$

e a maximização do valor presente do Benefício Líquido será:

$$\max_0^T \int \{ B(H(X(t), E(t))) - cE(t) \} e^{-\delta t} dt \quad (2.31)$$

Na forma discreta:

$$\max \sum_0^T \rho^t \{ B(H(X_t, E_t)) - cE_t \} \quad (2.32)$$

### 2.3- EXTERNALIDADES

Em uma economia moderna, baseada na propriedade privada dos fatores de produção, as forças econômicas interagem para determinar os preços dos produtos transacionados em mercados (LANNA, 1991). Também, em um mercado competitivo, as funções econômicas são as ferramentas utilizadas na busca da alocação eficiente dos recursos.

Segundo Asafu-Adjaye (2005) para que as funções econômicas aloquem recursos eficientemente em um mercado competitivo, algumas condições são necessárias. Assume-se que o preço de mercado de um bem reflète o *custo de oportunidade* (definido como o valor de um recurso na próxima melhor alternativa de uso). Também se assume que os consumidores e os produtores têm informações perfeitas sobre os preços e outras variáveis relevantes. Ainda, para Mas-Colell *et al.* (1995), é assumido que as preferências de um consumidor sobre um grupo de bens são afetadas apenas pelas suas próprias escolhas, o mesmo ocorrendo para o processo de produção das firmas.

Quando alguma das condições não ocorre, acontecem as falhas de mercado, dentre as quais está a externalidade. Pindyck e Rubinfeld (1996) afirmam que quando externalidades estão presentes, o preço de um bem não necessariamente reflète o seu valor social. As externalidades podem ocorrer entre produtores, entre consumidores ou entre consumidores e produtores. As externalidades podem ser negativas, quando as ações de uma parte impõem custos a outra parte, ou positivas, quando a ação de uma parte beneficia outra parte.

Lanna (1991) diz que as externalidades são efeitos econômicos colaterais de um processo de produção ou de consumo que não são considerados na formação do preço de mercado do seu produto.

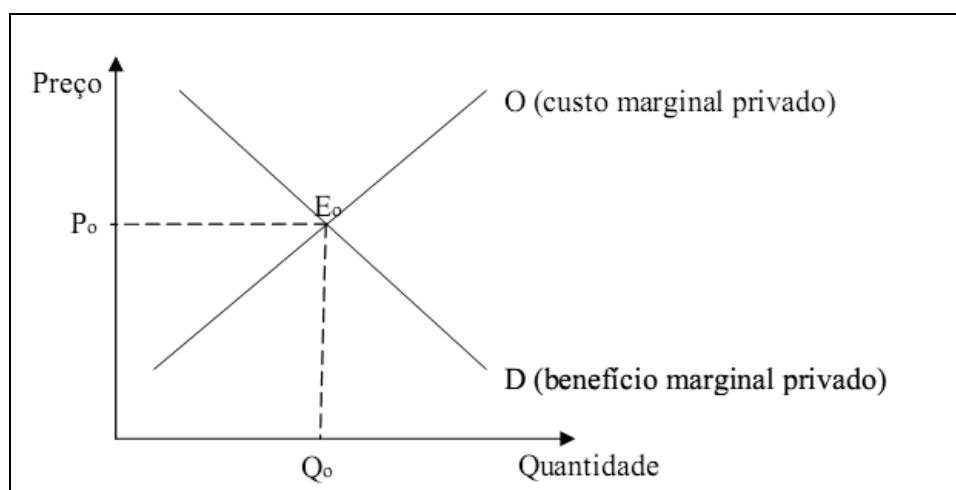
A tabela 2.1, adaptada de Sousa (2004), resume e define os custos privados e sociais.

**Tabela 2.1: Benefícios e Custos, Privados, Externos e Sociais**

<b>Benefícios e Custos</b>	<b>Externos (A)</b>	<b>Privados (B)</b>	<b>Sociais [(A)+(B)]</b>
<b>Benefícios</b>	A totalidade dos agentes beneficiados pelas externalidades positivas não paga por essas vantagens	Os ganhos são auferidos apenas pelos agentes que os financiam	Soma dos benefícios privados e externos
<b>Custos</b>	Os agentes que sofrem as externalidades negativas não são compensados	Os custos são pagos pelos agentes beneficiados	Soma dos custos privados e externos

Fonte: Sousa (2004)

Ainda segundo Sousa (2004), as curvas de oferta e demanda ajudam a explicar as externalidades. Considerando-se que o preço representa a disponibilidade a pagar pelo bem e, portanto, pode ser visto como o benefício decorrente do consumo de uma unidade adicional do bem ou serviço, isto é, o *benefício marginal privado*. A curva de oferta envolve os insumos exigidos para a produção dos bens e serviços e, portanto, pode ser interpretada como a curva de custo privado por unidade produzida, ou seja, *custo marginal privado*.

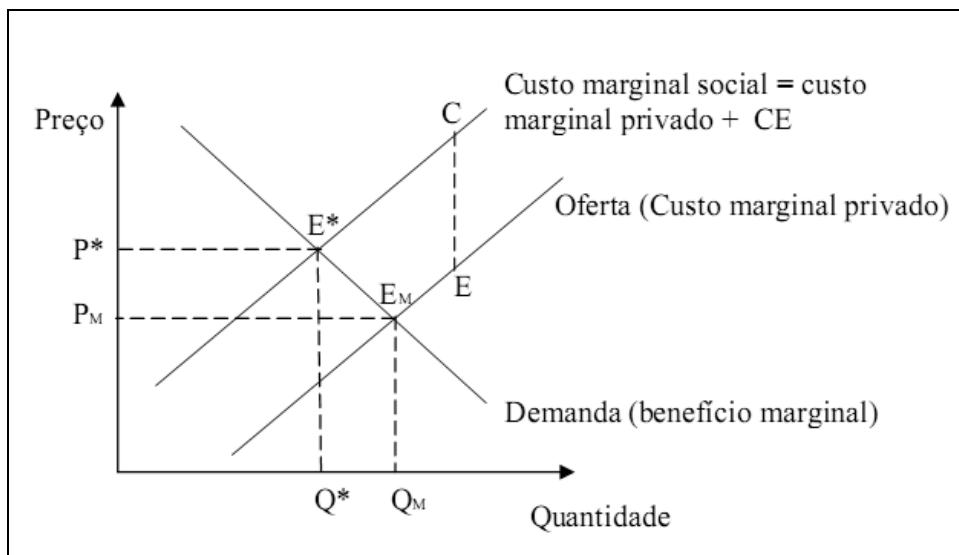


**Figura 2.7: Equilíbrio dos Mercados Competitivos**

Fonte: Sousa (2004)

O equilíbrio de mercado se dá quando o benefício marginal privado se iguala ao custo marginal privado. Pelo gráfico acima, fica claro que a quantidade produzida no equilíbrio é  $Q_0$  pelo preço  $P_0$ .

Segundo Sousa (2004), em presença de *externalidades negativas* o custo para a sociedade inclui tanto os custos privados de produção como os danos causados pelas externalidades (custos externos). Para cada nível de quantidade, o custo externo é acrescentado ao custo privado (CMP) para formar o custo social (CMS). Assim, a diferença vertical entre as curvas representa os custos externos (CE), por unidade produzida.

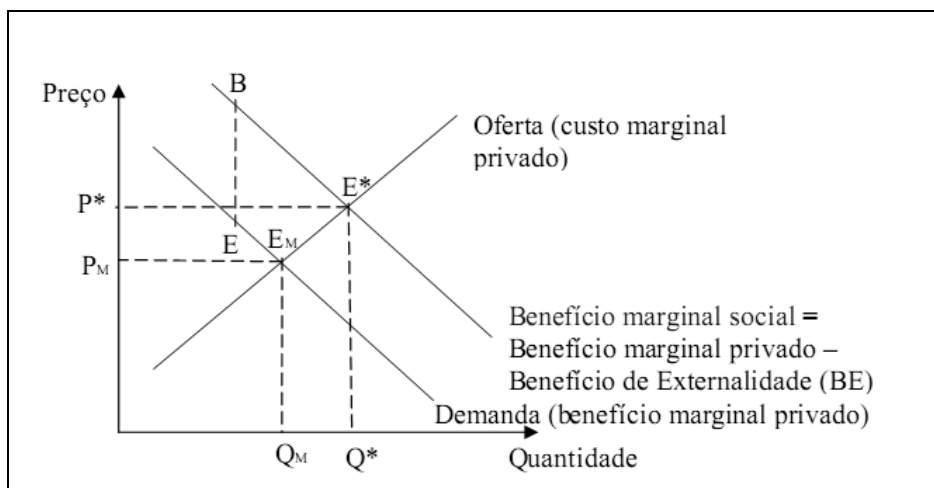


**Figura 2.8: Externalidades Negativas em Mercados Competitivos**

Fonte: Sousa (2004)

Pelo gráfico, quando se contabiliza o custo adicional, o preço e a quantidade transacionada deveriam ser respectivamente  $P^*$  e  $Q^*$ . A falha de mercado fica evidenciada pelo fato de o mercado gerar uma superprodução ( $Q_M$ ) e avaliá-la a preços inferiores ( $P_M$ ) aos seus custos totais de oportunidade.

Já em presença de *externalidades positivas*, os níveis de produção associados ao equilíbrio de mercado são inferiores aqueles que seriam socialmente ótimos, conforme evidencia a Figura 2.9.



**Figura 2.9: Externalidades Positivas em Mercados Competitivos**

Fonte: Sousa (2004)

Externalidades negativas estão presentes na cultura de arroz. Lavouras de arroz localizadas a montante de alguma cidade podem retirar água necessária (ou em excesso) para essa cultura. Em períodos de escassez, alguma cidade a jusante dessas lavouras pode ter problemas de abastecimento de água. Como a água é um bem de acesso livre, os produtores de arroz não incluem em seus custos os encargos com esse bem (não internalizam os custos externos, externalidades), gerando prejuízos a terceiros, neste caso, os cidadãos da cidade.

Casos como este são muito comuns no Rio Grande do Sul no período de verão. Exemplos deste tipo de externalidades são a mortandade de peixes e o comprometimento do abastecimento de água no Vale dos Sinos no verão de 2006 que obrigou a Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (SEMA), através do seu Conselho de Recursos Hídricos a expedir a Resolução 030/06 que estabelece critérios para a operação dos sistemas de bombeamento de água para irrigação na bacia do rio dos Sinos.

Neste trabalho, então, serão tratadas as externalidades negativas causadas pela cultura do arroz irrigado, através do uso sem controle da água, as quais serão incorporadas aos custos de produção desta atividade.

## 2.4- MODELAGEM E FERRAMENTAS DE OTIMIZAÇÃO

A representação da realidade é uma necessidade da sociedade moderna, seja pela impossibilidade de lidar diretamente com a realidade, seja por aspectos econômicos, ou seja, pela complexidade. Modelos são representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalência adequada (CAMPONOGARA, 2003). A palavra modelo possui muitas nuances em seu significado. De

modo geral pode ser compreendido como sendo “qualquer representação simplificada da realidade”, ou de um aspecto do mundo real que surja como interesse ao pesquisador, que possibilite reconstruir a realidade, prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução (CHRISTOFOLETTI, 1999).

O processo de identificar objetivos, variáveis e restrições para um dado problema é conhecido como modelagem (NOCEDAL e WRIGHT, 1999).

As etapas no desenvolvimento de um modelo são as seguintes (LINARES *et al.*, 2001):

- Identificação do problema: consiste no recolhimento e análise das informações relevantes para o problema;
- Especificação matemática e formulação: é a escrita matemática do problema, definindo suas variáveis, suas equações, sua função objetivo e seus parâmetros;
- Resolução: implantação de um algoritmo para obtenção da solução numérica ótima (muito próxima da matemática).

Reca *et al.* (2000) citam que muitas metodologias de engenharia de sistemas, particularmente modelagem matemática, tem sido usadas nas últimas décadas para otimização de projetos, planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos. Para eles, Modelos de simulação e otimização são duas categorias básicas de modelos de recursos hídricos. A principal diferença entre esses dois grupos de modelos é que a *alocação ótima* da água é independentemente determinada em cada intervalo de tempo único no primeiro modelo, enquanto no segundo, a análise é realizada usando intervalos de múltiplos períodos.”

Um modelo de otimização obtém os valores ótimos das variáveis de decisão de forma automática através de um algoritmo. Entretanto, pode-se utilizar um modelo de simulação para encontrar esses valores ótimos, mas será por tentativa e erro (BRAVO, 2005).

Nesta pesquisa será utilizado um modelo de otimização, para o qual existem técnicas de programação matemática, como a Programação Linear, para encontrar a solução desse modelo.

As seguintes definições são utilizadas para os elementos de um modelo de otimização usando técnicas de programação linear (CAMPONOGARA, 2003):

- Variáveis de Decisão: parâmetros cujos valores definem uma solução para o problema. Em um sistema de produção, esses parâmetros podem definir as quantidades produzidas e os recursos utilizados, por exemplo;
- Função Objetivo: é uma função das variáveis de decisão a ser minimizada ou maximizada;
- Restrições: um conjunto de funções que define o espaço factível de soluções.

Já para Kaufmann (1963), a função objetivo deve indicar uma meta a ser atingida, uma meta a ser melhorada, um limite que não pode ser excedido ou um conjunto de outros objetivos. As restrições devem indicar uma limitação sobre a qual se tem, ou não, controle. Os objetivos e restrições juntos constituem as restrições matemáticas.

Expresso na linguagem matemática, um exemplo de modelo de otimização pode ser assim representado:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && f(x) \\
 & \text{Sujeito} && a : \\
 & && g(x) \leq 0 \\
 & && h(x) = 0 \\
 & && x \in \mathfrak{R}^n
 \end{aligned}$$

Onde  $f: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  é a função objetivo,  $g: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^p$  e  $h: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^q$  são as restrições que limitam o espaço de soluções factíveis, e  $x$  é o vetor com as variáveis de decisão (CAMPONOGARA, 2003).

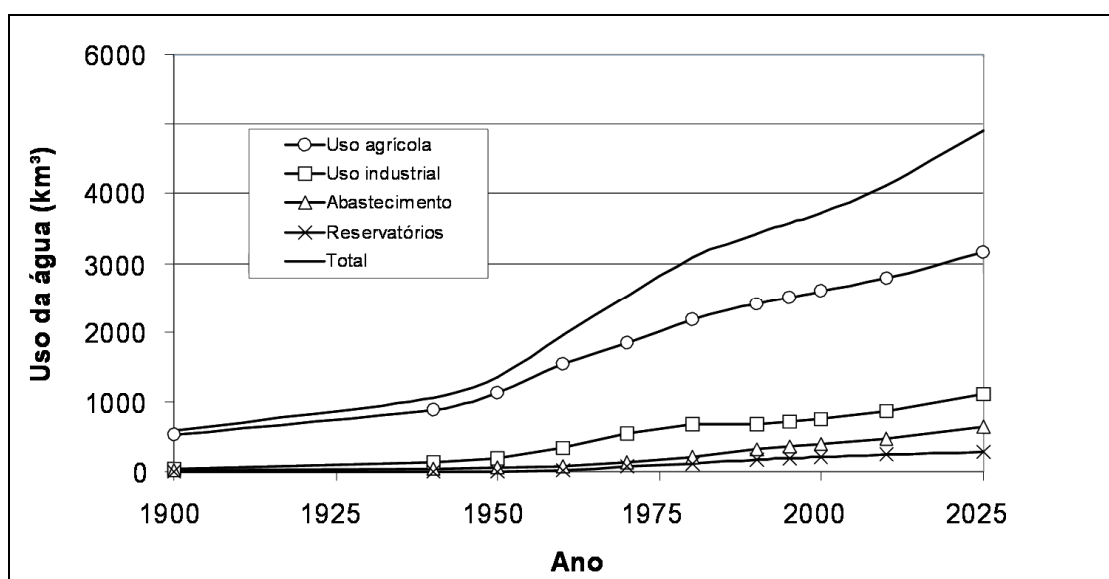
## 2.5- ANÁLISE ECONÔMICA ÁGUA-AGRICULTURA

O problema da demanda de água tem sido tratado por diversos pesquisadores (RECA *et al.* (2001), AMIR e FISHER (1999), MÜNIER *et al.* (2004), etc.) ao longo do tempo utilizando técnicas de modelagem para atingir esse objetivo, sendo as principais delas a simulação e a otimização de sistemas, técnicas puramente matemáticas. Já o uso do ferramental econômico, metodologia na qual basearemos este trabalho, ainda permanece pouco explorado nesse tipo de aplicação.

Lanna (2004) indica que a sociedade moderna ampliou consideravelmente a diversidade de usos das águas. O quadro tornou-se complexo com o aparecimento de demandas conflitantes. As disponibilidades de água podem ser inicialmente aproveitadas para o suprimento de demandas singulares através de projetos que visem ao atendimento de um único propósito.

Segundo dados de Shiklomanov (1997), para o ano de 1995, a atividade agrícola é apresentada como responsável pela captação de cerca de 70% de toda água utilizada no mundo. Ainda, as terras irrigadas, aproximadamente 16% das terras cultivadas no mundo, são responsáveis pela produção de cerca de 40% dos alimentos (ITURRI, 1999).

Na Figura 2.10 obtida de Shiklomanov (1997) percebe-se que a agricultura consome mais água que o somatório dos outros setores. E dentre todas culturas, a do arroz irrigado é uma das maiores usuárias. Conforme EMBRAPA (2007), “o cultivo do arroz irrigado, por submersão do solo, necessita em torno de 2000 l (2 m<sup>3</sup>) de água para produzir 1 kg de grãos com casca, estando entre as culturas mais exigentes em termos de recursos hídricos”.



**Figura 2.10: Consumo de água por setor de consumo**

Fonte: Shiklomanov (1998)

Como vemos, estratégias de planejamento que gerenciem os conflitos entre os diversos usuários da água são de fundamental importância. Nesse contexto, uma metodologia que apresente uma maior eficiência na irrigação no cultivo de arroz seria de grande utilidade.

Amir e Fisher (1999) utilizaram um modelo para otimização da demanda de água, o AGSM (agricultural sub-model), e o aplicaram inicialmente para o distrito de Bet



Shean, Jordan Valley, em Israel. O AGSM usa os seguintes dados: áreas de terra disponíveis, água requerida por unidade de área de terra para diferentes culturas e renda por unidade de área de terra gerada pelo crescimento dessas culturas. O modelo trabalha com preços ou quantidade alocada de água e gera um modelo de culturas que maximizam a renda agrícola.

A representação matemática do AGSM é a seguinte:

$$Z = \sum_j X_j [WRC_j - \sum_i (P_i W_{ij})] \quad (2.33)$$

Onde :

- $WRC_j$  é a contribuição água-relacionada (water-related contribution) da atividade  $j$ ;
- $P_i$  é o preço de um metro cúbico de água do tipo  $i$  (a água pode ser água doce, água de superfície, água salina e água reciclada);
- $W_{ij}$  é a demanda de água do tipo  $i$  por unidade de área da atividade  $j$ ;
- $X_j$  é a área total usada pela atividade  $j$ .

Essas são as variáveis de decisão utilizadas pelo modelo. As restrições são as seguintes:

- Área:

$$\sum X_{jk} \leq A_k \quad (2.34)$$

Onde  $k$  é a categoria das atividades (todas atividades, toda atividades irrigadas, culturas do mesmo grupo, culturas do mesmo grupo irrigadas, etc.),  $X_{jk}$  é a área da atividade  $j$  na categoria  $k$  e  $A_k$  é a área total disponível para a categoria  $k$ .

- Água:

$$\sum W_{ij} \times X_j \leq W_i \quad (2.35)$$

Onde  $W_i$  é a quantidade total de água do tipo  $i$  disponível.

Já Münier *et al.* (2004) utilizam modelagem econômica e ecológica combinadas para avaliar os custos da troca de áreas agrícolas por vegetação e comparar com os benefícios ecológicos dessa troca. O modelo proposto por eles integra informações espaciais e não-espaciais obtidas de banco de dados agrícolas da Dinamarca, sendo que a área de estudo foi locada entre os municípios de Bjerringbro e Hvorslev, no centro da península de Jutland.

Münier *et al.* (2004) primeiramente trabalham em separado com o modelo econômico e o modelo ecológico propostos, e posteriormente os combinam. O modelo econômico é usado para estimar os resultados econômicos de cada unidade agrícola, baseado em informações do uso da terra (tipos de cultura), grupo de animais e principal tipo de solo da unidade agrícola. O modelo econômico é descrito matematicamente pela renda da unidade agrícola  $i(\pi_i)$ :

$$\pi_i = \sum_{j=1} a_{ij} \pi_j^C + \sum_{h=1} h_{ih} \pi_h^H \quad (2.36)$$

Onde  $a_{ij}$  é o número de hectares da unidade agrícola  $i$  com cultura  $j$ ,  $\pi_j^C$  é o lucro médio por hectare da cultura  $j$ ,  $h_{ih}$  é o número de animais do tipo  $h$  na unidade agrícola  $i$  e  $\pi_h^H$  é o lucro médio por animal do tipo  $h$ .

## 2.6- SISTEMAS DE CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

Os principais sistemas de cultivo de arroz irrigado<sup>1</sup> no Rio Grande do Sul são:

- **Sistema Pré-germinado** No Rio Grande do Sul define-se sistema pré-germinado como um conjunto de técnicas de cultivo de arroz irrigado adotadas em áreas sistematizadas onde as sementes, previamente germinadas, são lançadas em quadros nivelados e inundados. O sistema pré-germinado apresenta as seguintes vantagens: controle mais eficiente do arroz vermelho, menor dependência do clima para o preparo do solo e semeadura, menor consumo de água para irrigação e permite o planejamento mais efetivo das atividades da lavoura;

---

<sup>1</sup> As informações sobre os sistemas de cultivo foram obtidas do site sobre sistemas de produção da EMBRAPA. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/>>

- **Sistema Convencional (a lanço e em linha):** O sistema convencional ou tradicional de cultivo é utilizado, hoje, em toda área cultivada com arroz irrigado no Paraná, em cerca de 45% da área cultivada no Rio Grande do Sul, e de apenas 5% da área utilizada com a cultura em Santa Catarina. É um sistema bastante conhecido e, de maneira geral, envolve os preparos primário e secundário do solo, a semeadura do arroz a lanço ou em linha, com semeadoras convencionais, ou com as utilizadas em plantio direto (devidamente reguladas), e o estabelecimento de lâmina de água sobre o solo, 20 a 35 dias após a emergência das plântulas;
- **Sistema de Plantio Direto e Sistema de Cultivo Mínimo:** Nas variantes mais utilizadas no arroz irrigado, Plantio Direto, com preparo de solo no verão, e Cultivo Mínimo, com preparo do solo no inverno-primavera, ocorre um revolvimento reduzido do solo, antecipado à semeadura da cultura. Como vantagens destes sistemas sobre o convencional destacam-se a redução nos custos de produção e a melhor integração da agricultura com a pecuária.

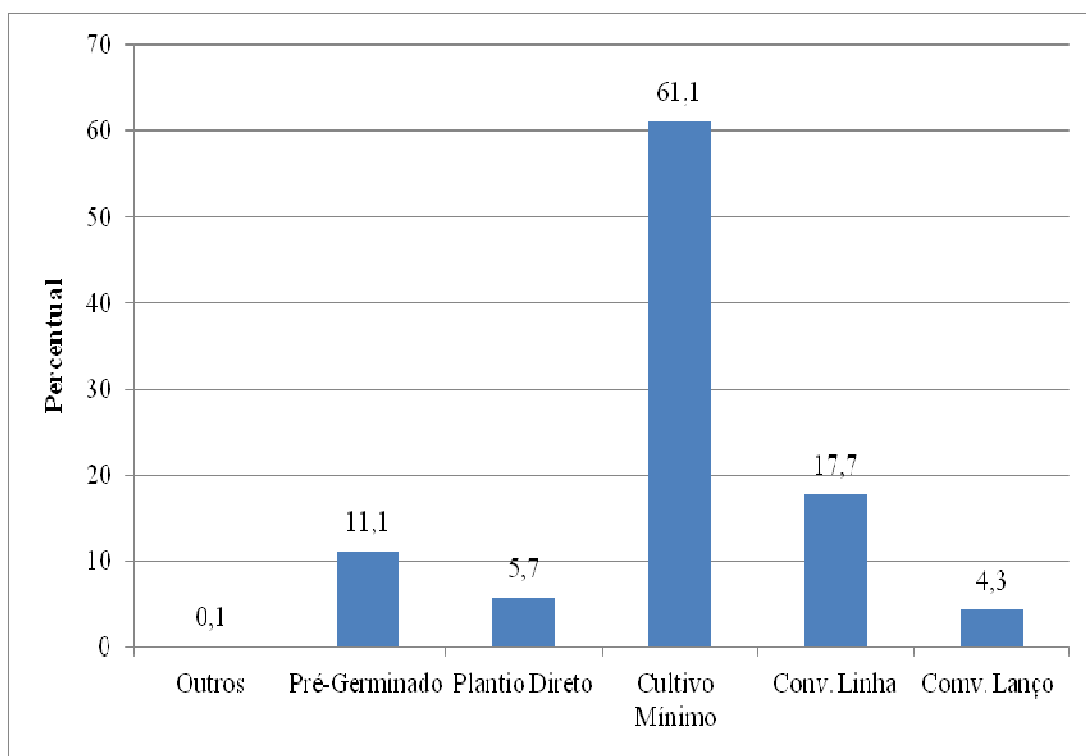
Segundo EMBRAPA (2008), para o cultivo do arroz nos diferentes sistemas de produção, são necessárias práticas distintas de preparo do solo, as quais variam com a textura, a estrutura e o grau de compactação, bem como a disponibilidade de equipamentos. Ainda segundo EMBRAPA (2008), para o cultivo de arroz irrigado são distintos dois sistemas de preparo do solo: o do solo seco e do solo alagado.

Outro fator importante a ser levado em consideração é a Sistematização conforme afirma Sosbai (2005) *apud* Helfer (2006):

Para o aproveitamento eficiente e racional dos solos para cultivo de arroz há necessidade de condicioná-los anteriormente a um processo de sistematização do terreno, que consiste na criação de um sistema funcional de manejo que vai desde a remoção de resíduos vegetais, abertura de canais de drenagem e irrigação, construção de estradas internas, regularização da superfície do terreno, em nível ou desnível e entaipamento até a construção de estruturas complementares, conforme a necessidade de cada projeto (SOSBAI, 2005).

Helfer (2006) afirma que, para a maioria dos autores, os sistemas de cultivo podem ser agrupados em dois grandes grupos: aqueles em que o estabelecimento do arroz se dá em área previamente inundada e aqueles em que este estabelecimento se dá em solo seco. No preparo em solo inundado enquadram-se os sistemas de cultivo Pré-germinado, 'Mix' e Transplante de Mudas, sendo que os dois últimos têm pouca representatividade no Rio Grande do Sul. Já no grupo do preparo em solo seco encontram-se os Sistemas Convencional, Cultivo Mínimo e Plantio Direto.

A representatividade de cada Sistema de Produção para o Rio Grande do Sul é mostrada na figura 2.11, obtida de IRGA (2005):



**Figura 2.11: Sistemas de Cultivo de Arroz por Área no Rio Grande do Sul**

Fonte: IRGA (2005)

## 2.7- FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Problemas de otimização e simulação são resolvidos através de programação linear, não linear, etc. e geralmente envolvem grande quantidade de equações, o que torna impraticável a busca por soluções sem o auxílio de *softwares*. Para Dellink (2004), vários grupos de modelos econômicos podem ser escritos como sistemas de equações, incluindo análise de sistemas, otimização não-linear e modelagem de equilíbrio.

O *GAMS* (General Algebraic Modelling System) é um sistema de modelagem de alto nível para programação matemática e otimização. Ele consiste de uma compilação de linguagens e de um grupo de “*solvers*” de alta performance (GAMS, 2007).

O *GAMS* será utilizado para encontrar as soluções do problema de otimização do modelo proposto nesta pesquisa.

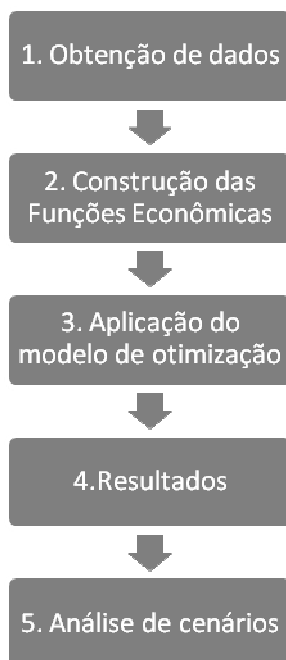
Como exemplo da utilização do *GAMS* pode-se citar a pesquisa desenvolvida por Bandeira (2006) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, no contexto dos recursos não-renováveis, onde a aplicação deste *software* foi utilizada para

quantificar os custos ambientais e para realizar a análise de viabilidade econômica de projetos de mineração em área carbonífera do estado de Santa Catarina.

Assim, neste trabalho será utilizado o *GAMS* para otimizar a área plantada de cada sistema de cultivo de arroz na bacia, através de sua aplicação para solução do modelo proposto.

### 3- METODOLOGIA

A metodologia aplicada no presente trabalho seguiu as etapas descritas no fluxograma abaixo, as quais serão expostas em detalhes na seqüência.



**Figura 3.1: Fluxograma Metodológico**

#### 3.1- OBTENÇÃO DOS DADOS

A coleta de dados foi realizada junto aos órgãos IRGA (Instituto Rio Grandense do Arroz), COMITÊ PARDO e SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento) do Ministério das Cidades. No IRGA foram buscados dados da atividade orizícola, tais como séries temporais de áreas utilizadas pela rizicultura bem como de cada um dos sistemas de cultivo do arroz irrigado, séries temporais de custos de produção de arroz e do preço obtido pela sua venda. Junto ao COMITE PARDO os dados de interesse foram, entre outros, a disponibilidade hídrica, o consumo de água pela atividade orizícola e séries temporais de vazões. Já no SNIS foram obtidos dados tarifários da água tratada para abastecimento urbano, os quais foram utilizados para o cálculo do custo das externalidades geradas pela rizicultura.

### 3.1.1- Dados da Bacia

Como dados de entrada do modelo de otimização proposto neste trabalho foram utilizados dados de vazão, os quais funcionaram como um limite da quantidade de água que pode ser utilizada pela rizicultura. Como esse limite é desconhecido, propõe-se utilizar algumas Vazões Ecológicas, as quais foram obtidas de uma curva de permanência para a área de estudo e denominadas Vazões de Referência ( $Q_{ref}$ ).

Também foi utilizada a série temporal de Área Cultivada Total de Arroz na Bacia ( $X(t)$ ) e seu valor inicial ( $Xini$ ). A área de cada uma das Tecnologias de Produção (Sistemas de Cultivo) ( $x(i,t)$ ) foi a variável a ser encontrada.

Os seguintes parâmetros da bacia hidrográfica foram considerados:

- Tempo expresso em anos ( $t$ );
- Tipo de Sistema de Cultivo (Tecnologia de Produção) ( $i$ );
- Área Cultivada com Arroz Irrigado Total Inicial da Bacia ( $Xini$ );
- Área Cultivada com Arroz Irrigado Total da Bacia ( $X(t)$ );
- Área de cada Tecnologia de Produção ( $x(i,t)$ );
- Variação da Área Plantada Total de arroz irrigado na Bacia ( $F(t)$ );
- Vazão de Referência (Vazão Ecológica) ( $Q_{ref}$ );

### 3.1.2- Dados da Orizicultura

Para o cálculo das externalidades foi necessário comparar em cada tempo a área plantada de arroz na bacia com os valores da Vazão de Referência (Vazão Ecológica), para se obter o excesso de água consumido. A série temporal de área plantada de arroz foi convertida em uma série temporal de vazões através do uso de coeficientes de consumo de água por hectare para cada sistema de cultivo.

Também foram utilizados dados da Vazão Consumida ( $Q(i)$ ) pela irrigação do arroz para cada Sistema de Cultivo, os quais, após multiplicados pela área plantada de arroz na bacia em cada tempo, puderam ser comparados com cada uma das Vazões Ecológicas adotadas, buscando quantificar a água utilizada em excesso.

Os seguintes parâmetros orizícolas foram considerados:

- Tipo de Sistema de Cultivo (Tecnologia de Produção) ( $i$ );
- Preço do Arroz em cada tempo ( $P(t)$ );
- Custo de Produção de Arroz para cada Sistema de Cultivo ( $C(i,t)$ );
- Vazão consumida por cada Tecnologia de Produção ( $Q(i)$ );

### 3.1.3- Dados do Custo de Oportunidade

Segundo Burch e Henry (1974), foi Frederich Von Wieser (1851-1926) quem criou o conceito de Custo de Oportunidade para definir o valor de um recurso produtivo em qualquer uso que lhe fosse dado. Frederich Von Wieser definiu o Custo de Oportunidade como “a renda líquida gerada pelo uso de um bem ou serviço no seu melhor uso alternativo”.

Então, para quantificar as externalidades geradas pela rizicultura foi utilizado o valor unitário do custo de oportunidade, multiplicado pela quantidade de água utilizada acima da Vazão de Referência.

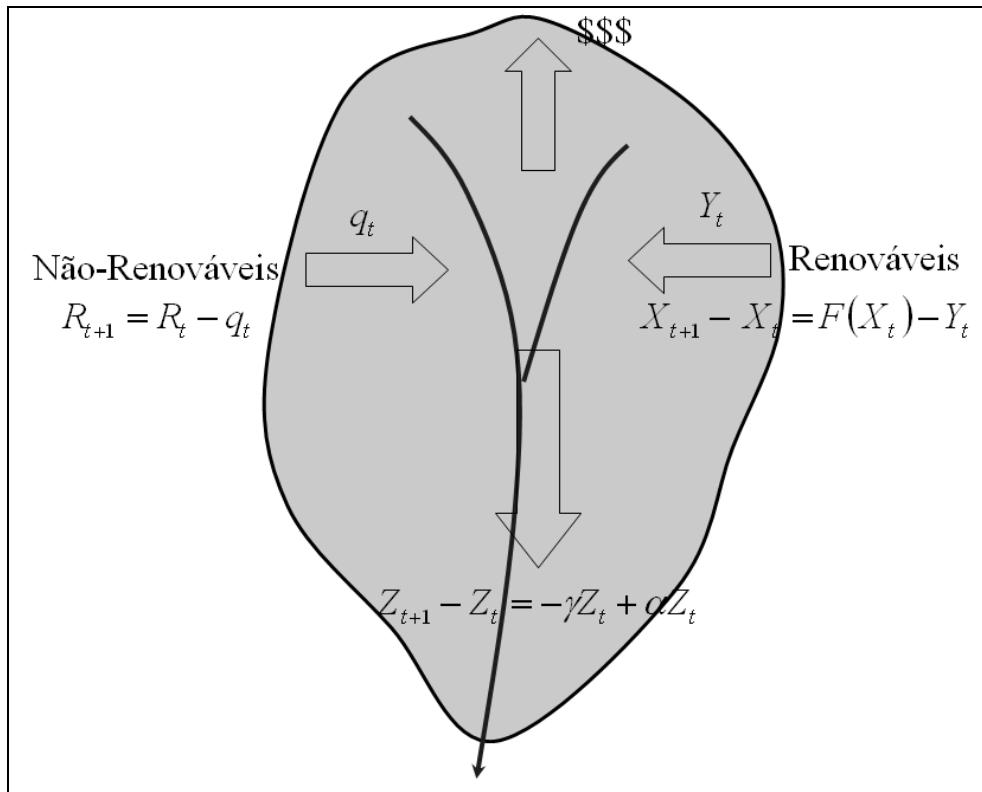
Para calcular as externalidades foram considerados os seguintes parâmetros:

- Valor unitário do Custo de Oportunidade;
- Vazão utilizada acima da  $Q_{ref}$  ( $Ext(t)$ );
- Custo unitário das externalidades ( $C_{ext}$ ).

## 3.2- CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES ECONÔMICAS

A figura 3.2 mostra esquematicamente a entrada e saída de recursos econômicos (renováveis e não renováveis) em uma bacia hidrográfica onde  $Z$  representa o somatório destes recursos, que geram rendimentos na bacia.





**Figura 3.2: Fluxo de Recursos Econômicos em Uma Bacia Hidrográfica**

Fonte: Mendes (2004)

Segundo Mendes (2004), quando a função crescimento do recurso é a equação Logística, o comportamento dos recursos renováveis na bacia pode ser descrito pela função:

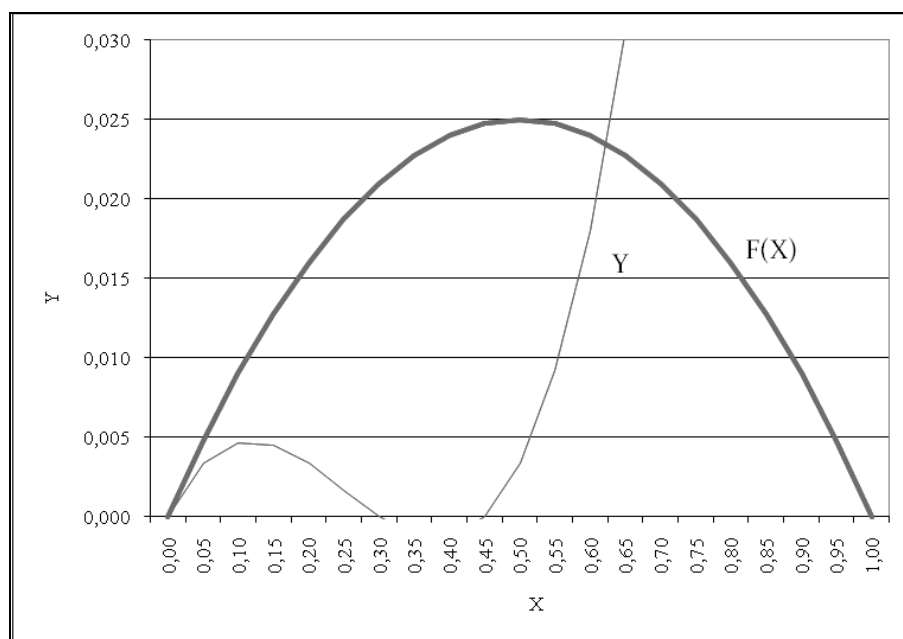
$$Y = \frac{[\delta - r(1 - 2X/K)][X.(p.q.X - c)]}{c} = \phi(X)$$

$\Downarrow$   
 Parâmetros bio-econômicos  
 $F(X) , \pi(X,Y) , \delta$   
 $r , K , p , q , c , \delta$

Onde  $F(X)$  é a função crescimento do recurso, dependente do estoque  $X$ , e  $\pi(X,Y)$  é a função lucro dependente da taxa de crescimento do recurso ( $r$ ), da capacidade ambiental ( $K$ ), do preço, custo e taxa interna de retorno do recurso (*respectivamente*  $p$ ,  $c$  e  $\delta$ ) e da constante  $q$ .

Problemas simples deste tipo podem ser resolvidos pelo Excel, como o exemplo a seguir, onde temos como dados de entrada:  $r=0,1$ ;  $K=1$ ;  $q=0,01$ ;  $p=200$ ;  $c=0,6$  e  $\delta=0,01$  e o estoque do recurso ( $X$ ) variando de 0 até 1.

Resolvendo com o Excel obtém-se o gráfico abaixo, o qual mostra a função crescimento  $F(X)$  e a função crescimento biológico do recurso  $Y$ .



**Figura 3.3: Função Crescimento e Função Crescimento Biológico do Recurso**

Fonte: Mendes (2004)

Neste trabalho, foi utilizada como Função Crescimento ( $F(X)$ ) a função que melhor se ajustar aos dados, considerando como Estoque do Recurso Natural Renovável ( $X(t)$ ) a Área Cultivada com Arroz Irrigado Total da Bacia. A Função Crescimento não foi expressa em função do Estoque ( $X$ ) e sim em função do tempo, sendo representada por  $F(t)$ .

Para cada série temporal dos dados descritos no item 3.1 foram ajustadas funções através do uso de ferramentas matemáticas (método dos mínimos quadrados) e de *softwares* (tais como o Excel), visando obter os melhores Coeficientes de Correlação ( $R^2$ ), que mostra a qualidade do ajuste.

Assim, a primeira Função Econômica ajustada foi a Função Crescimento  $F(t)$ . Desta forma, partindo-se de um valor inicial de estoque do recurso  $Xini$ , a equação Recursos Naturais Renováveis pode ser calculada para qualquer tempo. Matematicamente:

$$X(t+1) - X(t) = F(t) \tag{3.1}$$

$F(t)$  e  $Xini(X(t=0))$  conhecidos.

As outras Funções Econômicas criadas foram:

- Função Custo de Produção  $C(t)$ ;
- Função Preço  $P(t)$ ;
- Função Custo de Oportunidade (Custo das externalidades)  $C_{ext}(t)$ ;

### 3.3- APLICAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

As áreas  $j$  que cultivam arroz na bacia, com os vários sistemas de cultivo de arroz “ $i$ ”, estão representadas na figura 3.4. Cada sistema de cultivo consome uma determinada quantidade de água representada por  $Q(i)$ , que multiplicada por suas áreas cultivadas resultam na água total consumida pela cultura. O problema é que nem sempre existe quantidade suficiente de água disponível. Também na figura 3.4 está imposto um limite para o gasto de água da cultura, representado pela Vazão de Referência  $Q_{ref}$ , além da qual será cobrado um valor relativo ao gasto excessivo.

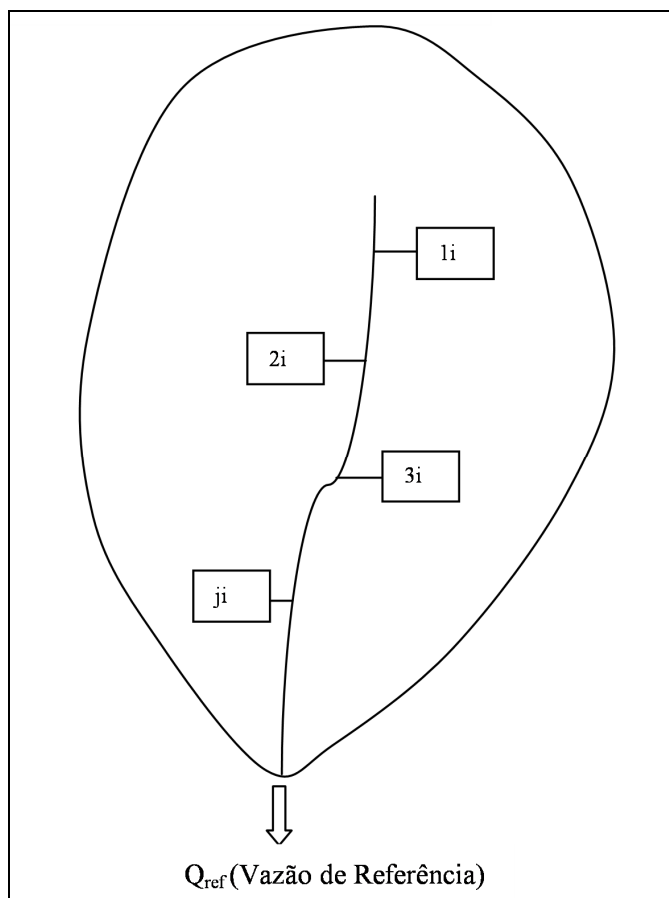


Figura 3.4: Áreas “ $j$ ” dos Sistemas de Cultivo “ $i$ ” na Bacia

Este gasto excessivo de água utilizada pela cultura foi tratado neste trabalho como a externalidade, o que significa que a utilização deste bem por um usuário causará efeito sobre outro.

Tanto as Vazões de Referência como a vazão consumida foram convertidas em unidades de “m<sup>3</sup>”, para então serem comparadas. Logo, teremos em cada tempo a água utilizada em excesso (externalidades), caso a vazão consumida ultrapasse a Vazão de Referência. A Figura 3.5 mostra este procedimento.

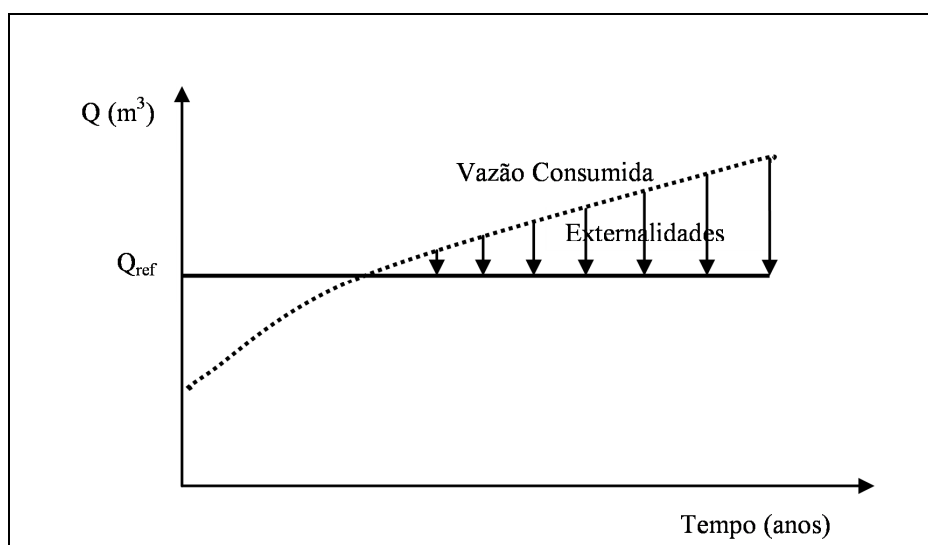


Figura 3.5: Externalidades geradas pelo uso de água acima da  $Q_{\text{ref}}$

Da Economia, sabe-se que as pessoas tendem a maximizar seus Benefícios Líquidos. Bandeira (2006) elaborou a figura 3.6 onde mostra que o Máximo Benefício Líquido ( $W$ ) ocorre em algum ponto entre as curvas da Receita Total e os Custos Totais.

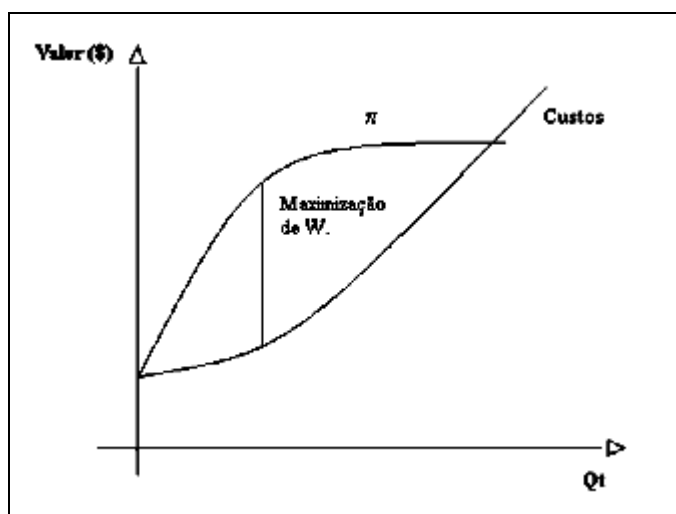


Figura 3 6: Maximização do Benefício Líquido

Fonte: Bandeira (2006)

Na aplicação do modelo, a Maximização do Benefício Líquido foi realizada para a Bacia em estudo, considerando um determinado período de tempo.

Para isto, foi utilizado o método do Valor Presente Benefício Líquido (VPBL), que executa o somatório dos benefícios em cada tempo, trazendo-os para um mesmo tempo de referência através da aplicação de um fator de desconto.

$$W = \sum_{t=0}^T \rho^t W^t \Rightarrow W^t = B^t - C^t \quad (3.2)$$

$$\rho = \frac{1}{(1 + \delta)}, \delta > 0 \quad (3.3)$$

Onde,  $W$  é o Benefício Líquido,  $B$  é a Receita Total (Benefício Total),  $C$  é o Custo Total,  $\rho$  é o fator de desconto e  $\delta$  é a taxa de juros.

Então, o modelo de otimização utilizado na bacia de estudo foi:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \rho^t [P(t) * x(i,t) - C(i,t) * x(i,t) - Cext(t) * Ext(t)]$$

*Sujeito a:*

$$X(t=1) = Xini$$

$$X(t) = X(t-1) + F(t)$$

$$X(t) = \sum_1^i x(i,t)$$

$$X(t) \leq K$$

A função objetivo é composta pelo somatório no tempo da receita bruta, dos custos de produção e custos das externalidades, de todos os sistemas de cultivo  $i$ , onde:  $\rho$  é o fator de desconto,  $P(t)$  é o preço do arroz por hectare no tempo  $t$ ,  $x(i,t)$  é a área plantada do sistema de cultivo  $i$  no tempo  $t$ ,  $C$  é o custo de produção por hectare e  $Cext$  o custo das externalidades.

O termo  $X$  representa o estoque do recurso (área cultivada total),  $F$  é a Função Crescimento e  $K$  é a capacidade ambiental (Área máxima apta para cultivo de arroz da bacia). Os resultados do modelo são os valores de  $x(i,t)$ , isto é, a área ótima de cada sistema de cultivo  $i$  na bacia para cada intervalo do tempo analisado.

### **3.4- ANO DE REFERÊNCIA E HORIZONTE DE PROJEÇÃO**

O Valor Presente do Benefício Líquido (VPBL) é sempre calculado para um tempo de referência, ou seja, todos os valores são trazidos para o presente, a partir de um determinado tempo (ano, mês, etc.). Para este trabalho a variabilidade temporal considerada foi anual e, então, foi adotado um ano de referência, a partir do qual partiram os cálculos.

Como horizonte de projeção, a partir do ano de referência, adotou-se um valor estabelecido na Lei Estadual nº 10.350 de 30 de dezembro de 1994, em concordância com o Plano da Bacia Hidrográfica estudada.

### **3.5- RESULTADOS E CENÁRIOS**

O modelo otimizou o Benefício Líquido ( $W$ ) e calculou seu valor para o ano utilizado como referência e período de tempo analisados. Os resultados do modelo foram os valores de  $x(i,t)$ , ou seja, as áreas ótimas de cada tecnologia de produção em cada tempo. Com estes valores foi feita a análise da viabilidade econômica do cultivo de arroz irrigado na bacia, com a internalização dos efeitos causados sobre terceiros (externalidades).

Os cenários foram montados a partir de variação de taxas percentuais da lucratividade, da taxa de juros e custo de oportunidade. A cada uma destas três modalidades foram associados alguns valores de Vazões de Referência, além do caso sem externalidades, para o cálculo do Benefício Líquido.

## **4-ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PARDO**

Neste capítulo será aplicada a metodologia proposta em um estudo de caso. Primeiramente será caracterizada a bacia, e apresentados os dados referentes ao cultivo de arroz e dados de custo de oportunidade. Na seqüência serão montadas as funções econômicas e aplicado o modelo proposto.

### **4.1- CARACTERIZAÇÃO DA BACIA**

As informações contidas neste item foram obtidas, em sua maioria, do estudo realizado por SEMA (2005), da dissertação de mestrado de Helfer (2006) e da página de internet do COMITE PARDO (2007).

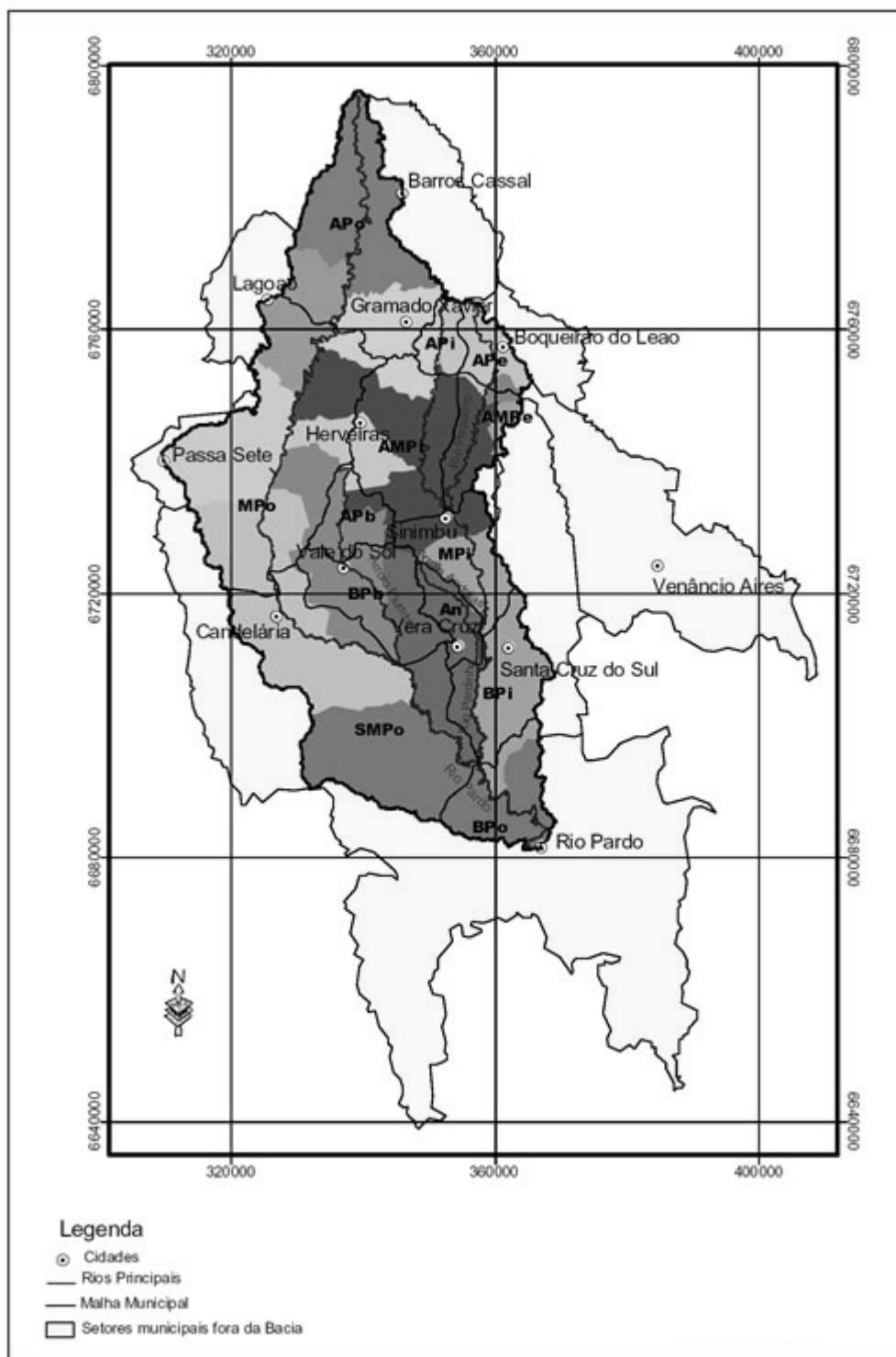
#### **4.1.1- Descrição Geral da Bacia**

A bacia hidrográfica do Rio Pardo<sup>2</sup>, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, aflui no Rio Jacuí, sendo integrante da região hidrográfica do Guaíba, correspondendo à bacia G 90, classificação oficial do estado.

A área de drenagem da Bacia do Pardo é de 3.636,79 km<sup>2</sup>, sua extensão é de 115 km e a largura de 35 km, representa 1,3% da área do estado e 4,3% da região hidrográfica do Guaíba, abrangendo 13 municípios, com um total de 212.531 habitantes (em 2003). Destes municípios somente Venâncio Aires tem sua sede fora dos limites da bacia. Em linhas gerais a bacia compreende a montante (parte alta) áreas associadas ao Planalto Meridional, com altitudes superiores a 500m, predominando campos, atividades de pecuária e pequenas lavouras de subsistência, onde estão localizadas as sedes dos municípios de Barros Cassal, Boqueirão do Leão, Gramado Xavier e Lagoão.

---

<sup>2</sup> As informações contidas no item 4.1.1 – Descrição Geral da Bacia do Rio Pardo - foram retiradas do site [www.comitepardo.com.br/bacia\\_riopardo.htm](http://www.comitepardo.com.br/bacia_riopardo.htm)



**Figura 4.1: Mapa da bacia do Rio Pardo**

Fonte: Comitê Pardo (2007)

A porção intermediária da bacia responde a aproximadamente 40% de sua área total, localizada na encosta do Planalto Meridional com altitudes que variam de 200m a 500m, predominando propriedades coloniais, havendo áreas de remanescentes florestais em diversos estágios de regeneração, onde estão situadas as sedes municipais de Herveiras, Passa Sete, Sinimbu e Vale do Sol. A jusante (parte baixa) da bacia, respondendo também por cerca



de 40%, encontram-se áreas planas de relevo pouco ondulado, geomorfológicamente compondo a depressão central, associadas às áreas de meandros dos principais cursos d'água, sendo as várzeas utilizadas para o cultivo de arroz irrigado, enquanto as zonas mais elevadas para pecuária extensiva e cultivos agrícolas, principalmente de fumo, milho, soja e feijão. Nesta porção localizam-se as sedes municipais de Candelária, Rio Pardo, Santa Cruz do Sul e Vera Cruz, onde se concentram os maiores contingentes populacionais e de atividade industrial na bacia.

#### 4.1.2- Área dos Municípios Inserida na Bacia

A tabela abaixo mostra os treze municípios componentes da bacia do Rio Pardo e suas áreas totais. Na última coluna está descrito o percentual da área de cada município contida na bacia. Nota-se que dos treze municípios apenas três estão totalmente incluídos nesta unidade de estudo.

**Tabela 4.1: Áreas Totais dos Municípios na Bacia do Rio Pardo**

<i>Município</i>	<i>Área Total do Município na Bacia (km<sup>2</sup>)</i>	<i>% da Área Total na Bacia</i>
Barros Cassal	312,79	48,26
Boqueirão do Leão	118,06	44,47
Candelária	495,05	52,47
Gramado Xavier	216,73	99,94
Herveiras	117,84	100
Lagoão	183,06	47,71
Passa Sete	234,04	76,79
Rio Pardo	474,34	23,13
Santa Cruz do Sul	336,15	45,76
Sinimbu	490,68	95,91
Vale do Sol	328,05	100
Venâncio Aires	18,17	2,35
Vera Cruz	309,66	100
<b>Total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>3.634,62*</b>	<b>--</b>

Fonte: SEMA (2005)

\* A soma das áreas destes municípios não é igual à área total calculada para a Bacia (3.636,79 km<sup>2</sup>) porque esta considera uma pequena parcela de outros municípios (Soledade e Segredo), devido às diferenças entre a cartografia dos limites municipais e cartografia sobre a qual foi trabalhada a delimitação da Bacia.

### 4.1.3- Uso do Solo

SEMA (2005) determinou o uso do solo e a cobertura vegetal na Bacia do Rio Pardo com base no mapeamento de 11 classes de uso, a partir de imagens do satélite Landsat TM7.

A Tabela 4.2 mostra de forma quantitativa o resultado desse mapeamento, indicando as áreas ocupadas por cada uma das classes na Bacia.

**Tabela 4.2: Áreas das Classes de Uso do Solo**

<i>Classe</i>	<i>ha</i>	<i>%</i>
Campo	134783,28	37,09
Mata	106304,67	29,25
Mata ciliar	40182,03	11,06
Arroz	7440,84	2,05
Soja	7998,66	2,2
Outros cultivos	29818,62	8,2
Solo exposto	28957,5	7,97
Áreas urbanas	4084,92	1,12
Água	1961,28	0,54
Rios	1550,16	0,43
Exóticas	350,73	0,1
<b>TOTAL</b>	<b>363432,69</b>	<b>100</b>

Fonte: SEMA (2005)

Na parte alta da Bacia predominam as matas, sendo que estes itens representam 40,3% de sua cobertura total (mata e mata ciliar).

Os campos representam 37,9% e predominam nos extremos superior e inferior da Bacia, este último com maior área que o primeiro e mais entremeado com atividades agrícolas.

As atividades agrícolas são representadas basicamente pelas culturas de arroz, soja e outros cultivos (fumo, milho e feijão). O primeiro ocupa 2,0% do uso do solo e se concentra nas regiões de várzea da parte baixa da Bacia. A soja ocupa basicamente a região pertencente ao município de Rio Pardo e representa 2,2% do uso do solo. Os outros cultivos estão disseminados pela Bacia e correspondem a 8,2% de sua área.

#### 4.1.4- Área de Arroz Irrigado

Analisando-se os dados de safra obtidos de IRGA (2006), nota-se que, na Bacia do Rio Pardo, são cinco os municípios que compõem a região orizícola: Estes municípios estão descritos na tabela 4.3, juntamente com a série histórica de área total cultivada de arroz irrigado para nove safras consecutivas.

**Tabela 4.3: Evolução da Área de Arroz Irrigado por Município**

Municípios	Safra								
	96/97	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05
	Área Cultivada com Arroz irrigado (ha)								
Candelária	6.000	6.500	7.150	7.700	7.700	7.806	7.905	8.000	8.000
Rio Pardo	6.500	7.000	7.500	8.000	9.788	9.994	10.200	10.500	10.500
Sta Cruz do Sul	1.680	1.680	1.840	1.840	1.840	1.579	1.650	1.650	1.600
Vale do Sol	1.100	1.100	1.177	1.177	1.177	991	1.041	1.166	1.000
Vera Cruz	500	500	535	535	535	1.135	1.135	1.220	1.200
<b>Total na Bacia</b>	<b>15.780</b>	<b>16.780</b>	<b>18.202</b>	<b>19.252</b>	<b>21.040</b>	<b>21.505</b>	<b>21.931</b>	<b>22.536</b>	<b>22.300</b>

Fonte: IRGA- Dados de safra

De Helfer (2006) obteve-se o percentual de área orizícola de cada município efetivamente contida na bacia, com o qual foi possível montar a Tabela 4.4, para as nove safras consideradas.

**Tabela 4.4: Evolução da Área de Arroz Irrigado Inserida na Bacia por Município**

Municípios	Área Orizícola na Bacia (%)	Safra								
		96/97	97/98	98/99	99/00	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05
		Área Cultivada com Arroz irrigado (ha)								
Candelária	44,44	2.666,40	2.888,60	3.177,46	3.421,88	3.421,88	3.468,99	3.512,98	3.555,20	3.555,20
Rio Pardo	15,68	1.019,20	1.097,60	1.176,00	1.254,40	1.534,76	1.567,06	1.599,36	1.646,40	1.646,40
Sta Cruz do Sul	51,09	858,31	858,31	940,06	940,06	940,06	806,71	842,99	842,99	817,44
Vale do Sol	100,00	1.100,00	1.100,00	1.177,00	1.177,00	1.177,00	991,00	1.041,00	1.166,00	1.000,00
Vera Cruz	100,00	500,00	500,00	535,00	535,00	535,00	1.135,00	1.135,00	1.220,00	1.200,00
<b>Total na Bacia</b>		<b>6.143,91</b>	<b>6.444,51</b>	<b>7.005,52</b>	<b>7.328,34</b>	<b>7.608,69</b>	<b>7.968,76</b>	<b>8.131,33</b>	<b>8.430,59</b>	<b>8.219,04</b>

Fonte: Helfer (2006)

Ainda segundo levantamento realizado por Helfer (2006), a área apta para orizicultura na Bacia do Rio Pardo é de aproximadamente 45 mil hectares.

#### 4.1.5- Disponibilidade Hídrica Superficial

Neste tópico será explanada apenas a disponibilidade hídrica superficial da Bacia, já que as águas subterrâneas não são utilizadas no processo de irrigação de arroz.

SEMA (2005) determinou as disponibilidades hídricas superficiais na Bacia do Rio Pardo com base nos parâmetros fluviométricos caracterizadores calculados para os principais rios (Pardo e Pardinho).

Para fins de determinação da disponibilidade hídrica média SEMA (2005) considerou as vazões médias de longo período; e para as situações de mínimos, adotou vazões com 90% e 95% de permanência no tempo (Q90% e Q95%), ou seja, com 90% e 95% de garantia de ocorrência respectivamente. A tabela 4.5 mostra estas vazões para cada mês ao longo do ano, objetivando contemplar as variações sazonais.

**Tabela 4.5: Disponibilidades Hídricas Superficiais Naturais da Bacia**

<i>Disponibilidade Hídrica (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>Mensal</i>												<i>Anual</i>
	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>	
<i>Média</i>	55,4	74,5	50,8	104,4	112,7	136,8	169,2	128,5	151,9	134,2	112,7	54,1	107,1
<i>Q90%</i>	5,7	7,55	5,32	5,19	6,98	11,45	24,18	16,21	17,82	23,72	10,74	5,3	8,49
<i>Q95%</i>	4,11	5,06	4,55	3,28	2,66	7,35	18,23	13,38	15,45	16,03	6,33	3,75	5,15

Fonte: Adaptado de SEMA (2005)

Observa-se neste quadro que as menores vazões ocorrem justamente no período de irrigação do arroz, que acontece do final do mês de novembro até fevereiro.

SEMA (2005B) elaborou ainda a Curva de Permanência para o mês de Janeiro (representativo do período de verão, quando ocorrem as menores vazões naturais), sendo que o trecho final desta curva é mostrado abaixo:

**Tabela 4.6: Trecho Final da Curva de Permanência da Bacia (Janeiro)**

<i>Percentual de Permanência no Tempo</i>	<i>Vazões diárias (m<sup>3</sup>/s) Bacia Pardo</i>
80	9,35
85	7,62
90	5,79
91	5,44
92	5,07
93	4,85
94	4,41
95	4,17
96	2,15
97	1,65
98	1,46
99	0,91
100	0,71

Fonte: Adaptado de SEMA (2005B)

Ainda, dentro das disponibilidades hídricas superficiais, existem as águas acumuladas em reservatórios, que não serão consideradas neste trabalho por alguns motivos, dentre os quais serão destacados os seguintes:

- o volume armazenado de água no período de irrigação do arroz não foi estimado por SEMA (2005), apenas a capacidade de armazenamento;
- o volume de água efetivamente retirado para irrigação não será o utilizado como referência neste trabalho, e sim o volume consumido, que é significativamente menor que o primeiro.

#### **4.1.6- Demanda Hídrica e Consumo Hídrico**

Segundo SEMA (2005),

Entende-se por **demanda hídrica** a quantidade de água necessária ou que é solicitada para a execução de uma determinada atividade; representa, assim, a quantidade de água que é extraída do manancial. Já o conceito de **consumo hídrico** é entendido como a parcela da demanda que é efetivamente utilizada (ou gasta) no desenvolvimento dessa atividade, seja por sua inclusão como matéria-prima no processo, seja por perdas como a evaporação e infiltração, ou mesmo a degradação da água demandada de tal forma que impeça a sua posterior utilização. A diferença quantitativa entre a demanda e o consumo é denominada de retorno, que consiste na parcela restante da demanda que volta ao manancial [...].

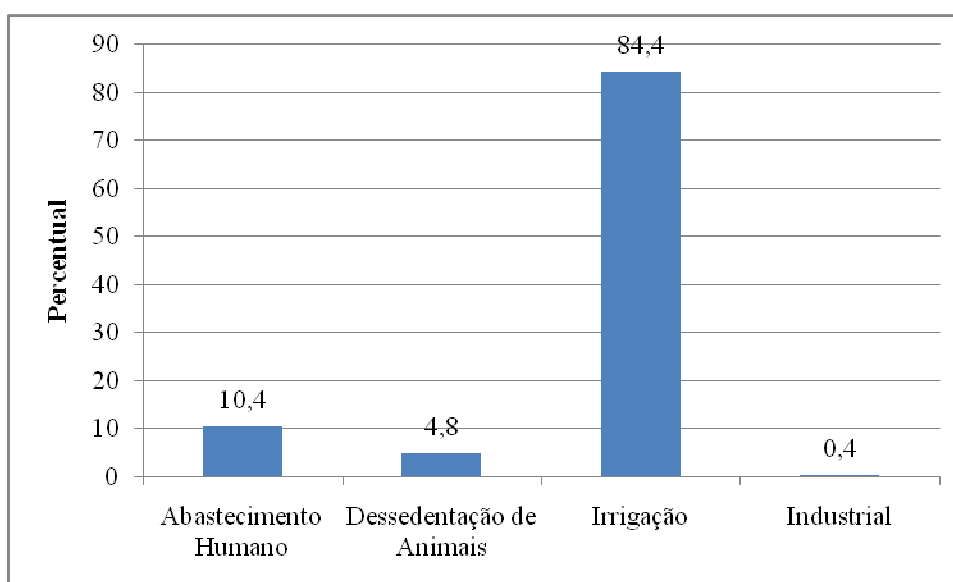
A Tabela 4.7 mostra as demandas de água superficial na Bacia para cada tipo de uso, descrita com variação temporal mensal, o que destaca a sazonalidade.

**Tabela 4.7: Demanda superficial ( $m^3/s$ ) por Uso Consuntivo**

Tipo de Uso	Mês											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<i>Humano</i>	0,405	0,405	0,405	0,386	0,386	0,366	0,366	0,366	0,366	0,386	0,386	0,405
<i>Animal</i>	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
<i>Irrigação</i>	11,469	11,059	2,22	0	0	0	0	0	0	0	2,294	11,099
<i>Industrial</i>	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
<b>TOTAL</b>	12,068	11,659	2,819	0,58	0,58	0,561	0,561	0,561	0,561	0,58	2,874	11,698

Fonte: SEMA (2005)

Na seqüência está a Figura 4.2 demonstrando a participação percentual de cada tipo de uso na demanda volumétrica superficial da bacia.



**Figura 4.2: Demanda Superficial de Água por Tipo de Uso**

Fonte: Adaptado de SEMA (2005)

Em seu estudo, para calcular o consumo de água para cada tipo de uso consuntivo, SEMA (2005) utilizou os coeficientes de retorno abaixo descritos:

**Tabela 4.8: Coeficientes de Retorno para cada Uso**

Tipo de Uso Consuntivo	Coeficiente de Retorno*
Abastecimento Humano	0,80
Dessedentação Animal	0,30
Irrigação	0,33
Industrial	0,80

\* A parcela correspondente ao percentual restante é o coeficiente de consumo, ou seja: Consumo = Demanda - Retorno).

Fonte: SEMA (2005)

Para obter os dados de consumo, SEMA (2005) aplicou os coeficientes de retorno na demanda hídrica de cada uso consuntivo. O resultado é mostrado na Tabela 4.9.

**Tabela 4 9: Consumo superficial (m<sup>3</sup>/s) na Bacia por Uso Consuntivo**

<i>Tipo de Uso</i>	<i>Mês</i>											
	<i>JAN</i>	<i>FEV</i>	<i>MAR</i>	<i>ABR</i>	<i>MAI</i>	<i>JUN</i>	<i>JUL</i>	<i>AGO</i>	<i>SET</i>	<i>OUT</i>	<i>NOV</i>	<i>DEZ</i>
<i>Humano</i>	0,081	0,081	0,081	0,077	0,077	0,073	0,073	0,073	0,073	0,077	0,077	0,081
<i>Animal</i>	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126
<i>Irrigação</i>	7,57	7,299	1,465	0	0	0	0	0	0	0	1,514	7,325
<i>Industrial</i>	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
<b><i>TOTAL</i></b>	<b>7,78</b>	<b>7,509</b>	<b>1,675</b>	<b>0,206</b>	<b>0,206</b>	<b>0,202</b>	<b>0,202</b>	<b>0,202</b>	<b>0,202</b>	<b>0,206</b>	<b>1,72</b>	<b>7,535</b>

Fonte: SEMA (2005)

## 4.2- DADOS ORIZÍCOLAS

As informações contidas neste item foram obtidas principalmente junto ao IRGA, na página de internet da EMBRAPA (2007), na dissertação de mestrado de HELFER (2006) e na página de internet do COMITÊ PARDO (2007).

### 4.2.1- Sistemas de cultivo praticados na Bacia (Tecnologias de Produção)

Os sistemas de cultivo de arroz utilizados na Bacia do Rio Pardo foram agrupados em seis tipos por IRGA (2006): Convencional em Linha, Convencional a Lanço, Cultivo Mínimo (CM), Plantio Direto (PD), Pré-Germinado (PG) e Outros.

Os dois primeiros diferem entre si apenas na forma da semeadura e, para este trabalho, foram agrupados e designados como Sistema Convencional (SC). Os sistemas incluídos dentro de “Outros” são, basicamente, o Transplante de Mudas e o Mix, os quais têm pouca representatividade na região da Depressão Central (onde está inserida a Bacia do Rio Pardo) segundo dados do censo do IRGA (2006). Devido a isso e ao fato de serem sistemas em que o estabelecimento do arroz se dá em solo inundado, seus valores foram agregados ao sistema Pré-Germinado.

#### 4.2.2- Consumo de água por Tecnologia de Produção

Estudos sobre a irrigação em cada sistema de cultivo de arroz demonstram que existe similaridade no consumo de água. Exemplo disso é o estudo realizado por Marcolin e Macedo (2001) realizado em Cachoeirinha/RS, mostrado na figura abaixo:

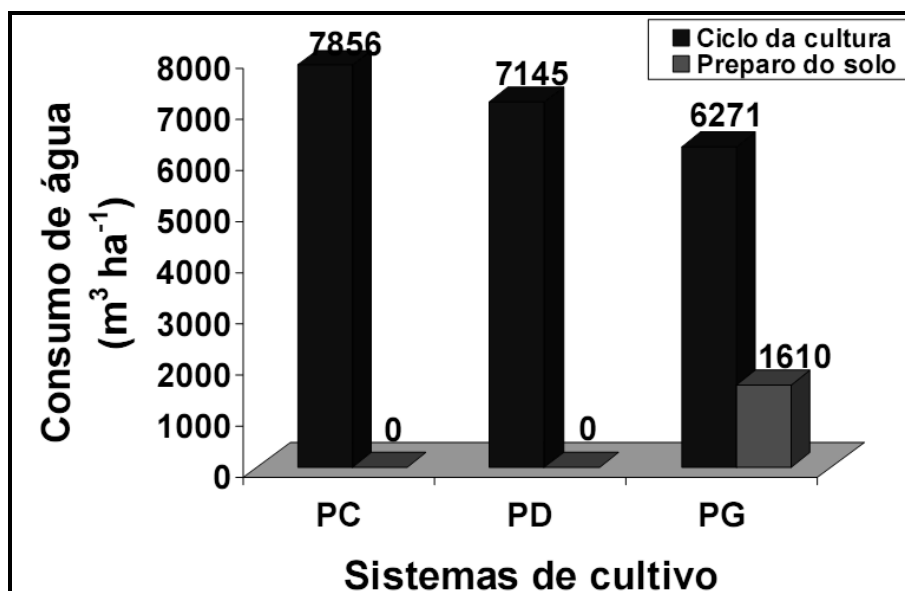


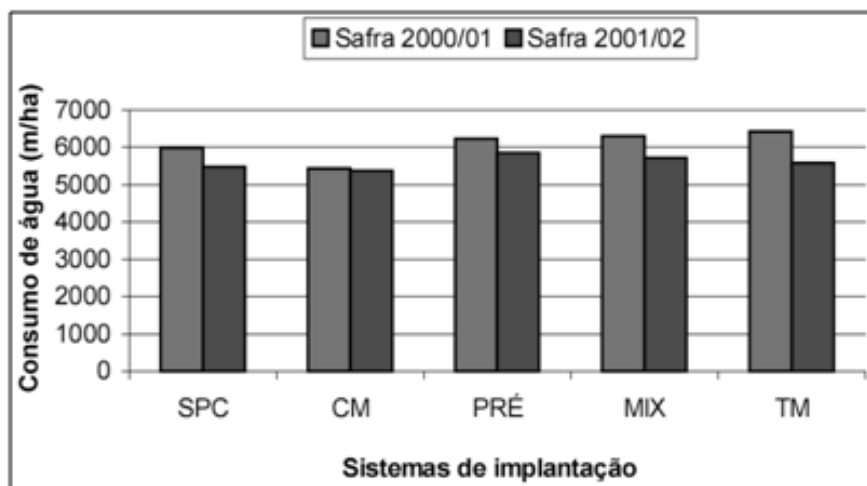
Figura 4.3: Consumo de Água para Três Sistemas de Cultivo de Arroz

Fonte: Marcolin e Macedo (2001)

Apesar desta similaridade, por ser um grande volume, a pequena diferença existente no consumo de água entre os sistemas de cultivo representa uma grande quantidade deste bem que deixa de estar disponível para outros usos.

Machado *et al.* (2006) também realizaram estudos sobre o tema, em Santa Maria/RS, do qual foi obtida a figura 4.4, onde nota-se uma maior diferença no consumo de água por sistemas de cultivo de arroz.

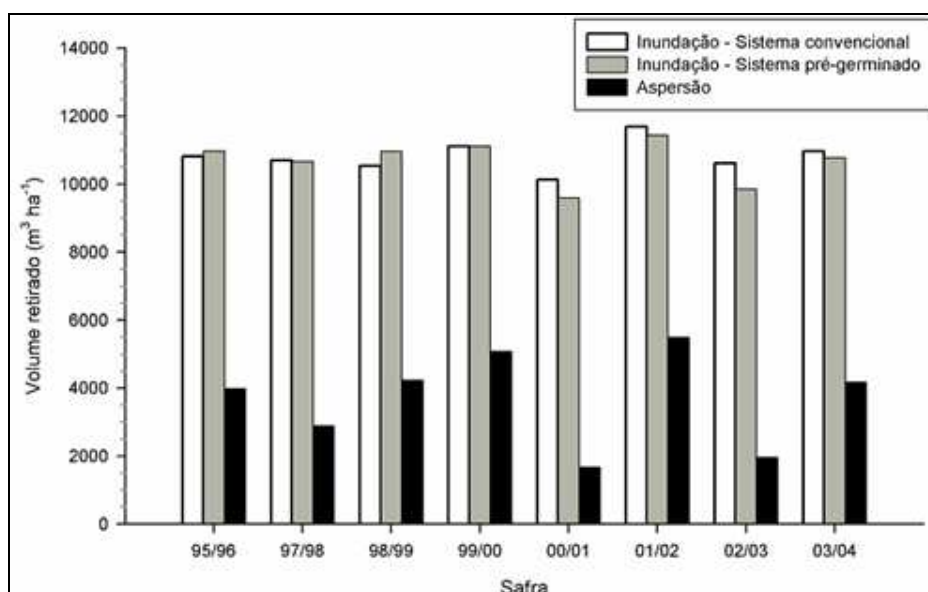




**Figura 4.4: Consumo de Água para Cinco Sistemas de Cultivo de Arroz**

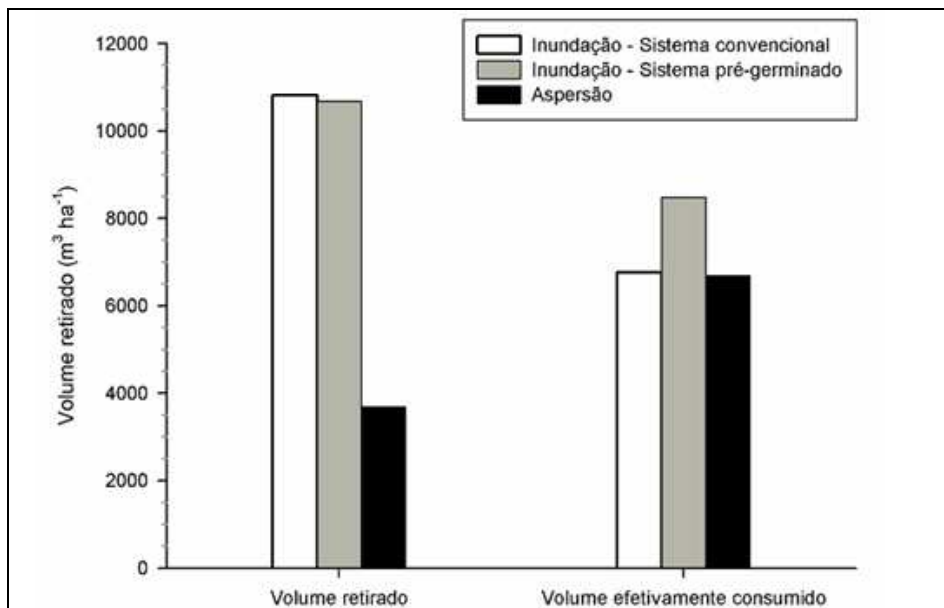
Fonte: Machado *et al.* (2006)

Já Amaral *et al.* (2005) realizaram experimentos para determinar a quantidade de água retirada e a efetivamente consumida pela orizicultura, obtendo as figuras 4.5 e 4.6:



**Figura 4.5: Volume Retirado de Água por Três Sistemas de Cultivo**

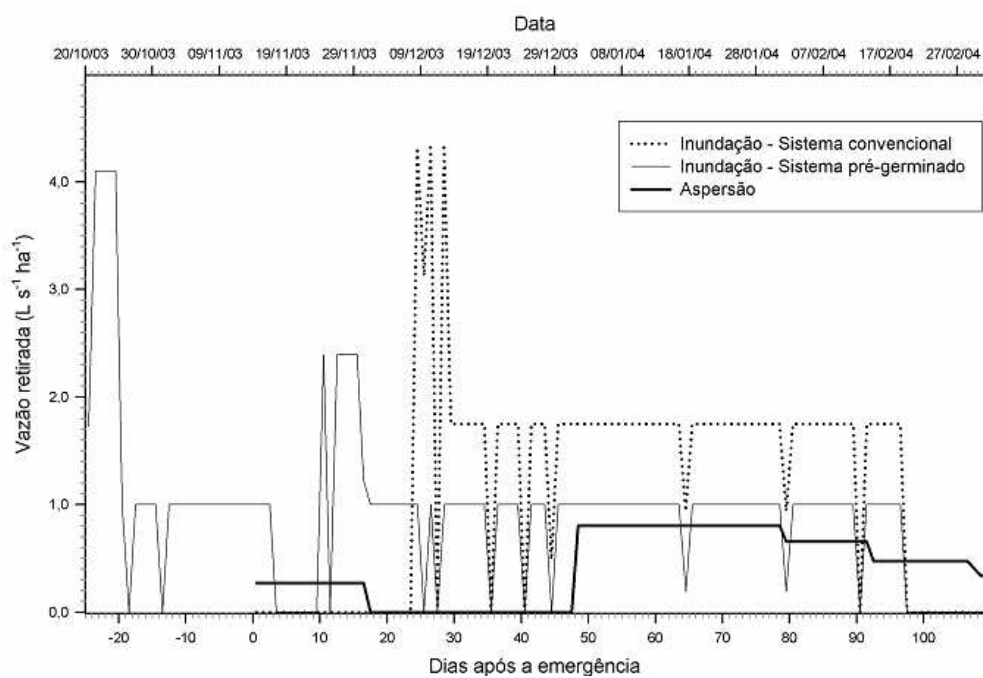
Fonte: Amaral *et al.* (2005)



**Figura 4.6: Volume Retirado e Efetivamente Consumido por Três Sistemas de Cultivo de Arroz**

Fonte: Amaral *et al.* (2005)

Existe também uma variação temporal no consumo de água para cada Sistema de Produção de Arroz Irrigado como mostram os estudos realizados por Amaral *et al.* (2005) expostos na figura 4.7, para três tecnologias de produção



**Figura 4.7: Variação Temporal do Consumo de Água para Três Sistemas de Cultivo de Arroz**

Fonte: Amaral *et al.* (2005)

Para este trabalho foram adotados os valores obtidos por Machado *et al.* (2005) na safra 2000/2001 (figura 4.4), por conterem dados de consumo de água para três das quatro tecnologias de produção deste estudo (Sistema Convencional, Cultivo Mínimo e Pré-Germinado). Para o consumo de água do sistema de Plantio Direto foi adotado o valor obtido por Marcolin e Macedo (2001) (figura 4.3), convertido através de uma comparação direta entre os dados do Sistema Convencional dos autores, para que os valores ficassem harmonizados. Segue abaixo o procedimento adotado:

$$PD_{Adotado} = PD_1 * (SC_2 / SC_1) \quad (4.1)$$

Sendo que o índice *1* representa os valores de Marcolin e Macedo (2001) e o *2* os valores de Machado *et al.* (2005).

Os valores de consumo de água adotados ( $Q(i)$ ) para cada tecnologia de produção encontram-se na Tabela 4.10:

**Tabela 4.10: Consumo de Água Adotado por Sistema de Cultivo**

<i>Sistema de Cultivo</i>	<i>Consumo de Água (m<sup>3</sup>/ha)</i>
Sistema Convencional (SC)	5.998
Cultivo Mínimo (CM)	5.431
Plantio Direto (PD)	5.455
Pré-Germinado (PG)	6.216

#### **4.2.3- Custo de produção de Arroz**

Junto ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) foram coletados dados dos custos de produção de arroz irrigado, os quais são fornecidos em forma de tabela resumida. O IRGA calcula anualmente o custo de produção médio ponderado para o Sistema Convencional (SC) em reais por saco (R\$/sc), tomando como referência o mês de fevereiro de cada safra, e também a produtividade média em sacos por hectare (SC/ha). A tabela 4.11 mostra estes custos para nove safras consecutivas, a partir de 96/97, sendo que na última coluna foram calculados os custos de produção em reais por hectare (R\$/ha).

**Tabela 4.11: Evolução do Custo de Produção (Sistema Convencional)**

<i>Safra</i>	<i>Produtividade (sc/ha)</i>	<i>Custo de Produção Fevereiro (R\$/sc)</i>	<i>Custo de Produção Fevereiro (R\$/ha)</i>
96/97	105,20	10,90	1.146,68
97/98	104,14	11,21	1.167,41
98/99	98,48	14,45	1.423,04
99/00	102,16	13,66	1.395,51
00/01	107,90	14,28	1.540,81
01/02	112,23	16,39	1.839,45
02/03	109,49	24,18	2.647,47
03/04	108,21	29,79	3.223,58
04/05	111,58	30,68	3.423,27

Fonte: IRGA – Dados de Safra

Brondani *et al.* (2006) formaram os custos de produção para três sistemas de cultivo de arroz com base em dados divulgados nas publicações da EMATER-RS (Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio Grande do Sul) para a safra 2004/2005. A Tabela 4.12, contendo os dados de custo para o Sistema Convencional, Pré-Germinado e Plantio Direto, com irrigação mecânica, foi adaptada pelo Autor.

**Tabela 4.12: Custo de Produção para Três Sistemas de Cultivo**

<i>Tecnologia de Produção</i>	<i>Custo de Produção Safra 04/05 (R\$/ha)</i>
Sistema Convencional (SC)	1.703,78
Pré-Germinado (PG)	1.313,25
Plantio Direto (PD)	1.365,40

Fonte: Adaptada de BRONDANI *et al.*, 2006

Cabe salientar que, tanto em pesquisa realizada junto aos órgãos especializados do setor orizícola, como na bibliografia consultada, foi constatado que praticamente inexistem dados ou estudos sobre os custos de produção para os diferentes sistemas de cultivo de arroz praticados.

#### 4.2.4-Preço do Arroz

O Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) fornece, na mesma planilha dos custos de produção, dados do preço do arroz seco e limpo, tendo como referência o mês de fevereiro, os quais estão expostos na tabela 4.13. Na última coluna foi calculado o preço do arroz em reais por hectare (R\$/ha).

**Tabela 4.13: Evolução do Preço do Arroz (Fev., Seco e Limpo)**

<i>Safra</i>	<i>Produtividade (sc/ha)</i>	<i>Preço Arroz Fev seco e limpo (R\$/sc)</i>	<i>Preço Arroz Fev seco e limpo (R\$/ha)</i>
96/97	105,20	12,45	1.309,74
97/98	104,14	14,21	1.479,83
98/99	98,48	18,72	1.843,55
99/00	102,16	13,20	1.348,51
00/01	107,90	12,38	1.335,80
01/02	112,23	16,48	1.849,55
02/03	109,49	27,45	3.005,50
03/04	108,21	36,93	3.996,20
04/05	111,58	25,24	2.816,28

Fonte: IRGA – Dados de Safra

#### 4.3- DADOS DO CUSTO DE OPORTUNIDADE

A Lei 9.433/97 estabelece em seu artigo 1º, inciso III, que em situações de escassez de água o uso prioritário dos recursos hídricos deve ser o consumo humano e a dessedentação de animais. A água utilizada pela rizicultura deixa de estar disponível para o abastecimento urbano, gerando uma externalidade negativa sobre esses usuários.

Então, o melhor uso alternativo da água em situações de escassez é o consumo humano.

Para calcular o valor da externalidade gerada pelo uso da água pela rizicultura foi utilizado o valor da tarifa média da água aplicada pela CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), obtida de SNIS (2008), multiplicada pelo percentual de lucro médio desta companhia nos últimos anos. A tabela 4.14 mostra os valores das tarifas.

**Tabela 4.14: Evolução da Tarifa Média de Água**

<i>Ano</i>	<i>Tarifa Média Água (R\$/m<sup>3</sup>)</i>
1997	1,55
1998	1,44
1999	1,82
2000	2,00
2001	1,20
2002	2,33
2003	2,75
2004	3,17

Fonte: SNIS (2008)

Analisando-se as informações divulgadas por CORSAN (2006) nota-se que esta empresa tem obtido um lucro percentual médio de 3% sobre a Receita Operacional Total nos últimos anos (2003 a 2005), sendo que mais recentemente também vem obtendo lucro. Este lucro é considerado sobre todos os serviços (água e esgoto).

#### **4.4- CONSTRUÇÃO DAS FUNÇÕES ECONÔMICAS**

Para a construção das funções econômicas foram utilizados alguns dos dados expostos nos itens 4.1 a 4.3. Com estes dados e através do uso do *software* Microsoft Excel, foi possível o ajuste de cada uma das funções econômicas, tomando-se o cuidado para obter sempre o melhor coeficiente de correlação ( $R^2$ ) através das opções de equações de ajuste fornecidas pelo *software*.

##### **4.4.1- Função Crescimento e Estoque**

Como foi visto, os Recursos Naturais Renováveis seguem a equação 4.2, onde o termo  $F(X(t))$  foi colocado em função  $t$  (ou seja, a equação de  $F$  foi montada para estar em função de  $t$ ):

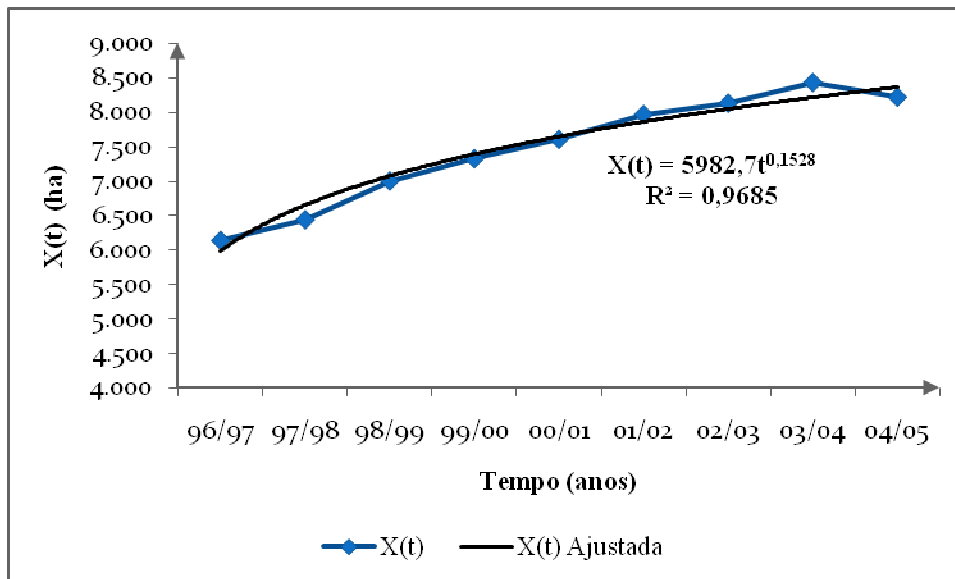
$$X(t+1) - X(t) = F(t) \tag{4.2}$$

Neste trabalho, a série temporal das áreas cultivadas com arroz irrigado na Bacia do Rio Pardo, obtida da Tabela 4.4, foi chamada de Estoque do Recurso Natural Renovável ( $X(t)$ ), a qual está representada na tabela 4.15.

**Tabela 4.15: Evolução das Áreas de Arroz na Bacia**

<i>Safra</i>	$X(t)$ (ha)
96/97	6.143,91
97/98	6.444,51
98/99	7.005,52
99/00	7.328,23
00/01	7.608,69
01/02	7.968,76
02/03	8.131,33
03/04	8.430,59
04/05	8.219,04

Colocando-se estes valores em forma de gráfico, foi possível traçar uma linha de tendência e obter a equação ajustada para  $X(t)$ . A representação deste procedimento está na figura 4.8.

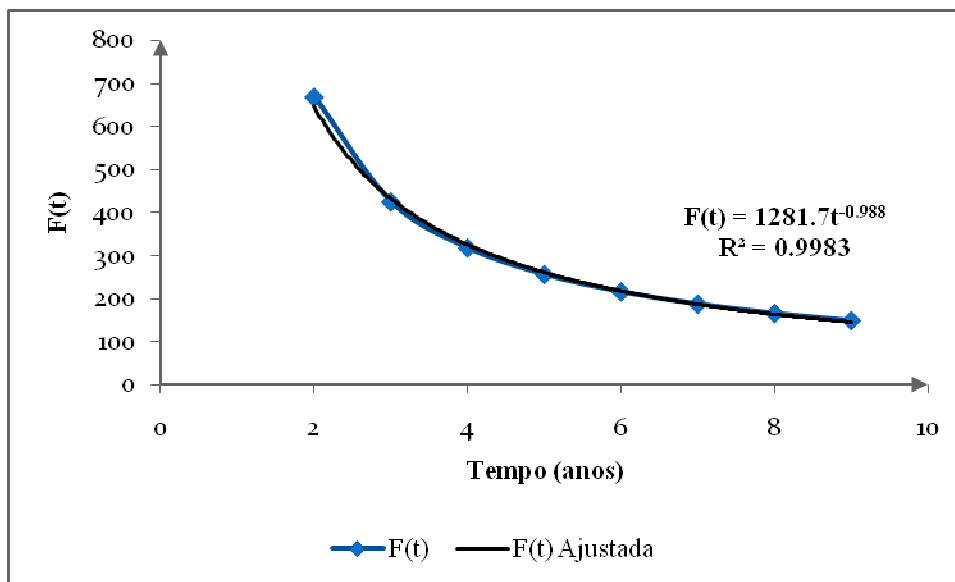


**Figura 4.8: Ajuste da Função Estoque  $X(t)$**

Então, foi considerado que os valores do Estoque do Recurso Natural Renovável ( $X(t)$ ) seguem a equação:

$$X(t) = 5982,7t^{0,1528} \tag{4.3}$$

Para um dado  $X$  inicial, é mais conveniente trabalhar com a equação de  $F(t)$ , a qual pode ser obtida de duas maneiras: pela derivada da equação de  $X(t)$  ou descrevendo os valores de  $X(t)$  para alguns valores de  $t$  e, após, obter a diferença  $X(t+1) - X(t)$ . Neste trabalho foi escolhida a segunda opção e os valores obtidos encontram-se na figura 4.9:



**Figura 4.9: Ajuste da Função Crescimento  $F(t)$**

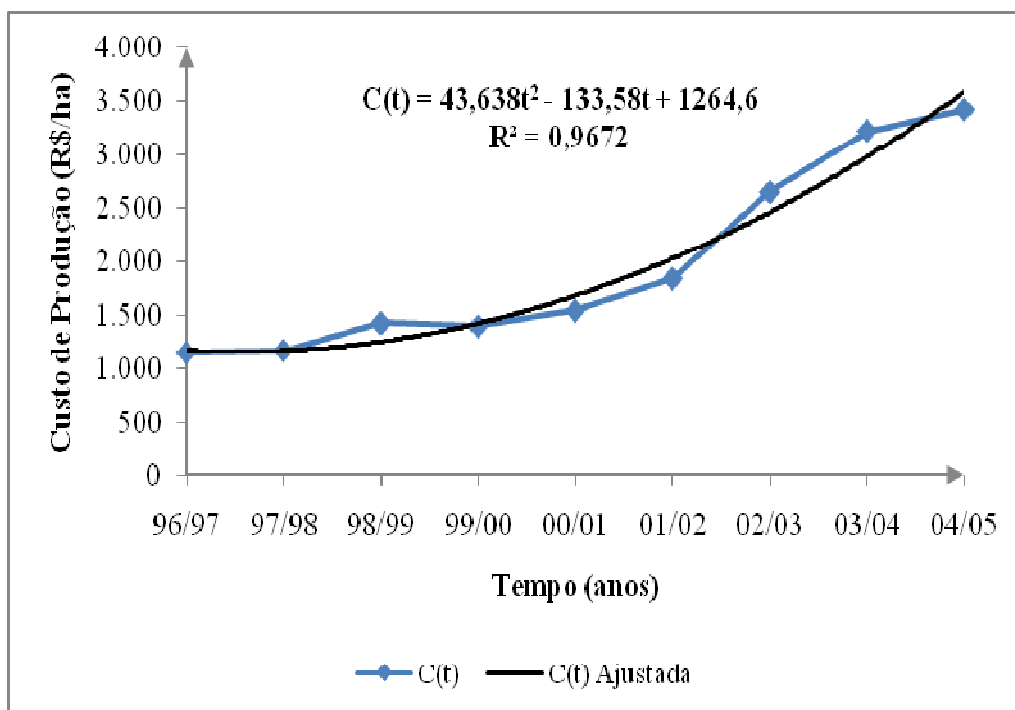
A Função Crescimento adotada  $F(t)$  será:

$$F(t) = 1281,7t^{(0,988)} \quad (4.4)$$

#### 4.4.2- Função Custo de Produção

Os valores do custo de produção de arroz para o Sistema de Plantio Convencional, obtidos da Tabela 4.11 em R\$/ha, foram graficados. Após, foi ajustada uma equação para estes dados, como mostra a figura 4.10:





**Figura 4.10: Ajuste da Função Custo de Produção  $C(t)$  (Sistema Convencional)**

Então, para este trabalho, foi adotado que os valores do Custo de Produção para o Sistema Convencional seguem a equação:

$$C(t) = 43,638t^2 - 133,58t + 1264,6 \quad (4.5)$$

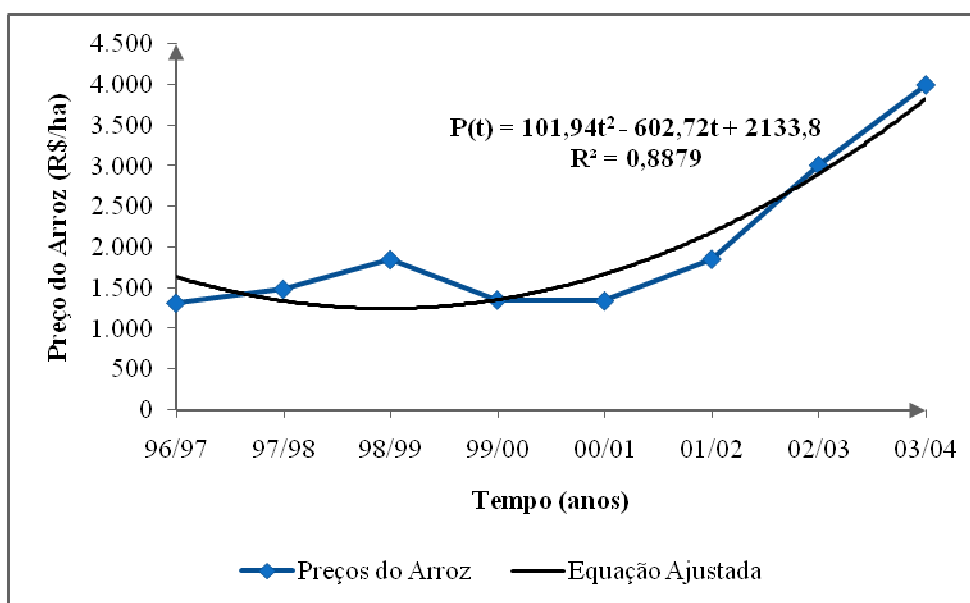
Para os outros sistemas de cultivo, foi usada uma relação de correspondência, tendo como base os dados da Tabela 4.12 adaptada de Brondani *et al.* (2006). O Sistema Convencional recebeu o valor “1” e os valores das demais tecnologias de Produção foram relacionados de forma direta a partir deste valor. Assim, a equação acima pode ser utilizada para todas as tecnologias de produção, de forma proporcional. A Tabela 4.16 mostra os valores adotados de Custo de Produção para cada sistema de cultivo, sendo que, para o Cultivo Mínimo foi adotado o mesmo valor do Fator de Relação que o obtido para o Plantio Direto. Para esta decisão foi levado em conta as semelhanças entre as tecnologias de produção, visto a indisponibilidade de dados de custo de produção para o Cultivo Mínimo.

**Tabela 4.16: Fatores Adotados para o Custo de Produção dos Sistemas de Cultivo**

<i>Tecnologia de Produção</i>	<i>Custo de Produção Safra 04/05 (R\$/ha)</i>	<i>Fator de Relação</i>
Sistema Convencional (SC)	1.703,78	1,00
Pré-Germinado (PG)	1.313,25	0,77
Cultivo Mínimo (CM)		0,80
Plantio Direto (PD)	1.365,40	0,80

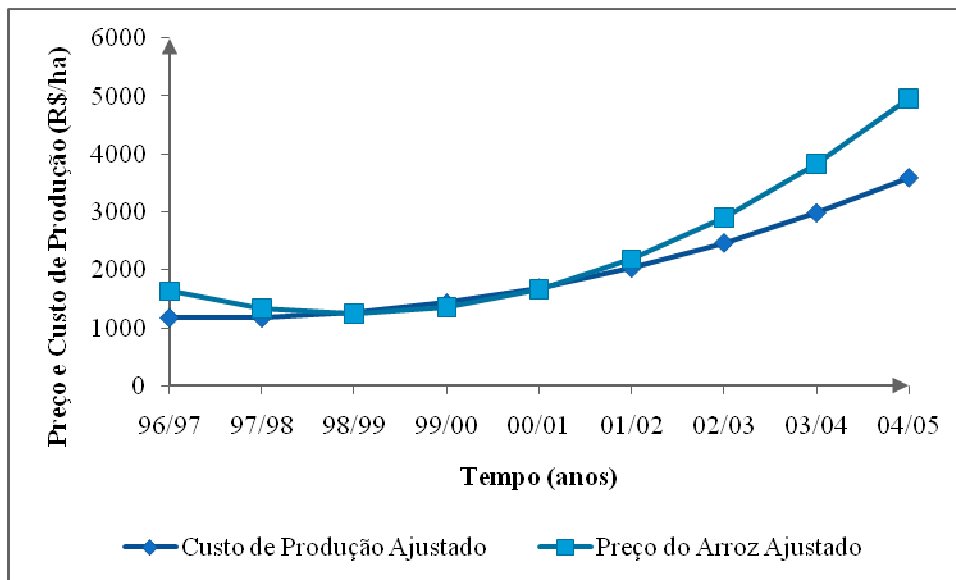
#### 4.4.3- Função Preço

Com os valores do preço do arroz, obtidos da Tabela 4.13 em R\$/ha, foi possível ajustar uma equação de tendência, conforme representado na figura 4.11, para oito safras consecutivas, a partir de 96/97. Para este caso foram ajustados apenas dados para oito safras, sendo excluído o dado da safra 04/05 por não seguir a tendência dos demais dados, e assim, baixar muito o ajuste da equação.



**Figura 4.11: Ajuste da Função Preço P(t)**

Apesar de se conseguir um bom ajuste, neste trabalho não foi utilizada esta equação para o preço do arroz, pois ao graficá-lo em conjunto com o custo de produção, nota-se um crescente afastamento entre as linhas de tendência. Isto significa que o lucro (preço menos o custo de produção) está crescendo de forma desproporcional, o que pode ser observado na figura 4.12:



**Figura 4.12: Função Preço e Função Custo Ajustadas**

Sendo assim, optou-se por adotar uma lucratividade média aplicado sobre o Custo de Produção para o Sistema Convencional.

Fazendo-se uma análise da lucratividade nas nove safras consecutivas, tendo por base o mês de fevereiro, observou-se que a rentabilidade média ficou em oito por cento (8%). Para este trabalho foram testados valores da lucratividade média variando de 5% a 14%.

Então, foi adotado que os valores de preço do arroz seguem a equação:

$$P(t) = \%P * (43,638t^2 - 133,58t + 1264,6) \quad (4.6)$$

Onde ,  $\%P$  é o percentual de lucratividade adotado em cada Cenário a ser analisado.

#### 4.4.4- Função Custo das Externalidades

Para este trabalho, foram testados valores do custo de oportunidade variando de 1% a 10%, aplicada sobre a tarifa de água.

Primeiramente, foi realizado o ajuste da curva para os valores da tarifa e, logo após, aplicado um percentual sobre a equação obtida. Para ajustar uma equação a série temporal de dados de tarifa, foi excluído o valor para o ano de 2001, por não seguir a tendência dos demais pontos. Na figura 4.13 encontra-se o gráfico efetuado para o ajuste da equação.

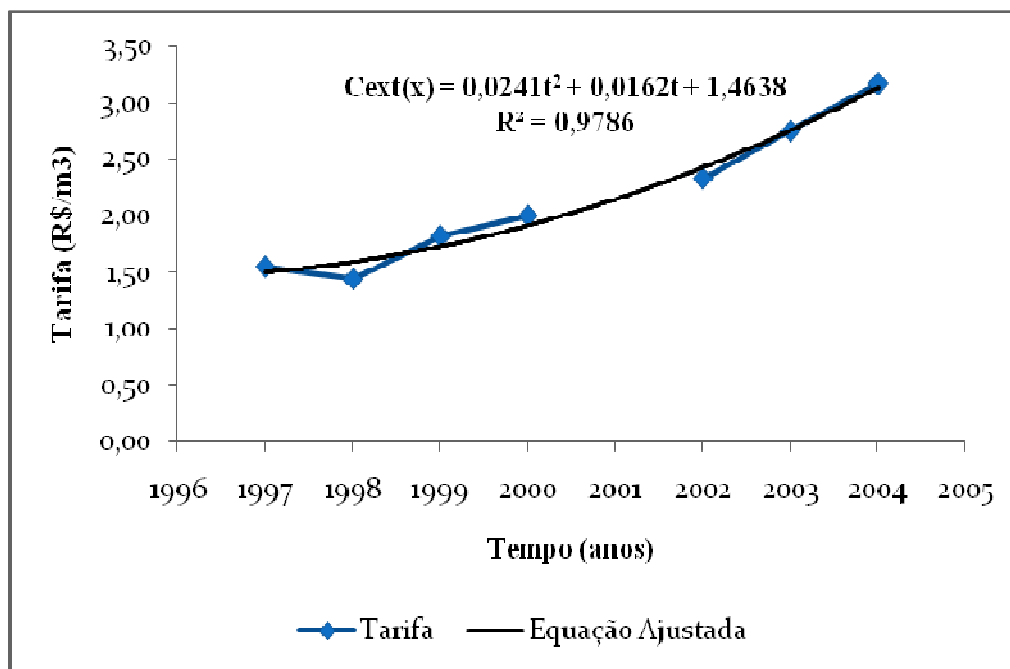


Figura 4.13: Ajuste da Função Custo das Externalidades  $C_{ext}(t)$

Então, os valores de custo das externalidades ( $C_{ext}(t)$ ) seguem a equação:

$$C_{ext}(t) = \%CO \cdot (0,0241t^2 + 0,0162t + 1,4638) \quad (4.7)$$

Onde,  $\%CO$  é o percentual do custo de oportunidade adotado em cada Cenário a ser analisado.

Faz-se necessário salientar que, tanto em pesquisa realizada aos órgãos especializados do setor de abastecimento urbano, como na bibliografia consultada, não foi possível obter a série temporal das tarifas de água, por não haver uma centralização destes dados, ou por não serem publicados.

## 4.5- CONDIÇÕES ADOTADAS PARA O MODELO

### 4.5.1- Número de Dias de Irrigação do Arroz

Embora cada sistema de cultivo de arroz apresente um número de dias diferente em que recebe irrigação, para este trabalho foi adotado para o cálculo da quantidade de água utilizada o prazo de 100 dias.

### 4.5.2- Vazões de Referência

Como limite para calcular as externalidades foram adotadas quatro Vazões de Referência, sendo duas ponderadas e duas para o mês de Janeiro: Q90%Pond, Q95%Pond, Q90%Jan e Q95%Jan.

As vazões ponderadas (Q90%Pond e Q95%Pond) foram calculadas usando as vazões Q90% e Q95% respectivamente, de cada mês de cultivo, tendo como base os dias de irrigação, assim distribuídos: 10 dias em novembro, 31 em dezembro, 31 em janeiro e 28 em fevereiro, totalizando 100 dias.

As outras vazões, referentes à Janeiro (Q90%Jan e Q95%Jan), foram escolhidas por ser este mês “o mais representativo do período de verão, quando ocorrem as menores vazões naturais” (SEMA, 2005B) e por terem sido duas das vazões utilizadas para as simulações realizadas no Plano de Bacia do Rio Pardo.

Na tabela 4.17 encontram-se os valores destas vazões, sendo que na última coluna eles foram convertidos para a unidade em que serão utilizados no modelo ( $m^3$ ) através da multiplicação pelo número de dias de irrigação adotado (100 dias).

**Tabela 4.17: Vazões de Referência Adotadas**

	<i>Vazão de Referência</i>	
	$m^3/s$	$m^3$ (100 dias)
<i>Q90%Pond</i>	6,60	57.006.720
<i>Q95%Pond</i>	4,49	38.762.496
<i>Q90%Jan</i>	5,79	50.025.600
<i>Q95%Jan</i>	4,17	36.028.800

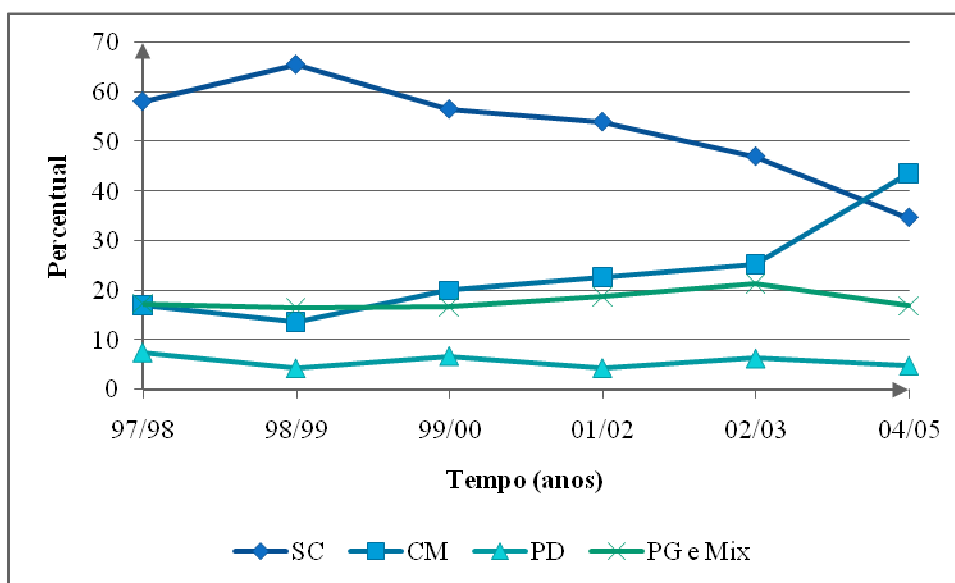
### 4.5.3- Tendências dos Sistemas de Cultivo

Helfer (2006), em consulta realizada em julho de 2005 ao Núcleo de Assistência Técnica do IRGA de Rio Pardo, junto a técnicos deste Instituto e a produtores de arroz atuantes na Região, obteve informações de que as áreas cultivadas de arroz com sistemas de semeadura em solo inundado (pré-germinado e mix) sofreriam a tendência de redução para os próximos anos.

Andrade e Rabuski (2005) *apud* Helfer (2006) consideram que:

[...] a diminuição dos sistemas de semeadura em solo inundado dar-se-á de forma linear ao longo das safras, a uma taxa de 5% ao ano, chegando a um patamar de 20% da área total. Este percentual representa a parcela de produtores que têm obtido altas produtividades e grande sucesso com os sistemas de semeadura em solo inundado, em especial o pré-germinado. Por este motivo, estes produtores têm grande probabilidade de permanecer utilizando estes sistemas de cultivo nos próximos anos.

Analisando-se a evolução dos sistemas de cultivo de arroz para a Bacia do Rio Pardo ao longo dos anos, mostrada na figura 4.14 (traçada com dados obtidos junto ao IRGA), pode-se observar que se confirmam as perspectivas destes técnicos.



**Figura 4.14: Evolução das Áreas dos Sistemas de Cultivo: Bacia do Rio Pardo**

No modelo proposto neste trabalho foi adotada como uma das restrições a área mínima do sistema de cultivo Pré-Germinado em cada tempo, estipulada em 15% da área total cultivada com arroz.

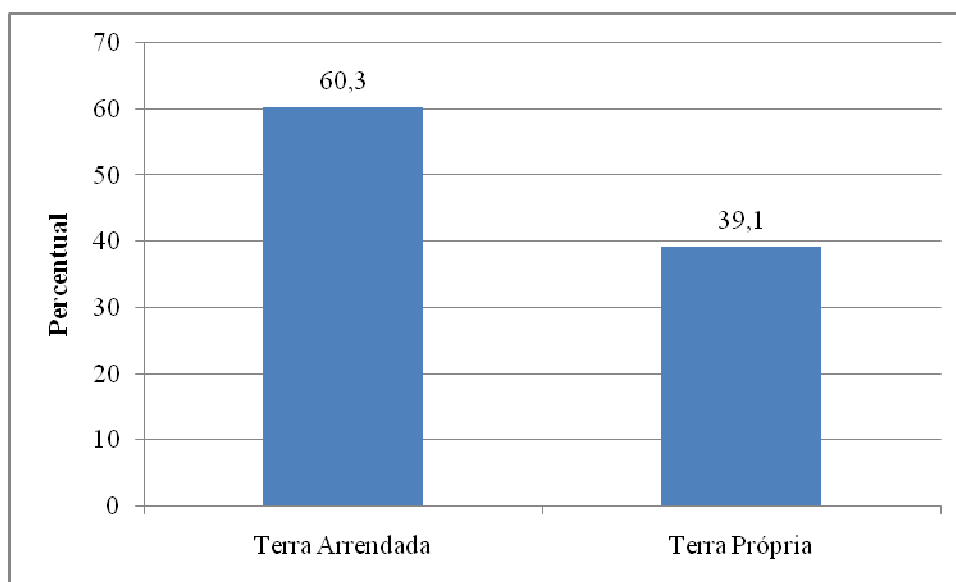
Matematicamente:

$$x(PG,t) = 0,15X(t) \quad (4.8)$$

Segundo a EMBRAPA (2007):

As limitações para ampliação da área de cultivo de arroz, com os sistemas PD e CM, relacionam-se ao elevado índice de arrendamento da terra (65% dos produtores são arrendatários no RS), investimento inicial elevado; dificuldades no controle de plantas daninhas (gramas perenes); dificuldades no estabelecimento de rotação de culturas; problemas de drenagem, colocação de adubo junto a sementes, entre outras.

Em dados obtidos de IRGA (2005) constata-se o alto índice de arrendamento de terra para cultivo de arroz Irrigado no Rio Grande do Sul, mostrado na Figura 4.15:



**Figura 4.15: Posse da Terra de Cultivo de Arroz no RS**

Fonte: IRGA (2005)

Para a região da Depressão Central, onde está localizada a Bacia do Rio Pardo, o índice de arrendamento de terras para o cultivo de arroz na safra 04/05 foi de 54,4%.

Na Figura 4.14 pode-se observar que o Sistema Convencional vem perdendo espaço ao longo dos anos. Porém, é um sistema muito tradicional, e, segundo a EMBRAPA (2007), é bastante conhecido.

Assim, outra restrição adotada para o modelo foi a área mínima do Sistema Convencional, estipulada em 15%.

Matematicamente:

$$x(SC,t) = 0,15X(t) \quad (4.9)$$

#### **4.5.4- Taxa de Juros**

Para o cálculo do Valor Presente, utilizado para otimizar o Benefício Líquido, se faz necessário estabelecer a taxa de juros a ser aplicada sobre o capital, geralmente representada pela taxa de inflação. Neste trabalho foram estudados alguns Cenários, nos quais as taxas de juros estão compreendidas entre os valores de 5% a 14%.

#### **4.5.5- Horizonte de Projeção**

Para Helfer (2006):

A Lei Estadual nº 10.350 de 30 de dezembro de 1994 no seu Art. 22 estabelece que o Plano Estadual de Recursos Hídricos deve ter horizonte de planejamento não inferior a 12 anos. O Art. 26 estabelece que os Planos de Bacias Hidrográficas devem ter horizontes de planejamento compatíveis com o horizonte estabelecido no Plano Estadual. No entanto, o Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo iniciou-se em 2004, antes mesmo da existência do Plano Estadual. Neste contexto, o Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Estadual de Meio Ambiente (DRH/SEMA) decidiu que os horizontes de planejamento da Bacia deveriam ser de 4 e 12 anos.

Assim, neste trabalho foi adotado o horizonte de projeção de 12 anos a contar do ano de 2004, quando iniciou-se o Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo.

#### **4.5.6- Cenários**

A análise do comportamento do Benefício Líquido ( $W$ ) para a Bacia do Rio Pardo foi realizada através de três casos, montados a partir de valores das dez taxas de juros, dez valores de lucratividade do arroz e dez valores de custo de oportunidade. Em cada um destes casos foram montados cinco Cenários para o cálculo do Benefício Líquido: um sem



externalidades (chamada de SE) e outros quatro com a internalização das externalidades (para cada uma das Vazões de Referência, acima das quais será cobrada a água utilizada).

Foram, então, estudados três casos: no primeiro caso, chamado de CASO 1, as taxas de juros foram variadas de 5% a 14%, mantendo-se fixos o percentual da lucratividade e o do custo de oportunidade, respectivamente em 10% e 5%.

O CASO 2 teve a taxa de juros fixada em 8% (média das taxas de juros estudadas) e o custo de oportunidade em 5%, variando-se o percentual da lucratividade de 5% a 14%.

Para o CASO 3, a taxa de juros foi fixada em 8% (média das taxas de juros estudadas) e o percentual da lucratividade em 10%, variando-se o custo de oportunidade de 1% a 10%.

O modelo calculou, para cada Cenário, a área dos sistemas de cultivo, de forma a maximizar o Valor Presente do Benefício Líquido ( $W$ ) para o ano de referência (2004).

## **5- RESULTADOS E APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS**

Os resultados da função objetivo, como descrito na metodologia, foram expostos em termos do Benefício Líquido  $W$ . O modelo também fornece em cada tempo, a área ótima de cada sistema de cultivo de arroz.

Através dos resultados obtidos para o Benefício Líquido foi feita a análise da viabilidade econômica da cultura de arroz na Bacia, incorporando as externalidades. Paralelamente, foi mostrada a evolução das áreas de sistemas de cultivo no período de tempo estudado.

Assim, primeiramente foram mostrados os resultados do Benefício Líquido, na forma de tabela e de gráfico, para cada um dos três Casos. Na seqüência, foi feita a análise da viabilidade econômica dentro de cada Caso, sendo que também foi mostrada a evolução das áreas dos Sistemas de Cultivo.

Para os Cenários do Caso 1, foi feita uma análise da rentabilidade e do custo unitário da água total utilizada pelo cultivo de arroz no período analisado (12 anos). Também foi feita uma comparação entre estes Cenários através da análise dos Fluxos de Caixa gerados por eles.

### **5.1- CASO 1: LUCRATIVIDADE E CUSTO DE OPORTUNIDADE FIXOS**

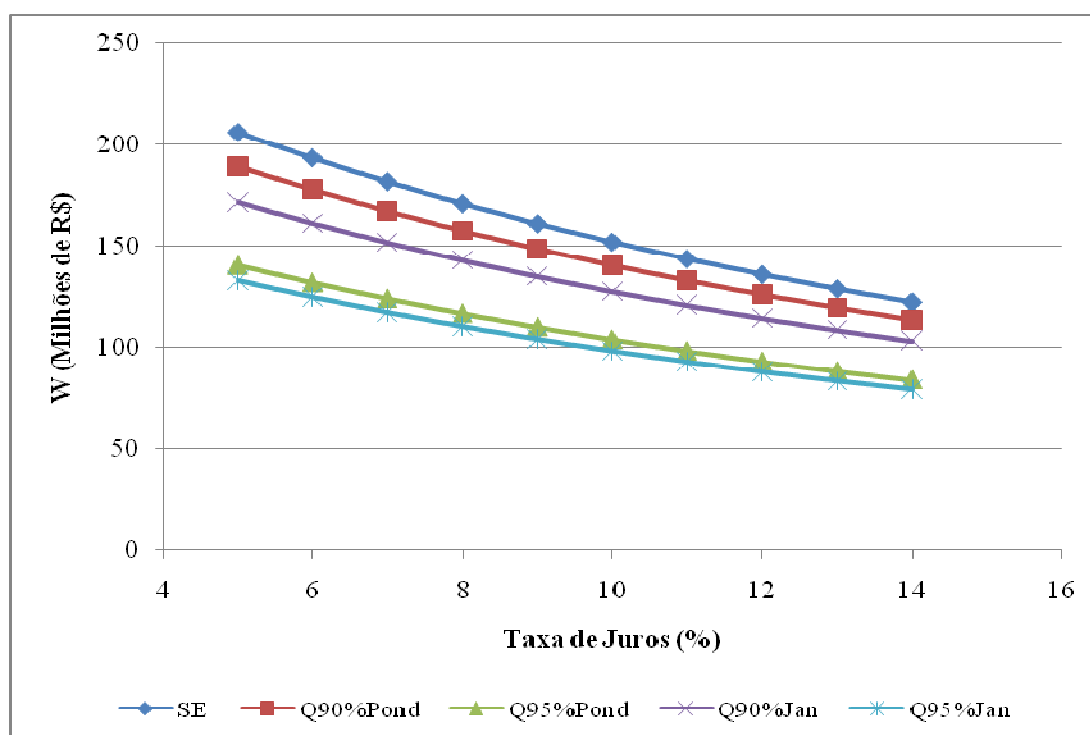
Aplicando-se o modelo, mantendo-se fixos a lucratividade do arroz e o custo de oportunidade, em 10% e 5% respectivamente foram obtidos os valores do Benefício Líquido mostrados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1.

Primeiramente, analisando-se a grosso modo os valores da lucratividade do arroz (10%) e do custo de oportunidade (5%) do ponto de vista econômico (análise de investimentos), sem considerar o risco e as incertezas, parece razoável supor que um investidor aplicaria o capital no cultivo de arroz. Mesmo quando comparado com outro custo de oportunidade como o da caderneta de poupança (rendimento de 6% a 8% nos últimos anos) o cultivo de arroz apresenta atratividade.

**Tabela 5.1: CASO 1 – Benefício Líquido para Cada Cenário**

Taxa de Juros (%)	Benefício Líquido para cada Qref (R\$)				
	Sem Externalidades	Q90%Pond	Q95%Pond	Q90%Jan	Q95%Jan
5	206.415.386,37	189.424.558,32	140.653.608,25	171.831.216,56	133.047.353,02
6	193.657.833,17	177.943.827,14	132.036.900,00	161.439.166,53	124.861.548,88
7	181.966.291,51	167.415.837,10	124.139.576,50	151.910.763,43	117.360.115,15
8	171.237.283,72	157.748.451,52	116.891.818,65	143.162.402,44	110.476.578,68
9	161.378.533,81	148.859.484,44	110.231.365,59	135.119.514,39	104.151.665,99
10	152.307.643,35	140.675.526,26	104.102.621,28	127.715.498,87	98.332.451,96
11	143.950.936,16	133.130.918,88	98.455.874,82	120.890.793,16	92.971.616,84
12	136.242.448,58	126.166.859,86	93.246.619,14	114.592.058,47	88.026.797,14
13	129.123.045,89	119.730.618,38	88.434.954,79	108.771.467,74	83.460.017,53
14	122.539.648,01	113.774.847,99	83.985.067,42	103.386.081,44	79.237.193,05

No panorama em análise, o cultivo de arroz na Bacia do Rio Pardo mostra que pode absorver os custos gerados pelas externalidades, quando se utiliza as Vazões de Referência como limites de consumo (acima do qual é cobrada a vazão excedida).

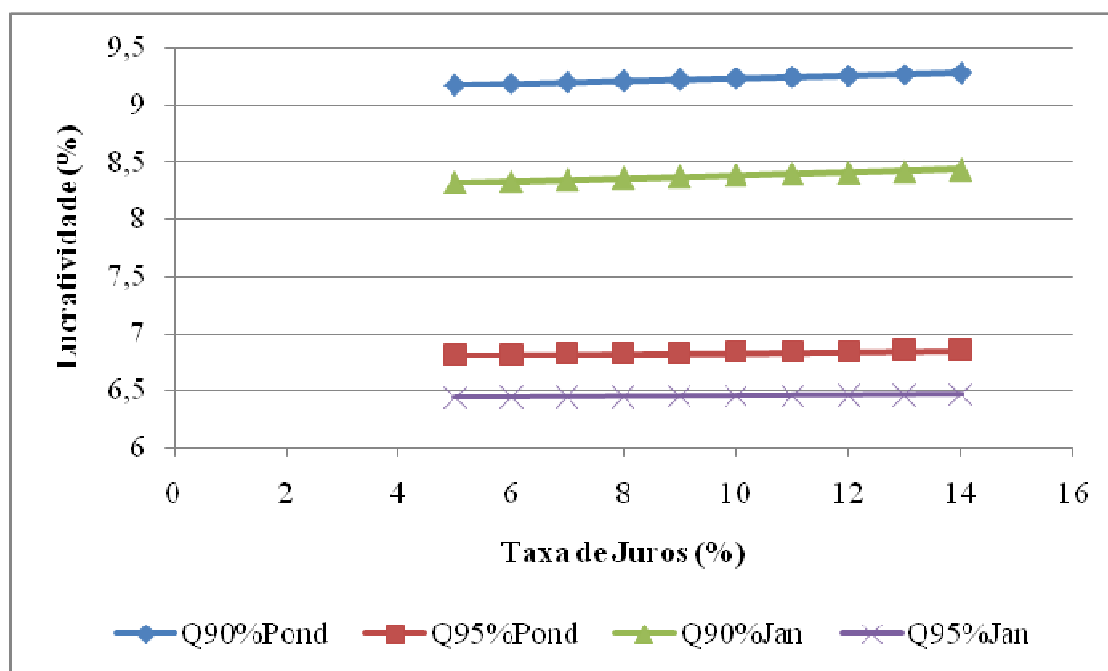


**Figura 5.1: Evolução do Benefício Líquido para o CASO 1**

A média da lucratividade (em percentual), para os Cenários com as Vazões de Referência, pode ser calculada através de:

$$LM(\%) = (0,1 - \text{Média de } ((W(SE) - W(Q_{ref}) / W(SE)) * 0,1)) * 100 \quad (5.1)$$

O gráfico abaixo mostra a lucratividade percentual em cada tempo para os Cenários com as Vazões de Referência do Caso 1.



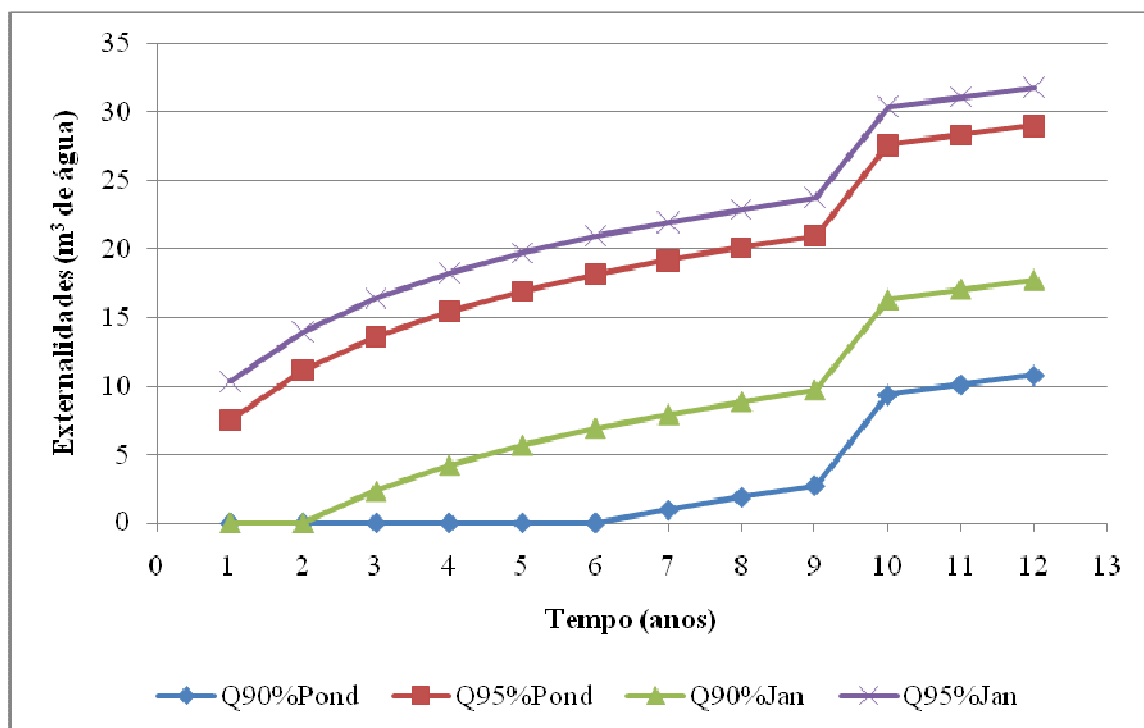
**Figura 5.2: Evolução da Lucratividade Percentual para o CASO 1**

Para o cenário com *Q90%Pond*, a média da lucratividade foi de 9,23%, sendo 9,18% o menor valor, obtido para a taxa de juros 5%, e 9,29% o maior, obtido para a taxa de 14%. Mesmo internalizando as externalidades, para esta Vazão de Referência o Cenário apresenta-se bastante promissor, com pequena redução nos lucros.

Já para o cenário com *Q90%Jan*, a média da lucratividade foi de 8,38%, sendo 8,33% o menor valor, obtido para a taxa de juros 5% e 8,44% o maior, obtido para a taxa de 14%. Também um Cenário bastante positivo.

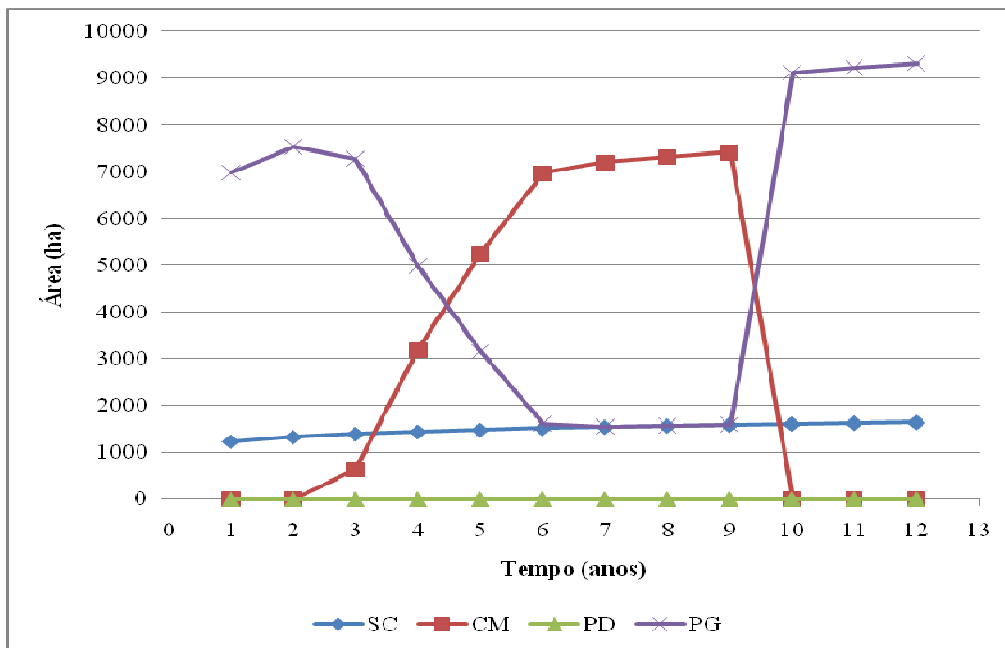
Com a absorção das externalidades, os cenários com as outras duas Vazões de Referência (*Q95%Pond* e *Q95%Jan*), gerariam lucros para o cultivo de arroz irrigado, sendo de 6,83% a média da lucratividade para a primeira vazão e de 6,46% para a segunda. Nota-se que, embora a redução da lucratividade em comparação com o caso de não haver limite de vazão a ser utilizada (SE), ela ainda ficou acima do custo de oportunidade (5%).

As externalidades geradas em cada ano, medidas em volume de água, podem ser vistas na Figura 5.3. Observa-se que, para *Q90%Pond*, somente são geradas externalidades a partir do tempo 7 e, para *Q90%Jan*, a partir do tempo 3, enquanto para as outras duas Vazões de Referência isto ocorre desde o tempo 1. Outra constatação que se faz é que, a partir do tempo 10, a uma elevação de todas as curvas. Isso significa que, para os valores adotados de custos de produção, é mais lucrativo usar um sistema que consome mais água, mas que tenha o custo de produção menor.



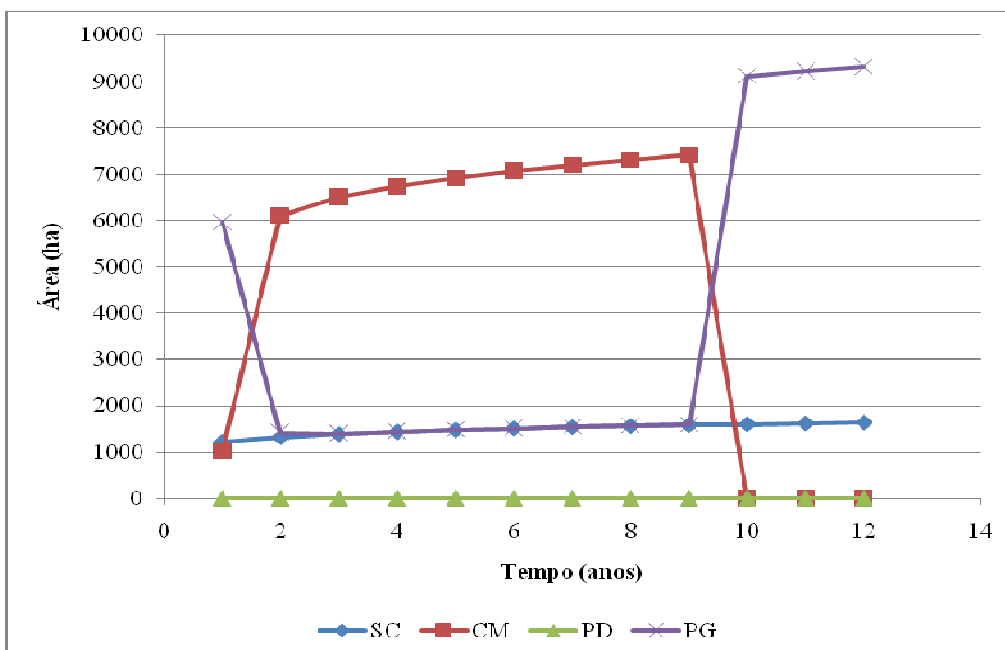
**Figura 5.3: Evolução das Externalidades para o CASO 1**

O comportamento dos Sistemas de Cultivo (Tecnologias de Produção) ao longo do período estudado, para os Cenários com Vazões de Referência são mostrados nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6.



**Figura 5.4: Evolução das Áreas do Sistema de Cultivo para Q90%Pond do CASO 1**

Nota-se que o Plantio Direto tem área nula em todos os tempos. Isso foi observado em todos os Cenários (inclusive para o CASO 2 e CASO 3) e já era esperado, já que o PD foi adotado com mesmo custo de produção que o CM, mas consome mais água que ele. As tabelas com os valores das áreas dos sistemas de cultivo são mostradas no ANEXO 2.



**Figura 5.5: Evolução das Áreas do Sistema de Cultivo para Q90%Jan do CASO 1**

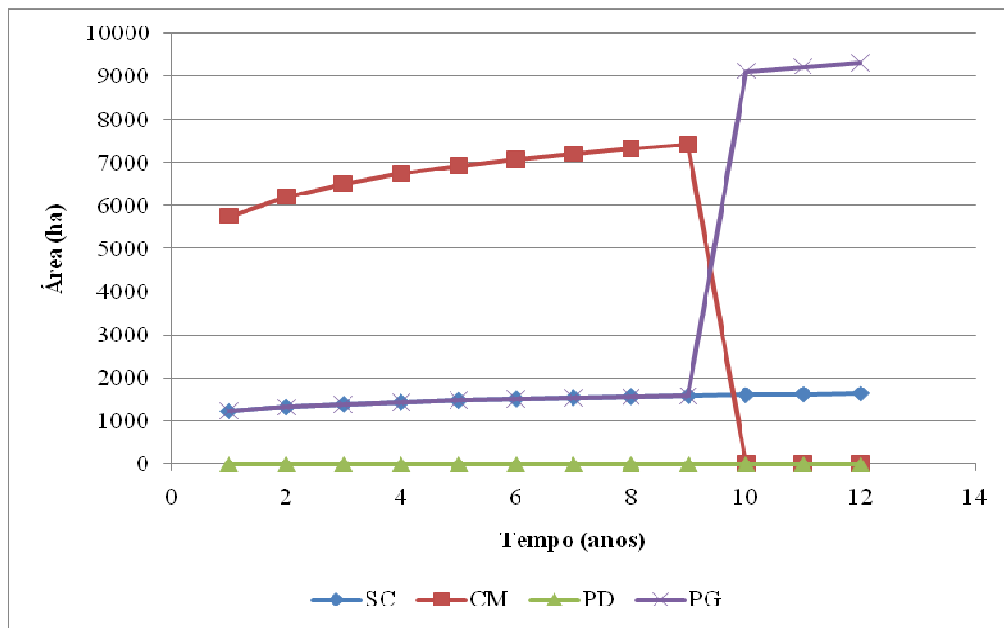


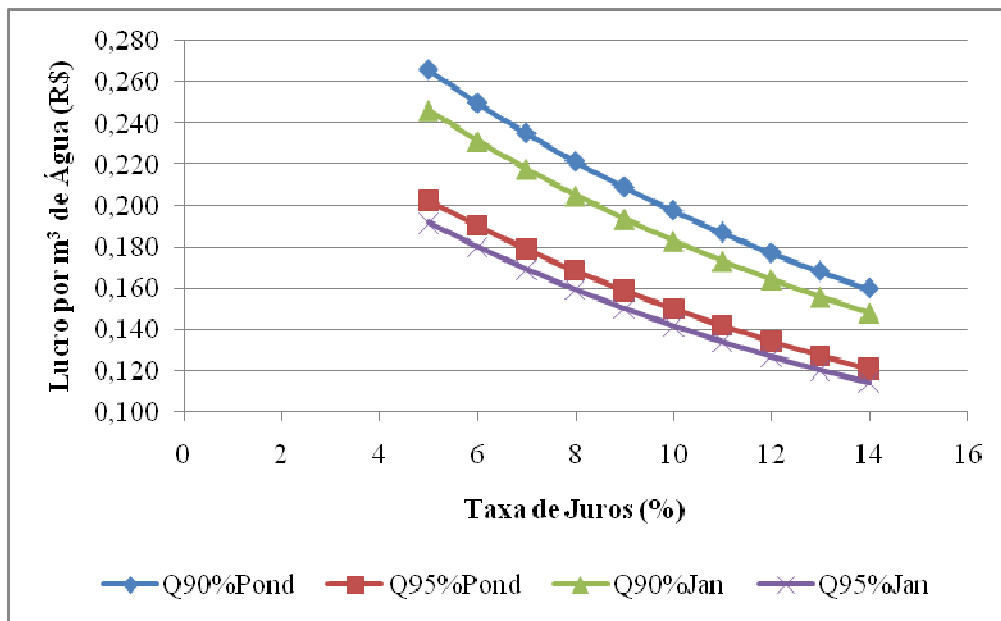
Figura 5.6: Evolução das Áreas do Sistema de Cultivo para Q95%Pond e Q95%Jan do CASO 1

A partir dos resultados anteriores pôde-se calcular o custo da água para o produtor e também o cálculo da rentabilidade do cultivo, em reais por metros cúbicos de água.

Por exemplo, para a *Q90%Pond* a rentabilidade média do cultivo (Benefício Líquido dividido pela quantidade total de água utilizada no período de estudo) foi de  $R\$0,21/m^3$ , variando entre  $R\$0,27/m^3$  para a taxa de juros de 5% e  $R\$0,16/m^3$  para a taxa de 14%.

Já para o pior Cenário (*Q95%Jan*) a rentabilidade média do cultivo foi de  $R\$0,15/m^3$ , variando entre  $R\$0,19/m^3$  para a taxa de juros de 5% e  $R\$0,11/m^3$  para a taxa de 14%.

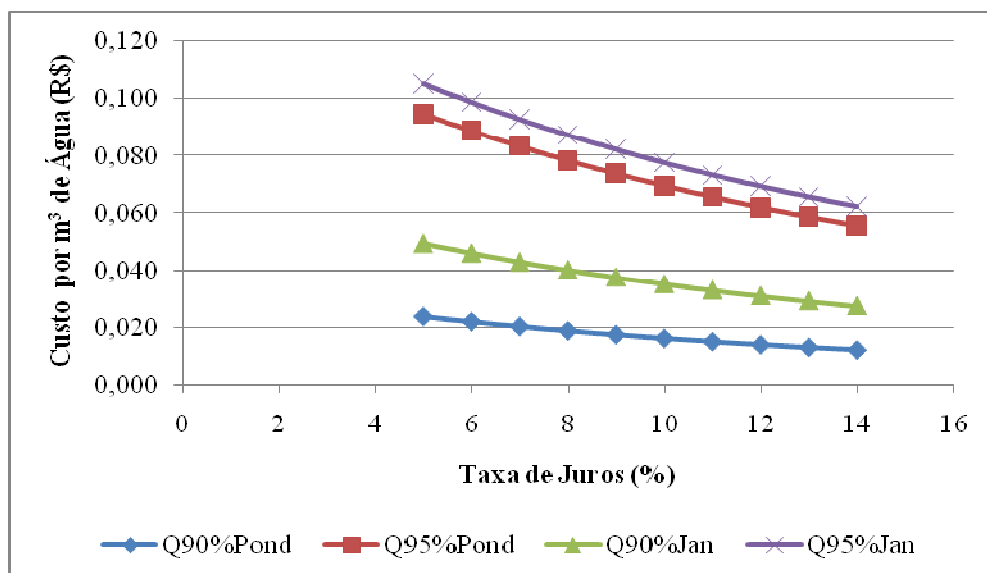
O comportamento da rentabilidade para os Cenários das Vazões de Referência estão ilustrados na figura 5.7.



**Figura 5.7: Evolução da Rentabilidade por m<sup>3</sup> de Água**

O custo médio da água total utilizada ( $W$  de  $SE$  menos o  $W$  da  $Q_{ref}$  dividido pela água total utilizada) para o Cenário com  $Q90\%Pond$  foi de  $R\$0,017/m^3$  variando de  $R\$0,024/m^3$  para a taxa de juros de 5% e  $R\$0,012/m^3$  para a taxa de 14%.

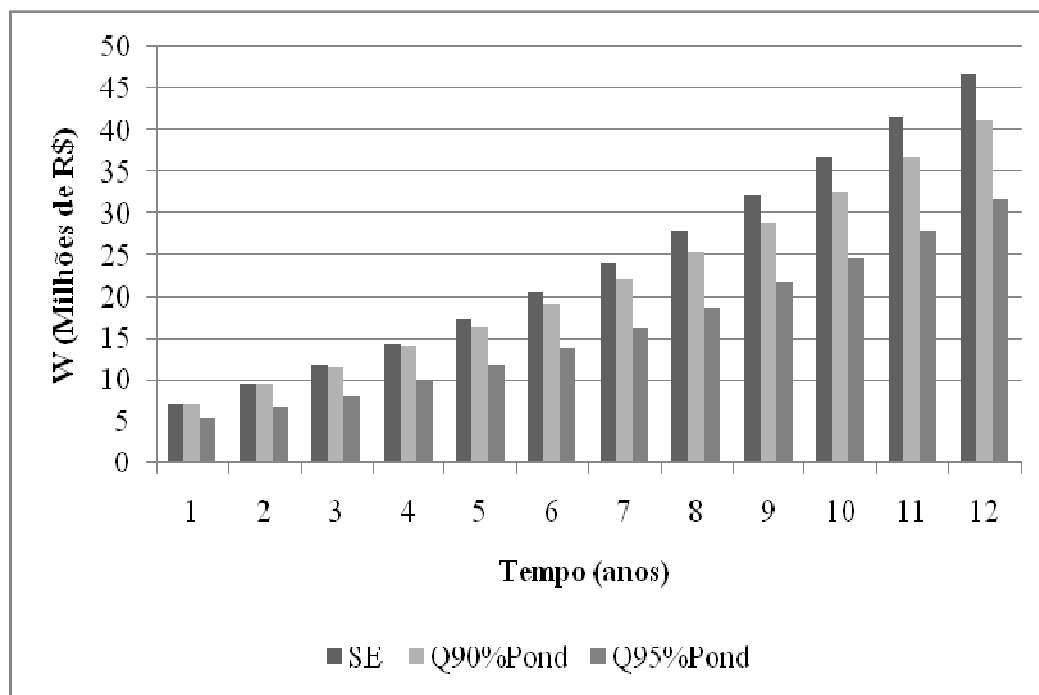
Para o pior Cenário ( $Q95\%Jan$ ), o custo médio da água total utilizada foi de  $R\$0,081/m^3$ , variando entre  $R\$0,105/m^3$  para a taxa de juros de 5% e  $R\$0,062/m^3$  para a taxa de 14%. Na Figura 5.8 é mostrado o comportamento do custo médio da água total para os Cenários das Vazões de Referência.



**Figura 5.8: Evolução do Custo por m<sup>3</sup> de Água**



Além das análises anteriores, foi realizado um estudo comparativo entre o fluxo de caixa gerado pelo Cenário Sem Externalidades (SE) com os gerados pelas Vazões de Referência *Q90%Pond* e *Q95%Pond*. Na figura 5.9 é possível visualizar as entradas ao longo do período de estudo.



**Figura 5.9: Fluxo de Caixa para Três Cenários do CASO 1**

Todas as entradas são positivas e consideram os ganhos e perdas do conjunto de sistemas de produção da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. A Figura 5.10 apresenta a redução dos ganhos entre os Cenários com as Vazões de Referência e em relação ao Cenário SE.

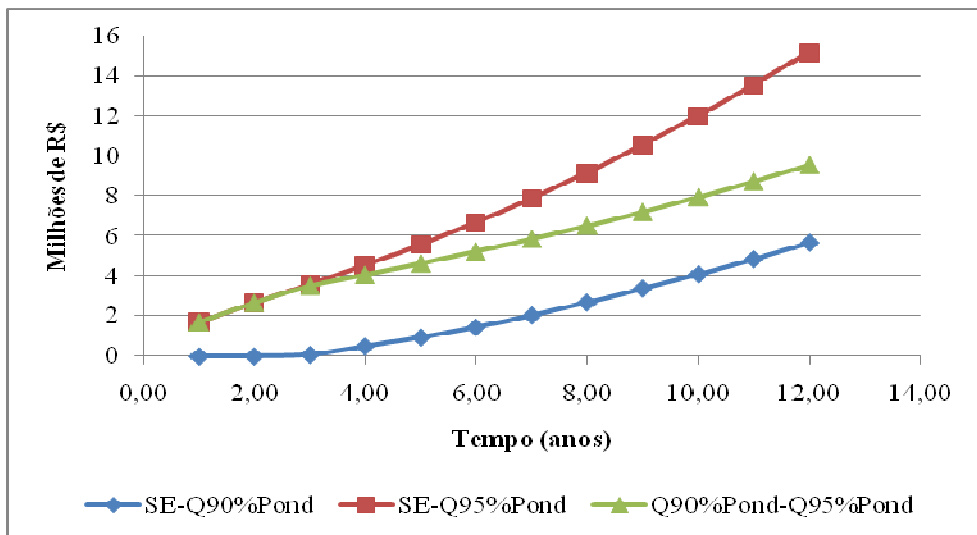


Figura 5.10: Comparativos das Diferenças nos Ganhos para os Três Cenários

Nota-se que a redução dos ganhos é mais acentuada para a Vazão de Referência *Q95%Pond*, por esta ser uma vazão mais restritiva. Durante todo o período de estudo as perdas são maiores para *Q95%Pond* em relação a *Q90%Pond* do que as perdas para *Q90%Pond* em relação a *SE*.

A figura 5.11 mostra a mesma comparação, só que para as Vazões de Referência *Q90%Jan* e *Q95%Jan* e o Cenário *SE*.

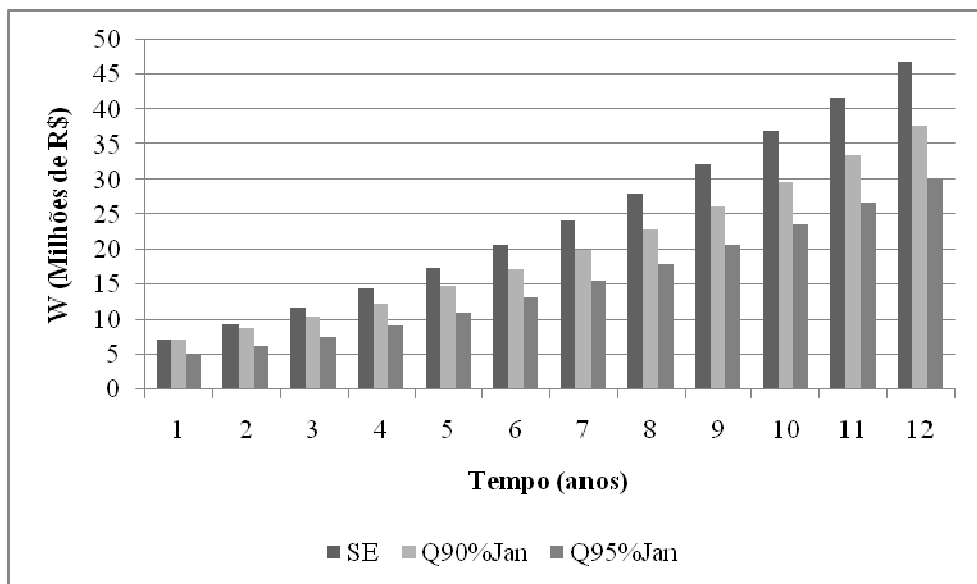


Figura 5.11: Fluxo de Caixa para Três Cenários do CASO 1

Na Figura 5.12 observa-se que a redução dos ganhos é maior para a Vazão de Referência *Q95%Jan*, da mesma maneira que ocorreu anteriormente. Mas as perdas para *Q90%Jan* em relação a *SE* ultrapassam as perdas para *Q95%Jan* em relação a *Q90%Jan* a partir do tempo 8.

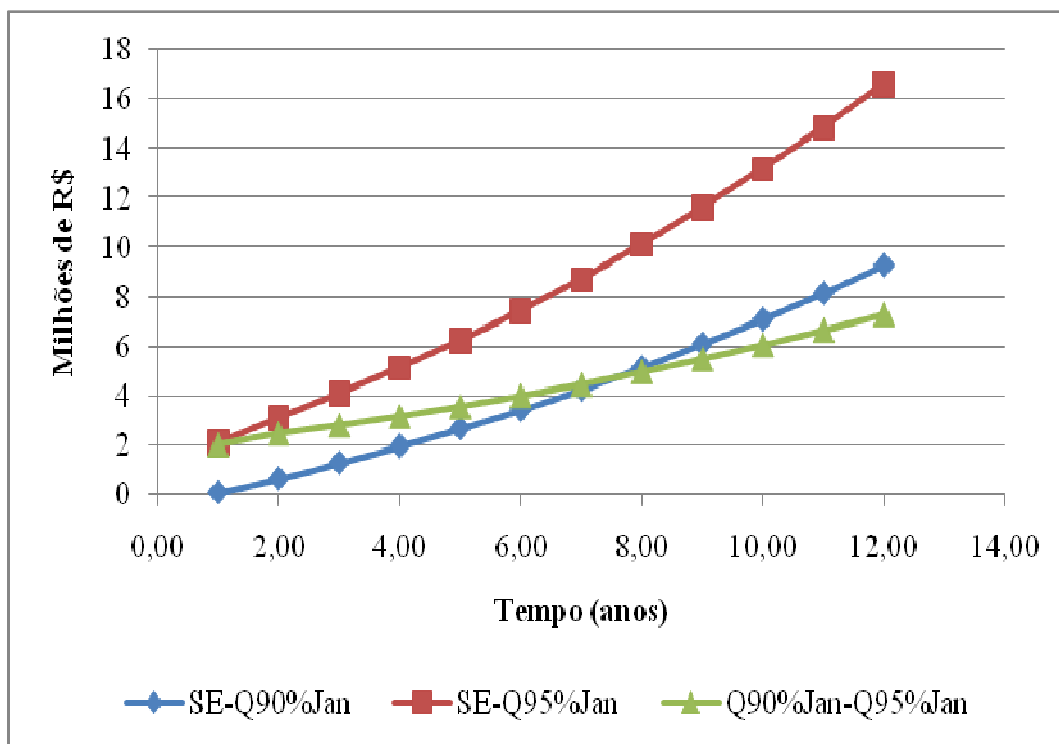


Figura 5.12: Comparativos das Diferenças nos Ganhos para os Três Cenários

## 5.2- CASO 2: TAXA DE JUROS E CUSTO DE OPORTUNIDADE FIXOS

Para o Caso 2, foram mantidos fixos a taxa de juros e o custo de oportunidade, em 8% e 5% respectivamente. Os valores obtidos do Benefício Líquido são mostrados na Tabela 5.2 e na Figura 5.13.

Também neste panorama, o cultivo de arroz na Bacia do Rio Pardo mostra que pode absorver os custos gerados pelas externalidades para todos os Cenários.

Tabela 5.2: CASO 2 – Benefício Líquido para Cada Cenário

Lucratividade do Arroz (%)	Benefício Líquido para cada Qref (R\$)				
	Sem Externalidades	Q90%Pond	Q95%Pond	Q90%Jan	Q95%Jan
5	142.263.124,04	128.774.291,84	87.917.658,97	114.188.242,76	81.502.418,99
6	148.057.955,98	134.569.123,77	93.712.490,90	119.983.074,69	87.297.250,93
7	153.852.787,91	140.363.955,71	99.507.322,84	125.777.906,63	93.092.082,87
8	159.647.619,85	146.158.787,65	105.302.154,78	131.572.738,57	98.886.914,80
9	165.442.451,79	151.953.619,58	111.096.986,71	137.367.570,50	104.681.746,74
10	171.237.283,72	157.748.451,52	116.891.818,65	143.162.402,44	110.476.578,68
11	177.032.115,66	163.543.283,46	122.686.650,58	148.957.234,38	116.271.410,61
12	182.826.947,60	169.338.115,39	128.481.482,52	154.752.066,31	122.066.242,55
13	188.621.779,53	175.132.947,33	134.276.314,46	160.546.898,25	127.861.074,48
14	194.416.611,47	180.927.779,27	140.071.146,39	166.341.730,18	133.655.906,42

Para o cenário com *Q90%Pond*, a média da redução da lucratividade foi de 8,09%, sendo 9,48% o maior valor, obtido para a taxa de lucratividade de 5%, e 6,94% o menor, obtido para a taxa de 14%, mostrando variação decrescente com o aumento da taxa de lucratividade.

Já para o cenário com *Q90%Jan*, a média da redução da lucratividade foi de 16,84%, sendo 19,73% o maior valor, obtido para a taxa de lucratividade de 5%, e 14,44% o menor, obtido para a taxa de 14%.

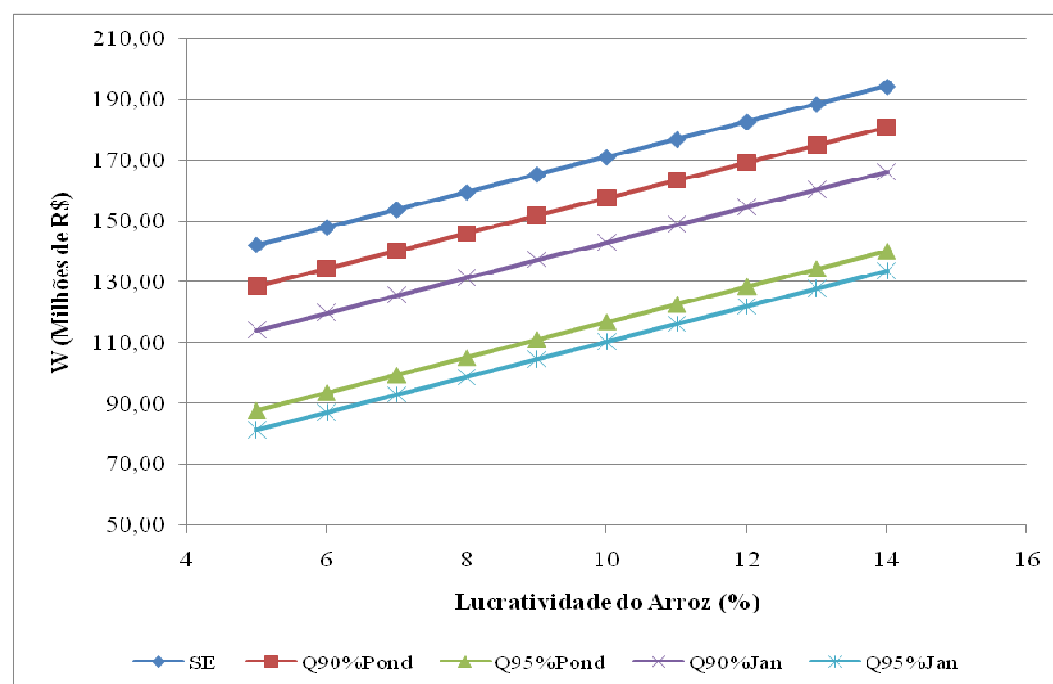


Figura 5.13: Evolução do Benefício Líquido para o CASO 2

Os Cenários com as Vazões de Referência *Q95%Pond* e *Q95%Jan*, ao internalizar os custos as externalidades, reduzem bastante os lucros e apresentam uma variação maior da lucratividade percentual, mas ambos têm uma queda da lucratividade menor que 50% da taxa de lucratividade, como pode ser observado no gráfico abaixo.

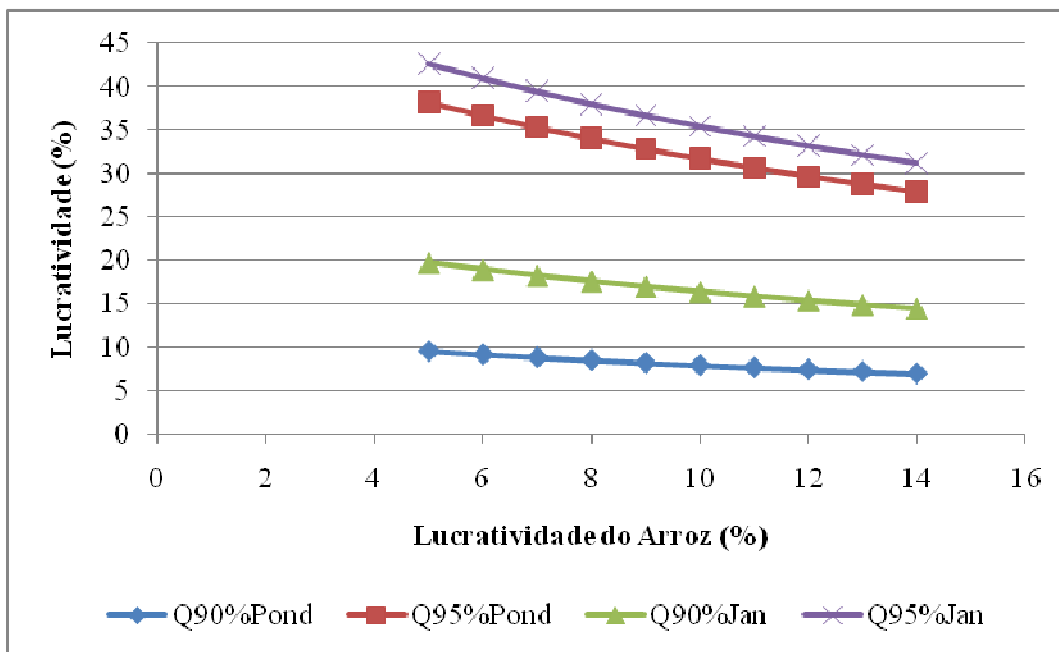


Figura 5.14: Evolução da Lucratividade Percentual para o CASO 2

### 5.3- CASO 3: LUCRATIVIDADE E TAXA DE JUROS FIXOS

No Caso 3, foram mantidos fixos a taxa de juros e a taxa de lucratividade, em 8% e 10% respectivamente. Os valores obtidos do Benefício Líquido são mostrados na Tabela 5.3 e na Figura 5.15.

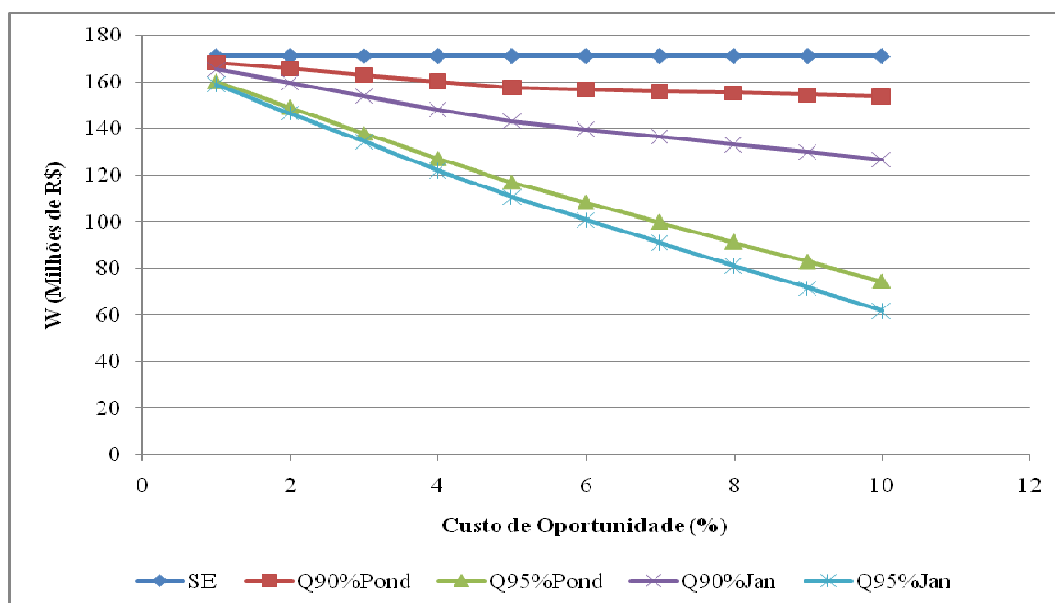
Da mesma maneira que os casos anteriores, o cultivo de arroz na Bacia do Rio Pardo mostra que pode absorver os custos gerados pelas externalidades para todos os Cenários.

**Tabela 5.3: CASO 3 – Benefício Líquido para Cada Cenário**

Custo de Oportunidade (%)	Benefício Líquido para cada Qref (R\$)				
	Sem Externalidades	Q90%Pond	Q95%Pond	Q90%Jan	Q95%Jan
1	171.237.283,72	168.468.402,91	160.171.255,27	165.457.542,77	158.888.207,27
2	171.237.283,72	165.699.522,11	149.105.226,81	159.677.801,82	146.539.130,82
3	171.237.283,72	162.930.641,30	138.039.198,35	153.898.060,86	134.190.054,37
4	171.237.283,72	160.161.760,49	127.046.369,18	148.149.544,36	121.914.177,20
5	171.237.283,72	157.748.451,52	116.891.818,65	143.162.402,44	110.476.578,68
6	171.237.283,72	156.811.997,59	108.273.187,05	139.711.179,44	100.574.899,08
7	171.237.283,72	156.028.350,33	99.807.362,11	136.412.763,11	90.826.026,15
8	171.237.283,72	155.244.703,08	91.341.537,18	133.114.346,78	81.077.153,22
9	171.237.283,72	154.461.055,82	82.875.712,24	129.815.930,45	71.328.280,29
10	171.237.283,72	153.677.408,56	74.409.887,31	126.517.514,12	61.579.407,36

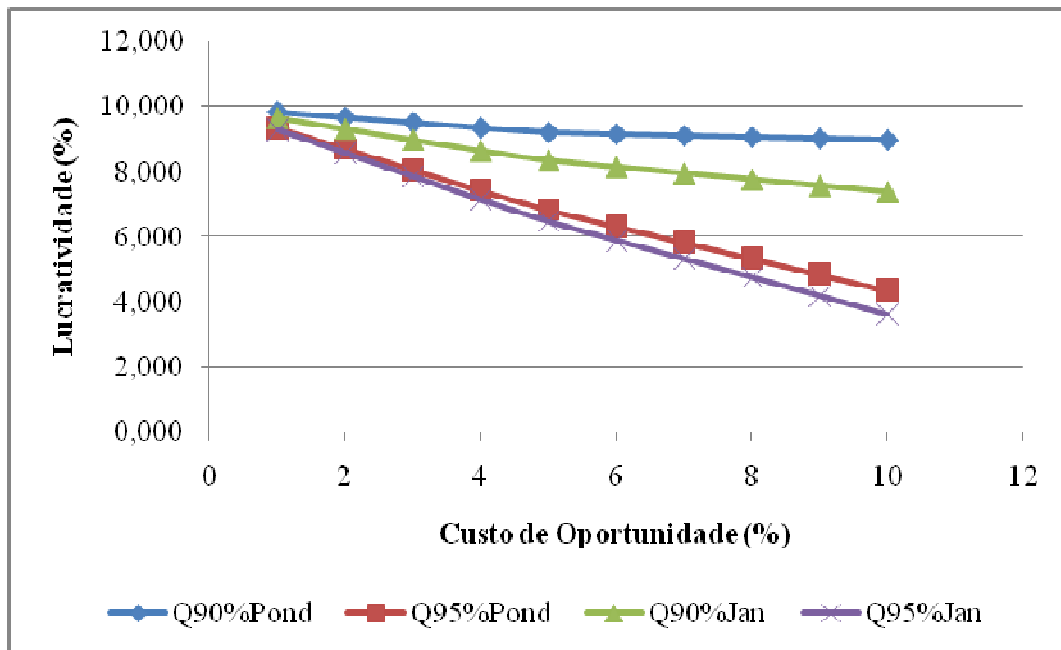
Para o Cenário com *Q90%Pond*, a média da lucratividade também foi semelhante a do Caso 1, ficando em 9,29%, sendo 8,98% o menor valor, obtido para o custo de oportunidade de 10%, e 9,84% o maior, obtido para o custo de oportunidade de 1%.

Já para o Cenário com *Q90%Jan*, a média da lucratividade foi de 8,39%, porém mostrando maior variabilidade que o Cenário com *Q90%Pond*, sendo 7,39% o menor valor, obtido para o custo de oportunidade de 10% e 9,67% o maior, obtido para o custo de oportunidade de 1%.



**Figura 5.15: Evolução do Benefício Líquido para o CASO 3**

Os Cenários com as Vazões de Referência *Q95%Pond* e *Q95%Jan*, apresentam uma grande variabilidade na lucratividade percentual, mostrando uma maior sensibilidade às mudanças no valor do custo de oportunidade, como pode ser observado Na figura 5.16.



**Figura 5 16: Evolução da Lucratividade Percentual para o CASO 3**

## 6- CONCLUSÕES

Este trabalho buscou avaliar a viabilidade econômica do cultivo de arroz irrigado em uma Bacia Hidrográfica, quando da internalização das externalidades por este sistema produtivo.

Para isto, foram utilizadas ferramentas econômicas associadas à Teoria dos Recursos Naturais Renováveis, sendo que a base destes conteúdos foi explanada na Fundamentação Teórica, onde também foram apresentados exemplos de aplicações de casos.

Através do uso das teorias foi possível desenvolver um modelo matemático que objetivava a maximização do Benefício Líquido para a Bacia Hidrográfica, fornecendo uma série temporal de áreas ótimas de cada tecnologia de produção de arroz.

Com dados obtidos em instituições voltadas para a cultura do arroz, em órgãos centralizadores de informações sobre abastecimento urbano e em relatórios sobre o Plano da Bacia do Rio Pardo realizou-se um Estudo de Caso para esta Unidade de Planejamento.

O Estudo de Caso foi realizado para três condições (Casos 1, 2 e 3). Em cada Caso foram estudados cinco Cenários: um sem limite de vazão a ser utilizada pelo cultivo de arroz e outros quatro tendo como limite Vazões de Referência, acima das quais foi cobrado um valor (custo de oportunidade) pela água utilizada em excesso.

Como resultados, os Cenários com as Vazões de Referência mostraram que podem internalizar os custos gerados a terceiros (externalidades) sem inviabilizar o cultivo de arroz irrigado na Bacia do Rio Pardo nos três Casos estudados.

O Cenário com *Q90%Pond* apresentou uma lucratividade percentual média de 9,23% para o Caso 1 e de 9,30% para o Caso 3, mostrando pouca perda em relação à lucratividade aplicada de 10% para o Cenário Sem Externalidades. Para o Caso 2, a média da redução da lucratividade foi de 9,29%.

Já o Cenário com *Q90%Jan* mostrou resultados abaixo dos obtidos para o cenário com *Q90%Pond*, mas ainda muito acima do Custo de Oportunidade de 5%. A lucratividade percentual média foi de 8,38% para o Caso 1 e de 8,39% para o Caso 3. Porém a lucratividade percentual para o Caso 3 mostrou uma maior variabilidade para esta Vazão de Referência, sendo 7,39% o menor valor e 9,66% o maior. O Caso 2 apresentou uma média da redução da lucratividade de 8,38%.

Os Cenários com *Q95%Pond* e *Q95%Jan* também apresentaram resultados positivos para o Benefício Líquido, porém muito próximos do valor do custo de oportunidade



de 5%. Apesar disto, podemos afirmar que não inviabilizaram economicamente o cultivo de arroz irrigado, pois a taxa de lucratividade utilizada (10%) foi calculada sobre valores referentes ao mês de fevereiro (mês da colheita do arroz), onde geralmente os preços estão mais baixos.

Para o Caso 1 também foi feita uma análise da rentabilidade e do custo unitário para a água total utilizada pelo cultivo de arroz no período analisado (12 anos), para o melhor Cenário (*Q90%Pond*) e para o pior (*Q95%Jan*). Para a rentabilidade média do melhor Cenário obteve-se o valor de  $R\$0,21/m^3$  e para o custo unitário da água  $R\$0,017/m^3$ . Para o pior Cenário, a rentabilidade média foi de  $R\$0,15/m^3$  e o custo unitário da água  $R\$0,081/m^3$ .

Ainda para o Caso 1 foi realizado um estudo comparativo entre o fluxo de caixa gerado pelo Cenário Sem Externalidades (SE) com os gerados pelas Vazões de Referência. Este estudo reafirmou que ambas as Vazões de Referência 95% apresentaram grandes perdas para o Benefício Líquido ao longo do período de tempo adotado, por serem as vazões mais restritivas.

Assim, foi possível desenvolver um modelo que maximiza o Benefício Líquido da cultura de arroz irrigado para a unidade de estudo (Bacia Hidrográfica) associando-se ferramentas econômicas e a Teoria dos Recursos Naturais Renováveis. Também pode-se afirmar que a incorporação dos prejuízos gerados a terceiros (externalidades) pelo cultivo de arroz irrigado não inviabiliza economicamente esta prática agrícola.

## **7- RECOMENDAÇÕES E LIMITAÇÕES DO MODELO**

Diversas simplificações foram adotadas pelo modelo, principalmente devido a falta de dados disponíveis. A título de exemplo, o custo de beneficiamento e armazenamento do arroz deveria ser considerado, assim como a variação mensal do preço do arroz ao longo de cada ano. Também não foi considerada a Evapotranspiração, que varia conforme a região em que se localiza a Bacia e pode alterar significativamente os dados de consumo de água para cada sistema de cultivo.

Dados ou estudos sobre os custos de cada tecnologia de produção praticamente inexistem, sendo que no modelo tiveram que ser adotados coeficientes aplicados sobre o custo do Sistema Convencional disponibilizado pelo IRGA. Séries temporais dos custos então, somente são encontradas para este sistema de cultivo.

É importante salientar que, a maximização do Benefício Líquido foi gerada para a unidade de estudo, e não para cada produtor individualmente. Estudos sobre mecanismos econômicos para corrigir este problema se fazem necessários.

Como sugestão para estudos futuros podemos citar a incorporação ao modelo de novas variáveis, além das anteriormente descritas, tais como a posse da terra e posição geográfica das propriedades na bacia.

Novos Cenários também devem ser objetos de estudos futuros. Como exemplo, pode-se estipular Cenários que adicionem às Vazões de Referência a quantidade de água contida nos reservatórios da Bacia, bem como considerar a Vazão Retirada ao invés da Vazão Consumida pelo cultivo de arroz irrigado.

Também como sugestão, podem ser realizados estudos que contemplem os riscos e as incertezas, como por exemplo, as quebras de safra.

Finalmente, análises de outros Cenários econômicos podem ser realizadas para verificar a viabilidade econômica da cultura, internalizando o custo das externalidades geradas.

## 8-REFERÊNCIAS

AMARAL, L.G.H., RODRIGUEZ, R. G., PRUSKI, F. F., RAMOS, M. M. **Vazão Retirada E Consumo Efetivo De Água Em Diferentes Sistemas De Irrigação Do Arroz**, Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.13, n.3, 178-192, Jul./Set., 2005.

AMIR, I.; FISHER, F. M., **Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model**, Agricultural Systems, 1999.

ANA (Agência Nacional de Águas). **A Evolução da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, 2002;

ANDRADE, J. F. R, RABUSKI, G. **Tendências nos Sistemas de Cultivo de Arroz Irrigado nos Municípios que Compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo**. Rio Pardo: Núcleo de Assistência Técnica do Instituto Rio-Grandense do Arroz, 16 de maio de 2005.

ASAFU-ADJAYE, J.. **Environmental Economics for Non-Economists**, World Scientific, 2.ed., 2005.

BANDEIRA, A. P. F., **Custos Ambientais na Análise de Viabilidade Econômica de Projetos de Mineração: Aplicação em Área Carbonífera do Estado de Santa Catarina**, 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

BRASIL. **Lei Federal n.9.433, de 08 de jan. de 1997**. Dispõe sobre a Política e Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

BRAVO, J. M., **Otimização da operação de reservatórios com múltiplos usos utilizando um algoritmo evolutivo**, Plano de Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

BRONDANI, G.; VEY, I. H.; MADRUGA, S. R.; TRINDADE, L. L.; VENTURINI, J. C.. **Diferenciais de custos em culturas de arroz: a experiência do rio grande do sul**. Revista Universo Contábil, Blumenau, v. 2, n. 1, p. 61-74, jan./abr. 2006.

BURCH, E.E., HENRY, W.R. **Opportunity and Incremental Cost; Attempt to define in Systems terms: a comment in.**: The Accounting Review, January, 1974.

CAMPONOGARA, E., **Métodos de Otimização**, UFSC, Florianópolis, 2003

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Editora Edgard Bluncher Ltda, 1999.

COMITÊ PARDO. Disponível em < <http://www.comitepardo.com.br/artigos/index.html> , 2007.> Acesso em: 6 mar.2007.

CONRAD, J. M.; CLARK, C. W. **Natural Resource Economics: Notes and Problems** . Cambridge: CUP, 1992.

CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento), **Relatório da Administração**, 2006.

DELLINK, R., **GAMS for Environmental-Economics Modelling**, Environmental Economics and Natural Resources Group, 2004.

DUARTE, C. C. **Renewable Resource Market Obeying Difference Equations: Stable Points, Stable Cycles**, and Chaos (1991), Environmental and Resource Economics 4, Kluwer Academic Publishers, 1994.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoBrasil/2007>.> Acesso em: 18 abr.2007.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Disponível em <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoTocantins/sist\\_preparo\\_solo.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrigadoTocantins/sist_preparo_solo.htm)>. Acesso em: 07 de jul. 2008.

FURTADO, R. D.; LUCA, S. J.: **Técnicas de Cultivo de Arroz Irrigado: Relação com a qualidade de água, protozoários e diversidade do Fitoplâncton**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande: v.7, n.1, 2003.

GAMS (General Algebraic Modeling System), Disponível em: < <http://www.gams.com/> , 2007.> Acesso em: 12 abr.2007.

HANLEY, N., SHOGREN, J. F., WHITE, B., **Environmental Economics: in theory and practice**. Oxford University Press, 1997.

HELFER, F., **Demandas e Disponibilidades Hídricas da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (RS) nos Cenários Atual e Futuro para Diferentes Sistemas de Produção de Arroz Irrigado**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

IRGA, (Instituto Rio Grandense do Arroz), **Censo da Lavoura de Arroz Irrigado do Rio Grande do Sul – Safra 2004/05**, 2006.

ITURRI, M.P. **Los Recursos de agua e suelo para La agricultura y El desarrollo rural**. Revista Comuniica, v. 4, n. 11, p. 35-50, 1999.

- KAUFMANN, A., **Methods and Models of Operation Research**, Prentice-Hall, 1963.
- LANNA, A. E.. **Aspectos Econômicos e Financeiros da cobrança pelo Uso da Água**. Caderno de Recursos Hídricos RBE Vol. 8/Nº 2, 1991.
- \_\_\_\_\_. **Gestão de Recursos Hídricos**. Notas de aula da disciplina de Gestão de Recursos Hídricos do curso de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS, 2004.
- LIMA, J. E. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. **O Uso da Irrigação no Brasil**. Disponível em: < <http://www.cf.org.br/cf2004/irrigacao.doc> , 2004.> Acesso em: 14 ago.2007.
- LINARES, P., RAMOS, A., SÁNCHEZ, P., SARABIA, A., VITORIANO, B., **Modelos Matemáticos de Optimizacion**, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2001.
- LUSTOSA, M. C., MAY, P. H., VINHA, V., **Economia do Meio Ambiente: Teoria e Prática**, Editora Campus, 2003.
- MACHADO, S. L. O., MARCHEZAN, E., RIGHES, R. C., VILLA, S. C. C., CAMARGO, E. R., **Consumo de água e perdas de nutrientes e de sedimentos na água de drenagem inicial do arroz irrigado**, Ciência Rural, Santa Maria, v.36 n.1, 2006, p. 65-71.
- MARCOLIN, E., MACEDO, V.R.M. **Consumo de Água em Três Sistemas de Cultivo de Arroz** (Oriza sativa L.). In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem,21,2001,Fortaleza.Anais...Fortaleza:ABID, 2001.p..59 – 63.
- MAS-COLELL, A., WHINSTON, M. D. **Microeconomic Theory**, Oxford University Press, 1995.
- MENDES, C. A. B., **Notas de aula da disciplina de Economia** do curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UFRGS, 2004.
- MUNDIGEO. **O Crescimento Demográfico no Mundo e a Produção de Alimentos**. Disponível em: < <http://jogligidel.tripod.com/crescimentodemografico.html>, 2007.> Acesso em: 14 ago.2007.
- MÜNIER, B., BIRR-PEDERSEN, K., SCHOU, J.S., **Combined ecological and economic modelling in agricultural land use scenarios**, Ecological Modelling, 174, 2004, p. 5-18.
- MUNRO, G. R. **Mathematical Bioeconomics and the Evaluation of Modern Fisheries Economics**, Bulletin of Mathematical Biology, Vol. 54, No. 2/3, 1992.

NOCEDAL, J., WRIGHT, S. J. **Numerical Optimization**, Springer-Verlang, New York, Inc, 1999.

PINDYCK, R. S., RUBINFELD, D. L. **Microeconomics**: Prentice-Hall International, Inc. Third Edition, 1996.

RECA, J.; ROLDÁN, J.; ALCAIDE, M.; LOPEZ, R.; CAMACHO, E., **Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems: I. Description of the model**. Agricultural Water Management 48, 2001.

RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza**, 3. ed., Editora Guanabara Koogan S.A., 1996.

SEMA (Secretária do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul). **Resolução 030/06** do Conselho de Recursos Hídricos, 2006.

SEMA (Secretária do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul), DRH (Departamento de Recursos Hídricos). **Consolidação do Conhecimento sobre os Recursos Hídricos da Bacia do Rio Pardo e Elaboração do Programa de Ações da Sub-Bacia do Rio Pardinho, Relatório da Etapa A**, 2005.

SHIKLOMANOV, I. A. **World Water Resources: A New Appraisal and Assessment for the 21st Century**. Paris: UNESCO, 1998.

SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento), Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/>> Acesso em: 20 set 2008.

SOUSA, M. C. S. **Notas de aula da disciplina Economia do Setor Público** do curso de Ciências Econômicas da UNB, 2004.

SRH do MMA Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/index.html>> Acesso em: 15 mar. 2008.

STONE, L. F. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado** / Luís Fernando Stone. – Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005.

**ANEXOS**

# ANEXO 1: MODELO NO GAMS PARA CENÁRIO *Q90%Pond* DO CASO , COM TAXA DE JUROS DE 8%

## SETS

t tempo em anos /t1\*t12/

i sistemas de cultivo /SC, CM, PD, PG/;

## PARAMETERS

p(t) preço do arroz no tempo t

cp(t) custo de produção do arroz no tempo t

cext(t) custo da externalidade no tempo t

Q(i) vazão consumida por cada sistema de cultivo /SC 5998, CM 5431, PD  
5455, PG 6216/ ;

$p(t) = 1.1*(43.638*(ord(t)+7)**2 - 133.58*(ord(t)+7) + 1264.6);$

$cp(t) = 43.638*(ord(t)+7)**2 - 133.58*(ord(t)+7) + 1264.6;$

$cext(t) = 0.05*(0.0241*(ord(t)+7)**2 + 0.0162*(ord(t)+7) + 1.4638);$

## SCALAR

delta taxa anual de inflação /0.05/

Xtini area total cultivada para o ano de 2004 /8220.33/

Qref *Q90%Jan* /50025600/;

## VARIABLES

w renda líquida

Xt(t) area total

F(t) Função Crescimento

x(i,t) função area plantada do sistema i no tempo t

ext(t) externalidade m3 além da Qref

Agt(t)

ex2(t)

c(i,t) custo de produção de cada sistema de cultivo no tempo t

Pre(t)

Cust(t)



CustExt(t)

N(t)

## POSITIVE VARIABLES

x

Xt

ext

## EQUATIONS

obj função objetivo

QXt(t) Equação do recurso natural

QF(t) Equação da função Crescimento

SAt(t) Soma das areas de cada sistema de cultivo em cada t

QAgt(t) quantidade de agua total utilizada em cada t

Qext(t) m3 além da Q90%

QcSC(t) custo de produção sistema convencional

QcCM(t) custo de produção cultivo mínimo

QcPD(t) custo de produção plantio direto

QcPG(t) custo de produção pré-germinado

Maior(t) area do SC maior ou igual a 15% da area total

Maior1(t) area do PG maior ou igual a 15% da area total

QPre(t)

QCust(t)

QCustExt(t)

QN(t)

foo(t) ;

obj.. w =e= sum((i,t),((1/(1+delta))\*\*(ord(t)-1)\*(p(t)\*x(i,t)-c(i,t)\*x(i,t)-(ext(t)\*cext(t))/4)));

QXt(t).. Xt(t)=e= Xtini\$(ord(t) EQ 1)+ (Xt(t-1)+F(t))\$(ord(t) GT 1);

QF(t).. F(t) =e= 1281.7\*(ord(t))\*\*(-0.988);

SAt(t).. sum(i,x(i,t)) =e= Xt(t);

QAgt(t).. Agt(t) =e= (sum(i,(x(i,t)\*Q(i))));

Qext(t).. ex2(t) =e= Agt(t)-Qref;

foo(t).. ext(t)=g=ex2(t);

QcSC(t).. c("SC",t)=e= cp(t);

QcCM(t).. c("CM",t)=e= 0.8\*cp(t);

QcPD(t).. c("PD",t)=e= 0.8\*cp(t);

$QcPG(t).. c("PG",t)=e= 0.77*cp(t);$   
 $Maior(t).. x("SC",t)=g= 0.15*Xt(t);$   
 $Maior1(t).. x("PG",t)=g= 0.15*Xt(t);$   
 $QPre(t).. Pre(t)=e=sum(i,(p(t)*x(i,t)));$   
 $QCust(t).. Cust(t)=e=sum(i,(c(i,t)*x(i,t)));$   
 $QCustExt(t)..CustExt(t)=e=ext(t)*cext(t);$   
 $QN(t)..N(t)=e= sum(i,(p(t)*x(i,t)-c(i,t)*x(i,t)-(ext(t)*cext(t))/4));$

MODEL DISSERTA /ALL/;

option nlp=minos;

SOLVE DISSERTA USING nlp MAXIMIZING w;

Display w.l, x.l, ex2.l, Xt.l, F.l, ext.l, cext, cp, p, c.l, Pre.l, Cust.l, CustExt.l, N.l;

execute\_unload 'Caso1Agt(t)Q90%Jan.gdx' Agt.l

execute 'gdxxrw.exe Caso1Agt(t)Q90%Jan.gdx var=Agt.l'

## ANEXO 2: ÁREA DOS SISTEMAS DE CULTIVO

### Caso 1 Q90%Pond

<i>Sistemas de Cultivo (ha)</i>	<i>Tempo (anos)</i>											
	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	<i>t5</i>	<i>t6</i>	<i>t7</i>	<i>t8</i>	<i>t9</i>	<i>t10</i>	<i>t11</i>	<i>t12</i>
<i>SC</i>	1.233,05	1.329,98	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	1.610,17	1.628,16	1.644,67
<i>CM</i>	0,00	0,00	629,91	3.196,18	5.254,70	6.973,89	7.204,58	7.319,56	7.421,92	0,00	0,00	0,00
<i>PD</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>PG</i>	6.987,28	7.536,55	7.274,61	4.985,27	3.148,89	1.615,22	1.543,84	1.568,48	1.590,41	9.124,32	9.226,25	9.319,79

### Caso 1 Q95%Pond

<i>Sistemas de Cultivo (ha)</i>	<i>Tempo (anos)</i>											
	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	<i>t5</i>	<i>t6</i>	<i>t7</i>	<i>t8</i>	<i>t9</i>	<i>t10</i>	<i>t11</i>	<i>t12</i>
<i>SC</i>	1.233,05	1.329,98	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	1.610,17	1.628,16	1.644,67
<i>CM</i>	5.754,23	6.206,57	6.509,60	6.737,66	6.920,60	7.073,38	7.204,58	7.319,56	7.421,92	0,00	0,00	0,00
<i>PD</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>PG</i>	1.233,05	1.329,98	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	9.124,32	9.226,25	9.319,79

### Caso 1 Q90%Jan

<i>Sistemas de Cultivo (ha)</i>	<i>Tempo (anos)</i>											
	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	<i>t5</i>	<i>t6</i>	<i>t7</i>	<i>t8</i>	<i>t9</i>	<i>t10</i>	<i>t11</i>	<i>t12</i>
<i>SC</i>	1.233,05	1.329,98	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	1.610,17	1.628,16	1.644,67
<i>CM</i>	1.023,14	6.113,16	6.509,60	6.737,66	6.920,60	7.073,38	7.204,58	7.319,56	7.421,92	0,00	0,00	0,00
<i>PD</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>PG</i>	5.964,14	1.423,39	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	9.124,32	9.226,25	9.319,79

### Caso 1 Q95%Jan

<i>Sistemas de Cultivo (ha)</i>	<i>Tempo (anos)</i>											
	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t4</i>	<i>t5</i>	<i>t6</i>	<i>t7</i>	<i>t8</i>	<i>t9</i>	<i>t10</i>	<i>t11</i>	<i>t12</i>
<i>SC</i>	1.233,05	1.329,98	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	1.610,17	1.628,16	1.644,67
<i>CM</i>	5.754,23	6.206,57	6.509,60	6.737,66	6.920,60	7.073,38	7.204,58	7.319,56	7.421,92	0,00	0,00	0,00
<i>PD</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>PG</i>	1.233,05	1.329,98	1.394,92	1.443,79	1.482,99	1.515,73	1.543,84	1.568,48	1.590,41	9.124,32	9.226,25	9.319,79

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)