

ALOCAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS NO CONTEXTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Adriano de Paula Fontainhas Bandeira^{1} & Carlos André Bulhões Mendes²*

Resumo – Os impactos ambientais provocados pela exploração de recursos naturais causam prejuízos a terceiros, pois a ação destes agentes sobre o meio prejudica e, em alguns casos, inviabiliza a existência de outras atividades. Nesse contexto, enquadram-se a mineração de carvão e agricultura de arroz irrigado. A mineração e o beneficiamento de carvão possibilitam o contato da água com resíduos formando a drenagem ácida de mina que pode escoar para cursos d'água adjacentes prejudicando outros usos da água. O cultivo de arroz irrigado exige a captação de grandes volumes de água, causando sua escassez. O desenvolvimento de ambas as atividades em uma mesma bacia hidrográfica acarreta elevada pressão sobre os recursos hídricos, tendo em vista que a captação para irrigação diminui a vazão nos cursos d'água, agravando a concentração dos contaminantes oriundos da mineração. Assim, o presente trabalho tem por objetivo elaborar uma metodologia de planejamento da alocação de recursos naturais, buscando produção ótima tanto do minério quanto do cultivo com a internalização dos custos ambientais a fim de que os parâmetros de qualidade da água, estabelecidos pela Resolução 357 do CONAMA, sejam respeitados e a incidência de prejuízos a terceiros seja evitada.

Palavras-Chave – Bacia Hidrográfica, Recursos Naturais, Otimização.

ALLOCATION OF NATURAL RESOURCES IN THE CONTEXT OF RIVER BASINS

Abstract – The environmental impacts caused by natural resources exploration cause damages to third parties, since these agents' actions harm the environment and, in some cases, make the existence of other activities unfeasible. This context includes coal mining and irrigated rice cropping. Coal mining and beneficiation make possible the contact between water and coal waste generating acid mine drainage, which may flow into adjacent rivers, in most cases, damaging other water uses. The cultivation of rice requires the capture of large volumes of water, causing its scarcity. The development of both activities in the same river basin causes high pressure on water resources because the capture for irrigation reduces the flow in rivers, exacerbating the concentration of contaminants from mining. Thus, this study aims to develop a methodology to plan the allocation of natural resources, seeking optimum production of both the ore and the cultivation with the internalization of environmental costs so that water quality parameters, given by CONAMA's Resolution 357, are respected and the incidence of damage to third parties is avoided.

Keywords – River Basin, Natural Resources, Optimization.

1- INTRODUÇÃO

A escassez de água não está relacionada apenas com fenômenos meteorológicos, mas também com a forma pela qual ela é utilizada. O aparecimento de novas atividades aliado à expansão das existentes em determinada região aumenta a demanda por recursos naturais, dentre os quais a água. O esgotamento do recurso, entretanto, não se dá apenas por sua exploração incessante, mas também

¹ Professor Doutor do Curso de Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia, e-mail: adrianopfb@gmail.com

² Professor Doutor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: Mendes@iph.ufrgs.br

* Autor Correspondente

pela poluição do ambiente natural. Jager *et al* (2000) acreditam que a relação humana com o ecossistema apresenta duas faces: a dependência do ecossistema como fonte de recursos e sua poluição causada pela disposição de resíduos.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estabelecer um mecanismo de controle da descarga da drenagem ácida de mina (DAM) e de redução do desperdício de água inerente à agricultura irrigada, situação comum, por exemplo, no estado de Santa Catarina. Realiza-se a maximização da renda dos empreendimentos mineiros e agrícolas localizados na bacia hidrográfica, considerando restrições impostas por limites de concentração de poluentes nos cursos d'água e pela manutenção de uma vazão remanescente.

2- EXPLOTAÇÃO DE CARVÃO MINERAL

Nesta seção, são descritos os modos de produção de carvão mineral, a formação da drenagem ácida de mina e as tecnologias existentes para tratamento de efluentes.

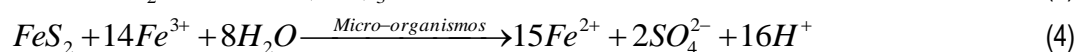
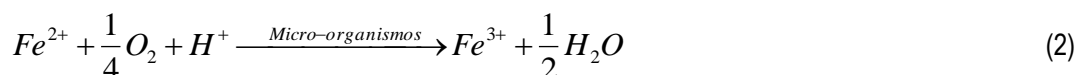
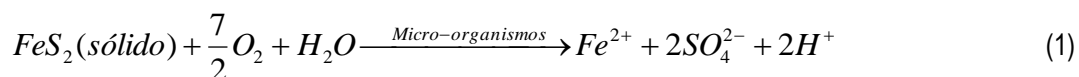
2.1 Produção de Carvão Mineral

A combinação da profundidade da camada de carvão e da litologia estabelece se o método de lavra será subterrâneo ou a céu aberto. A lavra subterrânea ocorre, em geral, quando a camada de carvão mineral está localizada em grandes profundidades ou quando a camada de solo e rochas que a cobre (*overburden*) apresenta dificuldades de remoção. A lavra a céu aberto ocorre quando é possível remover o *overburden*. Após sua remoção, a lavra se inicia.

Em relação à contaminação dos corpos d'água, especial atenção deve ser dada à entrada de águas pluviais nas escavações. A retirada do *overburden* e os trabalhos superficiais são responsáveis pela alteração da drenagem natural do terreno e do regime de infiltração de água no subsolo.

2.2 Formação da Drenagem Ácida de Mina (DAM)

Em contato com ar, água e micro-organismos, minerais ricos em enxofre, como a pirita (FeS_2), se oxidam e produzem ácido sulfúrico. Concomitantemente, ferro e outros metais são descarregados na água. Com pH abaixo de 4,5, as reações (1), (2) e (4) são catalisadas por micro-organismos, elevando a acidez. O aumento da acidez provoca a dissolução de outros metais. Gusek (2005) apresenta as quatro reações do processo:



2.3 Técnicas de Tratamento de Efluentes da Mineração

As ações para o tratamento do efluente gerado pelas escavações, pela lavagem do minério ou pela lixiviação dos depósitos de resíduos são classificadas como tratamento passivo e ativo.

Piramid Consortium (2003) define o tratamento passivo como “a melhoria da qualidade da água com a utilização de fontes de energia naturalmente disponíveis, em sistemas de tratamento com escoamento por gravidade, projetados para que necessitem de pouca, porém regular, manutenção para operarem de forma bem-sucedida por toda sua vida útil”. As principais estruturas desse tipo de tratamento são as lagoas anaeróbica e aeróbica, o canal calcário óxico, o dreno calcário anóxico, a bacia de fluxo vertical e o leito de remoção de manganês.

O tratamento ativo de drenagem ácida de mina consiste na adição de um reagente que seja capaz de provocar a precipitação de contaminantes para posterior remoção. É mais utilizado em soluções temporárias, em águas com alta contaminação ou quando há pouca disponibilidade de espaço (Coulton e Williams, 2005). Os principais reagentes utilizados são: soda cáustica (NaOH), cal hidratada (Ca(OH)₂), cal virgem (CaO) e amônia (NH₃). Também podem ser utilizados o óxido de magnésio (MgO), o hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) e o carbonato de sódio (Na₂CO₃).

3- CULTIVO DO ARROZ E SUA DEMANDA HÍDRICA

Os sistemas de cultivo empregados para o arroz irrigado diferenciam-se, basicamente, quanto ao preparo do solo, aos métodos de semeadura e ao manejo da água (SOSBAI, 2007). São eles: convencional, pré-germinado, cultivo mínimo, mix, plantio direto e transplante de mudas.

A demanda hídrica de uma lavoura de arroz possui cinco componentes no caso de sistemas de cultivo com semeadura em solo seco (sistemas convencional, cultivo mínimo e plantio direto): saturação do solo, formação da lâmina após emergência, evapotranspiração, perdas por percolação lateral e profunda. Nos sistemas com semeadura em solo inundado, não há a fase de formação da lâmina após emergência, mas há a formação da lâmina para preparo do solo.

No sistema de plantio com sementes pré-germinadas, há um período de irrigação maior com início no preparo do solo. Em compensação, durante o ciclo da cultura utiliza-se um menor volume de água. Pode-se afirmar, portanto, que a escolha do sistema de cultivo não implica grandes variações no consumo de água, conforme Machado *et al* (2006).

4- METODOLOGIA

A alocação de recursos naturais no tempo consiste em um problema de otimização dinâmica. Nesses problemas, maximiza-se um valor econômico líquido, dadas restrições de consumo e outras. A solução é o consumo que deve ser realizado em cada unidade periódica adotada.

4.1 Recursos Naturais Renováveis: o caso do arroz irrigado

A receita dos empreendedores agrícolas é dada pelo produto entre a quantidade de arroz produzida (Y) e seu preço unitário (p₂).

$$\text{Receita}_{\text{prod}_{\text{arroz}}} = p_2 \cdot Y(k, t) \quad (5)$$

Os custos de produção do arroz dependem do sistema de cultivo adotado pelo empreendedor. Assim, formula-se a equação 6.

$$\text{Produção} = C \text{Prod}(sc) \cdot Y(k, t) \quad (6)$$

A vazão alocada para cada empreendedor agrícola corresponde à quantidade de água utilizada para irrigação durante o período de plantio do arroz. Dessa forma, a equação 7 apresenta o conjunto de restrições dado pela função esforço-produção.

$$Y(k,t) \leq \frac{\left(\sum Q_{alocada}(k,t)\right) * Prod(sc)}{DemHíd(sc)} \quad (7)$$

Portanto, a rotina de maximização da produção de arroz é dada pelas equações 8 a 10:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \rho^t [p2 \cdot Y(k,t) - C \text{Prod}(sc) \cdot Y(k,t)] \quad (8)$$

Sujeito a:

$$Y(k,t) \leq \frac{\left(\sum Q_{alocada}(k,t)\right) * Prod(sc)}{DemHíd(sc)} \quad (9)$$

$$AP_{mínima} \leq \frac{Y(k,t)}{Prod(sc)} \leq AP_{máxima} \quad (10)$$

A equação 10 diz respeito à suposição de uma área mínima a ser plantada e uma área máxima igual à área total que o empreendedor dispõe para o cultivo de arroz.

4.2 Recursos Naturais Não Renováveis: o caso do carvão mineral

A receita da mineradora pode ser dada pelo produto entre a quantidade (q) de minério por ela produzida (*run of mine*) e o preço unitário do carvão mineral (p1), descontando-se a quantidade de resíduos (ε) por tonelada de ROM:

$$\text{Receita}_{carvão} = p1 \cdot q(i,t) \cdot (1 - \varepsilon) \quad (12)$$

Os custos de exploração do carvão mineral dependem da tecnologia adotada. Assim, com base nos dados apresentados, formula-se a equação 13.

$$\text{Extração} = CExp_{ex}(i) \cdot q(i,t) \quad (13)$$

Os custos de beneficiamento do carvão mineral são dados pela equação 14.

$$\text{Beneficiamento} = CBen(i) \cdot q(i,t) \quad (14)$$

O valor total dos custos de tratamento de efluentes (M_{0ij} na equação 15) é dividido em parcelas mensais ao longo do tempo de exploração da mina. Assim, as parcelas do custo de tratamento j (C_{trat_j}) são dadas pela equação 15.

$$C_{trat_j}(i) = \frac{M_{0ij} (1 + \delta)^t \delta}{(1 + \delta)^t - 1} \quad (15)$$

Deve ainda ser considerada a reserva a ser explorada em cada jazida, bem como o seu esgotamento ao final do tempo de exploração. Tais restrições são dadas pelas equações 16 e 17.

$$R(i, t = 0) = R \quad (16)$$

$$R(i, t = T) = 0 \quad (17)$$

As restrições consideradas no modelo são referentes ao balanço de massa e à concentração de poluentes nos cursos d'água. O balanço de massa é dado pela equação 16.

$$R(i, t) = R(i, t - 1) - q(i, t) \quad (18)$$

Para a concentração de poluentes nos cursos d'água é necessário conhecer as seções dos rios onde são analisados os limites de concentração de contaminantes, o limite de concentração tolerável do poluente l ($Lim(l)$) e a vazão mensal do rio no trecho considerado e no tempo t ($Q(i,t)$). A carga de poluentes despejada nos rios é dada pelo produto entre a vazão do efluente do tratamento e a concentração de cada contaminante pós tratamento. Assim, formula-se a equação 19:

$$C \text{ arg } a(l, i, t) = Q_{\text{efluente}}(i, t) * \eta(i, t) * \text{Conc}(l, i) \quad (19)$$

A vazão alocada para cada mina corresponde à quantidade de água utilizada para diluição de seus efluentes. Então, a contaminação causada por uma mina é escrita conforme a equação 20.

$$\text{Cont}(l, i, t) = \frac{Q_{\text{efluente}}(i, t) * \eta(i, t) * \text{Conc}(l, i)}{Q_{\text{alocada}}(i, t)} \quad (20)$$

A vazão efluente de cada mina varia com o tempo, pois para cada tonelada de minério extraída é necessária uma quantidade de água (K) para que se consiga separar os resíduos. Dessa forma a vazão efluente mensal (Q_{efluente}) originada por cada mina pode ser dada pela equação 21.

$$Q_{\text{efluente}}(i, t) = K * q(i, t) \quad (21)$$

De posse de tais parâmetros, obtém-se o conjunto de restrições dado pela equação 22.

$$\frac{Q_{\text{efluente}}(i, t) * \eta(i, t) * \text{Conc}(l, i)}{Q_{\text{alocada}}(i, t)} \leq \text{Lim}(l) \quad (22)$$

O parâmetro Lim (l) diz respeito à concentração permitida para determinado contaminante. Valores mínimos e máximos para a produção são considerados conhecidos. Portanto a rotina de maximização da produção de carvão é dada pelas equações 23 a 28:

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \rho^t [p * q(i, t) * (1 - \varepsilon) - C \text{Exp}_{\text{ex}}(i) * q(i, t) - C \text{Ben} * q(i, t) - C \text{Trat}_j(i)] \quad (23)$$

Sujeito a:

$$R(i, t = 0) = R(i); \quad (24)$$

$$R(i, t) = R(i, t - 1) - q(i, t); \quad (25)$$

$$R(i, t = T) = 0; \quad (26)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^m Q_{\text{efluente}}(i, t) * \eta(i, t) * \text{Conc}(l, i)}{Q_{\text{alocada}}(i, t)} \leq \text{Lim}(l) \quad (27)$$

$$q_{\text{mínimo}}(i, t) \leq q(i, t) \leq q_{\text{máximo}}(i, t) \quad (28)$$

4.3 Dados Necessários

As tabelas 1, 2 e 3 exibem os dados necessários ao estudo.

Tabela 1: Variáveis de entrada afetas à bacia.

Símbolo	Descrição	Valores adotados
$Q_{\text{mensal}}(i, t)$	Vazão mensal nos cursos d'água	Vazões aleatórias com distribuição normal, cuja média e desvio padrão podem ser verificados na série histórica.
Lim (l)	Limite tolerável de cada contaminante	De acordo com a Classe 3 da Resolução CONAMA/357

Tabela 2: Variáveis de entrada afetas à exploração de carvão e ao tratamento de efluentes.

Símbolo	Descrição	Valores adotados
i	Número de minas na bacia	3
T(i)	Tempo de exploração das minas	60 meses
A(i)	Área de superfície minerada de cada mina	Não foi considerada

R (i)	Reserva a ser explorada pela mina i	[900; 850; 800] x 10 ³ toneladas
p1	Preço da tonelada de carvão	R\$ 110,00/tonelada
ε	Percentual de rejeitos no carvão	65%
ex	Alternativas de exploração	Apenas lavra subterrânea
CExp (i)	Custo fixo de exploração de cada mina	R\$ 2,00/tonelada
CBen (i)	Custo de beneficiamento do carvão extraído pela mina i	R\$ 1,00 / tonelada
δ	Taxa de juros	0,7% ao mês
j	Alternativas de tratamento de efluentes	Não foi considerada
CTrat (i)	Custo de tratamento de efluentes da mina i	Não foi considerada
l	Contaminante considerado	Não foi considerada
Conc (l,i)	Concentração do contaminante l na DAM da mina i	Não foi considerada
η (l,i)	Percentual remanescente do contaminante l na mina i	Não foi considerada

Tabela 3: Variáveis de entrada afetas ao cultivo.

Símbolo	Descrição	Valores adotados
k	Número de empreendimentos agrícolas (arroz irrigado)	2
T(i)	Tempo considerado para alocação de água	5 anos
AP(k)	Área plantada	De acordo com a produtividade.
SC (k)	Sistema de cultivo utilizado	Apenas pré-germinado.
DemHíd (sc)	Demanda hídrica do sistema de cultivo utilizado	1,5 L/s*ha durante 90 dias
Prod (sc)	Produtividade do sistema de cultivo utilizado	6 toneladas/ha
p2	Preço da tonelada de arroz	R\$ 1.140,00/tonelada
CProd (sc)	Custo de Produção	R\$ 660,00/tonelada

A vazão de permanência pode ser determinada com base apenas em dados hidrológicos ou com base na necessidade da água para outros usos. A vazão disponível é obtida pela equação 29:

$$Q_{disponível}(mês) = Q_{mensal}(exutório, mês) - Q_{permanência}(mês) \quad (29)$$

4.4 Modelo de Otimização

A função objetivo do modelo de otimização é composta pelo somatório no tempo da soma total da renda líquida gerada pelas duas atividades.

$$W = (Receita_{carvão} - Extração - Benef - CTrat) + (Receita_{arroz} - Produção) \quad (30)$$

Matematicamente:

$$\text{Max} \quad \sum_{t=1}^T \rho^t W \quad (31)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{i=1}^m Q_{alocada}(m, t) \leq Q_{disponível}(t) \quad (32)$$

$$\rho = \frac{1}{1+\delta} \quad (33)$$

O parâmetro “m” na equação 32 corresponde aos agentes instalados na bacia. A aleatoriedade obriga que a formulação seja executada diversas vezes. O modelo é um problema de programação dinâmica onde cada agente instalado na bacia é um estágio decisório.

5- APLICAÇÃO EM BACIA HIDROGRÁFICA HIPOTÉTICA

A figura 1 apresenta a bacia hipotética, onde os agentes 1, 2 e 5 são mineradoras e os agentes 3 e 4 são áreas de cultura de arroz irrigado.

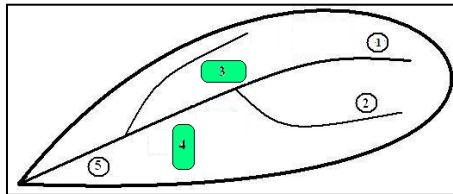


Figura 1: Bacia hipotética e agentes instalados.

Considera-se que no exutório deve fluir uma vazão igual a 30% da média mensal e que toda a bacia deve pertencer à classe 3 da Resolução 357. A rotina foi executada 1000 vezes e em cada uma foram geradas vazões mensais aleatórias para simular condições de incerteza. São consideradas três alternativas de alocação de água (iguais a 10%, 20% e 30% da vazão mensal disponível) em outubro, novembro e dezembro (meses de irrigação de arroz). Apenas três contaminantes foram considerados: ferro, sulfatos e manganês com concentração na DAM de 29,48 mg/L, 1460 mg/L e 2,63 mg/L, respectivamente. A produção mineral foi limitada entre 300 e 20.000 toneladas por mês. A área disponível para o plantio do arroz foi limitada a 10.000 hectares.

Para os agentes 1, 2 e 5, a maior parte das simulações resulta na alocação de 30%, 20% e de 10% da vazão disponível, respectivamente. Para o agente 3, a maior parte das simulações fica dividida entre 10 e 20% e para o agente 2 são alocados 20% e 30% da vazão disponível.

O resultado da otimização é a média mensal da produção de cada agente obtida em cada simulação. A figura 2 apresenta a produção de cada agente em toneladas e a concentração de ferro na seção da bacia que drena a área em que o agente se localiza. Para os demais contaminantes o gráfico é semelhante, variando apenas a escala vertical. Houve acentuada queda na produção mineral em outubro, novembro e dezembro e obediência ao limite imposto pela Resolução CONAMA 357 para a concentração de íons de ferro em rios classe 3 (5,0 mg/L). É nítida a elevação da concentração nos efluentes mineiros durante os meses de outubro, novembro e dezembro.

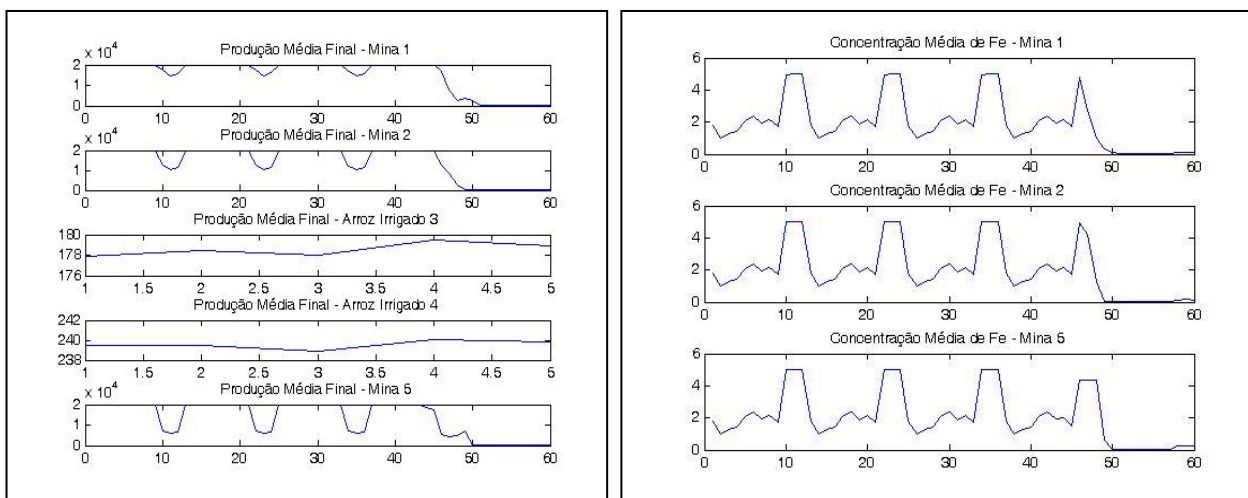


Figura 2: Produção de cada agente instalado na bacia e concentração de íons de ferro.

6- CONCLUSÃO

Portanto, para as condições estabelecidas, foi possível a exploração conjunta de recursos naturais renováveis e não renováveis, mantendo-se parâmetros quantitativos e qualitativos nos recursos hídricos da bacia. No entanto, para alcançar maiores produções de carvão mineral e de arroz, acredita-se que seja necessária a implantação de estações de tratamento de efluentes mineiros e/ou alterações na irrigação dos cultivos. Pode-se concluir que, com o uso do modelo elaborado, é possível planejar o uso dos recursos hídricos de forma a reduzir os custos ambientais configurados, principalmente, pela redução da vazão e pela deterioração do padrão de qualidade da água.

REFERÊNCIAS

- CONAMA (2005). *Resolução n. 357 de 18 de mar. de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em www.mma.gov.br, acesso em 15 de mar. de 2008.
- COULTON, R., WILLIAMS, K. (2005) Active Treatment of Mine Water: A European Perspective. In: Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2. *Mine Water and the Environment*, 24 (4), pp. 23-26.
- GUSEK, J. (2005) Passive Treatment System Design, Construction and Operating Costs: How Much it Really costs Comparative to the Alternatives? In *Anais do I Workshop da Companhia Vale do Rio Doce sobre Drenagem Ácida de Mina*.
- JAGER, W., JANSSEN, M.A., DE VRIES, H.J.M., DE GREEF, J., VLEK, C.A.J (2000). Behavior in Commons Dilemmas: Homo economicus and Homo psychologicus in an ecological economic model. *Ecological Economics* (35), pp. 357-379.
- MACHADO, S. L. O.; MARCHEZAN, E.; RIGHES, A. A.; CARLESSO, R.; VILLA, S. C. C.; CAMARGO, E. R. (2006) Consumo de Água e Perdas de Nutrientes e de Sedimentos na Água de Drenagem Inicial do Arroz Irrigado. *Ciência Rural* 36 (1), pp. 65-71.
- PIRAMID CONSORTIUM (2003). Engineering Guidelines for the Passive Remediation of Acidic and/or Metalliferous Mine Drainage and Similar Wastewaters. In *Anais do European Commission 5th Framework RTD Project, Passive in-situ Remediation of Acidic Mine/Industrial Drainage (PIRAMID)*, University of Newcastle upon Tyne, UK.
- SOCIEDADE SUL BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO (SOSBAI) (2007) *Recomendações Técnicas para a Pesquisa no Sul do Brasil*. SOSBAI Pelotas-RS, 161p.