

**METODOLOGIA DE CONTROLE DA DESCARGA DE POLUENTES DA  
MINERAÇÃO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS COM OTIMIZAÇÃO DA  
EXPLOTAÇÃO**

**Adriano de Paula Fontainhas Bandeira** – [adrianopfb@gmail.com](mailto:adrianopfb@gmail.com)

**Carlos André Bulhões Mendes** – [mendes@iph.ufrgs.br](mailto:mendes@iph.ufrgs.br)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
CP 15029 – 91501-970 – Porto Alegre, RS, Brasil

**Cléber José Baldoni Gomes** – [cleber@satc.rct-sc.br](mailto:cleber@satc.rct-sc.br)

Sindicato das Indústrias de Extração de Carvão do Estado de Santa Catarina  
88805-350 – Criciúma, SC, Brasil

**Guilherme Fernandes Marques** – [gmarques\\_br@yahoo.com](mailto:gmarques_br@yahoo.com)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Engenharia de Produção Civil  
30510-000 – Belo Horizonte, MG, Brasil

***Resumo.** Os impactos ambientais provocados por determinadas atividades econômicas podem causar prejuízos financeiros em terceiros já que o custo de remediação ou aquele de evitar a ação deletérea sobre o meio, prejudica e, em alguns casos, inviabiliza a existência de outras atividades econômicas. Nesse contexto, enquadra-se a mineração de carvão. Em tal atividade, o contato da água – superficial, subterrânea ou pluvial – com elementos específicos resultantes das escavações, na presença de oxigênio e de microorganismos, forma a chamada drenagem ácida de mina, que, em grande parte dos casos, é despejada em cursos d'água adjacentes prejudicando outros usos da água. Assim, o presente trabalho tem por objetivo elaborar uma metodologia de planejamento da exploração do carvão mineral em bacias hidrográficas que busque a produção ótima do minério com a internalização dos custos de tratamento do efluente gerado a fim de que os parâmetros de qualidade da água sejam respeitados e, desse modo, não exista a incidência de prejuízos em terceiros. Tal metodologia é pautada pela elaboração de um modelo que seja capaz de simular, ao longo do tempo de exploração das minas, a carga de poluentes lançada nos cursos d'água de uma bacia hidrográfica.*

***Palavras-chave:** Bacia Hidrográfica, Mineração, Otimização, Drenagem Ácida de Mina*

## **1. INTRODUÇÃO**

A escassez de água relaciona-se não só com fenômenos naturais, mas também com a forma pela qual esse recurso é utilizado. O aparecimento de novas atividades aliado à expansão daquelas existentes provoca um acréscimo na demanda por recursos naturais de

determinada região, nos quais se pode incluir a água. Quando tal acréscimo não é suprido, podem ocorrer conflitos de uso, ou seja, torna-se dificultoso o uso da água por atividades econômicas diversas. Assim, se a ação de um produtor ou consumidor tem influência sobre outros produtores ou consumidores, sem que seja levada em consideração na fixação do preço de mercado, diz-se que ocorreu uma externalidade. Esta pode ser positiva, quando o efeito é benéfico, ou pode ser negativa, caso contrário (Pindyck & Rubinfeld, 2002).

Nesse contexto, cita-se o exemplo da atividade de mineração de carvão. Quando o carvão é retirado das minas, ele se faz acompanhar por grande quantidade de resíduos, os quais, depois de separados, são amontoados em regiões próximas às reservas de exploração. As águas pluviais, ao percolarem através da montanha de resíduos, reagem com os mesmos adquirindo elementos nocivos. Em paralelo, a lavra subterrânea, muitas vezes, é responsável por estabelecer o contato do minério com o lençol freático. Ademais, a própria água residual do processo de beneficiamento do carvão contém substâncias nocivas.

O líquido resultante das situações acima mencionadas é o efluente conhecido como DAM ou drenagem ácida de mina. Após a exploração da mina, a presença desse efluente no meio ambiente torna-se acentuada tendo em vista que, em grande parte dos casos, as minas são abandonadas sem que haja uma preparação para evitar o contínuo despejo.

Como forma de solucionar o problema, sugere-se um estudo de planejamento do uso da água para exploração mineral com o objetivo de evitar que essa atividade cause prejuízos em outros empreendimentos ou na sociedade. Tal planejamento consiste na elaboração de um modelo de maximização da renda das minas localizadas em uma bacia hidrográfica com a internalização dos custos de tratamento do efluente gerado, considerando-se o controle do despejo de efluentes para que sejam obedecidos determinados parâmetros de qualidade da água.

## **2. A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE ESTUDO**

O uso da bacia hidrográfica como unidade de estudo para o gerenciamento das diferentes formas de ocupação e uso das potencialidades ambientais tem como objetivo, planejar, coordenar, executar e manejar as melhores formas de apropriação e exploração de seus recursos ambientais, proporcionando o desenvolvimento sócio-econômico das suas respectivas populações e a sustentabilidade dos recursos ambientais, diminuindo ou evitando a degradação da qualidade de vida (Bordallo, 2004). Conforme Lanna (1995), o gerenciamento de bacia hidrográfica (GBH) é o instrumento que orienta o poder público e a sociedade, no longo prazo, na utilização e monitoramento dos recursos ambientais, naturais e econômicos, de forma a promover o desenvolvimento sustentável.

As abordagens de planejamento e gerenciamento que utilizam a bacia hidrográfica como unidade de trabalho têm evoluído bastante, pois as características biogeofísicas da área por ela abrangida apresentam sistemas ecológicos e hidrológicos relativamente coesos. No início, o processo de gerenciamento e planejamento de bacias hidrográficas visava basicamente à solução de problemas relacionados à água, com prioridade para o controle de inundações, para a irrigação, a navegação ou para o abastecimento público e industrial. Entretanto, o planejamento e o gerenciamento de bacias hidrográficas devem incorporar todos os recursos ambientais da área de drenagem e não apenas o hídrico. Além disso, a abordagem adotada deve integrar os aspectos ambientais, sociais, econômicos e políticos, com ênfase no primeiro, pois a capacidade ambiental de dar suporte ao desenvolvimento possui sempre um limite, a partir do qual todos os outros aspectos são inevitavelmente afetados (Pires & Santos, 1995).

Na bacia considerada, cargas de poluentes da mineração são lançadas de forma pontual (localização da emissão conhecida) e/ou difusa (dispersa ao longo de uma área), nos sistemas ambientais, tais como redes de drenagem e lagos ou dispostos sobre o solo. As águas e os

sedimentos constituem-se no principal mecanismo de transporte destas cargas. Neste processo de transporte, a presença das cargas poluentes nos cursos d'água resulta em alteração de concentrações dos parâmetros de qualidade de água a elas associados. O ponto de monitoramento de qualidade de água reflete uma agregação de todas as cargas de montante da bacia (Tucci, 2006). Em síntese, o problema apresentado pode ser dividido nas seguintes componentes: cargas de resíduos no meio ambiente, transporte dos resíduos pela água ou por sedimentos e concentração resultante de uma determinada substância em uma posição específica durante um tempo do dia (ou do ano).

### 3. PRINCIPAIS ASPECTOS DE UM EMPREENDIMENTO MINEIRO

Para que seja possível a elaboração do modelo, deve-se atentar para as características do empreendimento em questão. Portanto, é necessário o conhecimento não só do modo pelo qual o efluente é produzido, mas também dos custos de exploração e beneficiamento do minério e dos custos de tratamento do efluente.

#### 3.1 Drenagem Ácida de Mina

A drenagem ácida de mina, também conhecida como drenagem ácida de rocha é resultado de um processo natural. Em contato com ar, água e microorganismos, minerais ricos em enxofre, como a pirita ( $FeS_2$ ) se oxidam e produzem ácido sulfúrico. Concomitantemente, ferro e outros metais são descarregados na água. O problema pode ser associado com a exploração de carvão ou com a escavação de rochas nas quais minerais sulfurosos, antes no subsolo, entram em contato com o oxigênio e com a água. Em soluções com pH abaixo de 4.5, as reações são catalisadas por organismos unicelulares que aceleram a oxidação da pirita fazendo com que a acidez se eleve. O aumento da acidez, por seu turno, provoca a elevação da concentração de outros metais pesados, sulfatos e do total de sólidos dissolvidos (Stumm *et al. apud Seyler*, 2003).

#### 3.2 Tecnologias de extração de carvão mineral

A escolha do método de mineração é determinada pela geologia apresentada pelo local. Assim, a combinação da profundidade da camada de carvão e do tipo de solo que a cobre vai estabelecer se a forma de exploração será a lavra subterrânea ou a céu aberto. No modelo apresentado, os custos de exploração serão separados em fixos e variáveis.

**Lavra subterrânea.** A lavra subterrânea se dá, em geral, quando a camada de carvão mineral está localizada em altas profundidades ou quando a camada de solo e rochas que a cobre (*overburden*) apresenta dificuldades de remoção. Existem duas formas diferentes de se realizar a lavra subterrânea. São elas: a técnica de câmaras e pilares e a técnica *longwall mining*.

A técnica de câmaras e pilares consiste na escavação, no interior da camada carbonífera, de uma rede de espaços vazios sustentada por pedaços remanescentes da mesma camada, os quais formam os pilares. Esses pilares podem constituir até 40% do total da camada de carvão do solo e, geralmente, são retirados nas etapas finais (WCI, 2005).

A técnica *longwall mining* consiste na extração total da camada de carvão. Essa técnica necessita de cuidadoso planejamento, pois deve ser assegurado que a geologia local não configure riscos à atividade. Dessa forma, a retirada de carvão mineral se dá em extensões que podem variar de 100 a 350 metros, sendo a camada superior de solo sustentada por máquinas hidráulicas. Sua execução é mais cara, porém possibilita maior extração.

Em relação à contaminação das águas, destaca-se na lavra subterrânea o fato de ser comum o encontro com o lençol freático o que exige que a cava de mineração seja constantemente esgotada por bombeamento (Gibson, 1987).

**Lavra a céu aberto.** A lavra a céu aberto apresenta viabilidade econômica quando a camada de carvão se localiza próxima ao nível do terreno. Ela consiste na escavação e remoção da camada de solo e rochas que cobre o carvão mineral. A partir daí, com o carvão exposto, a exploração, propriamente dita, se inicia (WCI, 2005).

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 próprios trabalhos superficiais, tais como o beneficiamento e o transporte do carvão pela construção de vias de acesso, são responsáveis pela alteração da drenagem natural do terreno e do regime de infiltração e de retenção de água no subsolo.

### 3.3 Tecnologias de tratamento de resíduos

As formas de tratamento de resíduos de operações de minas são classificadas em ações para o tratamento de efluentes e ações para a desmobilização do empreendimento. As ações para o tratamento do efluente gerado pelas escavações, pelo beneficiamento do minério ou pela lixiviação da montanha de resíduos são, por sua vez, classificadas como tratamento passivo e tratamento ativo. É comum nas duas formas de tratamento, a presença de bacias de contenção para a decantação de sólidos em suspensão. No modelo sugerido, o valor da execução das ações de tratamento será dividido em parcelas mensais ao longo do tempo de operação das minas.

**Tratamento passivo.** As principais estruturas para a realização do tratamento passivo 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.

As lagoas aeróbica e anaeróbica, a bacia de fluxo vertical e o leito de remoção de manganês são estruturas semelhantes que consistem em uma escavação trapezoidal para onde é conduzido o efluente (DAM). A lagoa aeróbica apresenta uma cobertura vegetal para redução do oxigênio dissolvido e a anaeróbica possui, além da cobertura vegetal, uma camada de calcário para redução da acidez. A bacia de fluxo vertical também apresenta uma camada de matéria orgânica e uma de calcário, mas seu efluente é drenado por uma rede de tubulações ao fundo da escavação. O leito de remoção de manganês não possui camada de matéria orgânica, mas apresenta uma espessa camada de calcário.

O canal de calcário óxico e o dreno de calcário anóxico são estruturas destinadas à condução do efluente para as unidades de tratamento e para o destino final (em geral, os cursos d'água). A diferença entre eles consiste no fato de o dreno ser revestido por membrana sintética e solo. Ambas as estruturas possuem camada de calcário para redução da acidez.

**Tratamento ativo.** O tratamento ativo de drenagem ácida de mina consiste na adição de um reagente químico que seja capaz de provocar a precipitação dos metais dissolvidos a fim de que sejam posteriormente removidos. É mais utilizado em águas com elevado grau de contaminação ou quando há pouca disponibilidade de espaço (Coulton & Williams, 2005).

Os principais reagentes utilizados no tratamento ativo são o hidróxido de sódio (soda cáustica,  $NaOH$ ), cal hidratada ( $Ca(OH)_2$ ), cal virgem ( $CaO$ ) e amônia ( $NH_3$ ). Também podem ser utilizados como reagente o óxido de magnésio ( $MgO$ ), o hidróxido de magnésio ( $Mg(OH)_2$ ) e o carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ).

**Desmobilização do empreendimento mineiro.** A desmobilização do empreendimento mineiro é determinada pelo parágrafo 2º do artigo 225 da Constituição Federal Brasileira, o qual estabelece que “aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei” (Brasil, 2004).

Dessa forma, os empreendedores ficam obrigados a reduzir as descargas de DAM, ou impedir a formação da substância, mesmo após o fim da exploração. Porém, devido ao mau planejamento de uso do recurso mineral, as empresas, em geral, começam a se ocupar da atividade de recuperação ambiental, ao fim do seu período de operação, quando já estão descapitalizadas (Oliveira Júnior, 2001).

O tratamento de recomposição é constituído por um trabalho de terraplenagem que consiste no assentamento de uma camada de solo sobre a área impactada. Tal camada pode ser revestida com vegetação, impermeabilizada pela urbanização ou, ainda, não possuir revestimento algum. Será dado por parcelas mensais destinadas a gerar o montante necessário à execução das ações ao término da operação.

#### 4. OPERAÇÃO DE RECURSOS NATURAIS NÃO RENOVÁVEIS EM MERCADOS COMPETITIVOS

Pode-se estabelecer um modelo da dinâmica de exploração dos recursos naturais não-renováveis (Conrad & Clarke, 1987). Sejam  $X(t)$  e  $w(t)$ , respectivamente, as descobertas acumuladas e o esforço de exploração. A reserva de minério em função do tempo é representada por  $R(t)$  e  $q(t)$  é a produção de minério no período. Assim, diz-se que a variação da reserva de recurso com o tempo depende da variação das novas descobertas com o tempo e da produção mineral. Tal se deve ao fato de a variação das novas descobertas com o tempo depender não só do esforço de exploração, mas também da possibilidade de ainda poderem ser realizadas outras descobertas. Sejam, portanto,  $C_i(q_i(t))$  o custo de extração da  $i$ -ésima firma,  $R_i$  a reserva inicial de minério em sua jazida e  $C(w(t))$  o custo da procura por novas jazidas.

Em um mercado competitivo, a  $i$ -ésima firma é uma “tomadora” de preços e trata  $p(t)$ , o preço em função do tempo, como variável exógena fixada pelo mercado.

Assim sendo, cada firma tenta maximizar o lucro, no período de exploração ( $T$ ), de acordo com a seguinte formulação matemática proposta por Henderson (1976):

$$\text{Max } \pi = \int_0^{T_i} [p(t)q(t) - C(q(t)) - C(w(t))] e^{-\delta t} dt \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a } R_{t+1} - R_t = f(w(t), X(t)) - q(t) \quad (2)$$

$$R_i(0) = R_i \quad (3)$$

$$\dot{X} = f(w(t), X(t)) \quad (4)$$

As restrições significam, respectivamente, que a variação da reserva com o tempo é igual, em módulo, à diferença entre as novas descobertas e a produção da mina; a reserva inicial de cada mina é igual à reserva total estimada (ou medida) de cada mina; as novas descobertas são uma função do esforço para realizá-las e da quantidade de descobertas já realizadas. No exemplo de aplicação, serão acrescentados na função-objetivo os custos de tratamento de efluente, de beneficiamento do minério e de desmobilização do empreendimento.

## 5. APLICAÇÃO DO MODELO NA BACIA HIDROGRÁFICA Z

O modelo de otimização trata da maximização do valor presente líquido (VPL) da atividade de exploração de carvão mineral sob a consideração do despejo de efluentes em uma bacia hidrográfica.

Representando as minas por  $i$ , o tempo por  $t$ , as alternativas de exploração por  $ex$ , as alternativas de tratamento por  $j$ , as alternativas de desmobilização por  $d$ , as substâncias nocivas constituintes da DAM por  $l$  e por  $\varepsilon$  o percentual de rejeitos que acompanham o carvão mineral, propõe-se a seguinte função-objetivo com base na Eq. (1):

$$\text{Max} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{1+\delta} \right)^t [p \cdot q(i,t) \cdot (1-\varepsilon) - CBen(i) \cdot q(i,t) - CExp_{ex} - CTrat_j(i) - CDesm_d(i)] \quad (5)$$

Na função-objetivo tem-se que:  $\delta$  é a taxa de juros (mensal),  $CExp$  é o custo de exploração do carvão,  $CBen$  é o custo por tonelada de minério beneficiado,  $CTrat$  é a parcela mensal do custo de tratamento e  $CDesm$  é a parcela mensal do custo de desmobilização.

O custo de exploração pode ser dividido em custos fixos (independentes da produção) e custos variáveis (dependem da quantidade de carvão retirada). Na Eq. (6),  $CFexp$  representa a parcela de custos fixos e  $\alpha$  é o coeficiente de custos variáveis. Foi adotada uma função não-linear para a representação dessa classe de despesa:

$$CExp_{ex} = CF \exp_{ex}(i) - \alpha_{ex} q(i,t)^{1,3} \quad (6)$$

As restrições do modelo são:

$$R(i,t=0) = R(i), \quad (7)$$

$$R(i,t) = R(i,t-1) - q(i,t), \quad (8)$$

$$R(i,t=T) = 0, \quad (9)$$

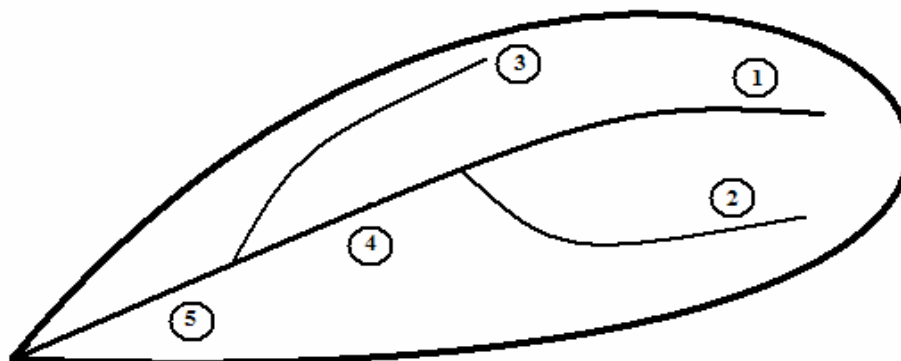
$$\frac{\sum_{i=1}^m Q_{efluente}(i,t) \cdot \eta(i,t) \cdot Conc(l,i)}{Q(i,t)} \leq Lim(l). \quad (10)$$

A Eq. (10) consiste na restrição imposta pelo meio ambiente. Nela tem-se que:  $m$  diz respeito às minas a montante do trecho considerado,  $Q_{efluente}$  é a vazão mensal despejada por cada mina,  $\eta$  é o percentual de cada contaminante considerado existente após o tratamento,  $Conc$  é a concentração de cada contaminante na DAM e  $Q$  é a vazão mensal no trecho de rio onde se localiza a mina.

A vazão efluente de cada mina ( $Q_{efluente}$ ) é dada em função da precipitação ( $Prec$ ), da área minerada ( $A$ ), da vazão bombeada de seu interior ( $Q_{subt}$ ) e do volume de água necessário para a separação dos resíduos do carvão ( $K$ ). Assim:

$$Q_{efluente}(i,t) = Prec(i,t) \cdot A(i) + Q_{subt}(i,t) + K \cdot q(i,t) \quad (11)$$

A aplicação do modelo será realizada em bacia hidrográfica fictícia, denominada Bacia Hidrográfica Z, a fim de aferição do modelo, onde serão consideradas 5 minas cujos efluentes são despejados nos cursos d'água delas mais próximos. A Fig. 1 mostra uma representação da bacia e a localização das cinco minas.



**Figura 1- Localização das minas na Bacia Hidrográfica Z.**

Da Fig. 1 conclui-se que à carga lançada pela mina 4, somam-se as cargas oriundas das minas 1 e 2 e à carga da mina 5 são somadas as cargas de todas as minas. O modelo será aplicado para dois casos: com custos de tratamento e limites de concentração de contaminantes e sem a consideração desses limites e, por conseqüência, dos custos de tratamento.

O preço da tonelada de carvão será constante ao longo de um tempo de operação de 96 meses e igual a 100 unidades monetárias (u.m.), a quantidade produzida terá 60% de rejeitos, a taxa de interesse será de 0,8% a.m. e as substâncias analisadas serão o ferro, o zinco e o manganês, cujos limites de concentração são 0,30 mg/L para o ferro, 0,18 mg/L para o zinco e 0,10 mg/L para o manganês. As minas terão uma reserva inicial de  $8,0 \times 10^6$  toneladas, cada uma. O volume de água usado por tonelada de carvão beneficiado (K) será de  $2,0 \text{ m}^3$  e o custo de beneficiamento do minério será de 5,0 u.m. por tonelada. A precipitação, a vazão de aquíferos subterrâneos e a vazão nos trechos de rio serão repetidas em períodos de 12 meses. São elas:

Tabela 1. Dados hidrológicos da bacia

Tempo	Precipitação ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )	$Q_{\text{subt}}$ ( $\text{m}^3/\text{mês}$ )	$Q$ ( $\times 10^6 \text{ m}^3/\text{mês}$ )				
			Mina 1	Mina 2	Mina 3	Mina 4	Mina 5
1	0.450	450	15.0	15.0	15.0	45.0	90.0
2	0.400	400	20.0	20.0	20.0	60.0	120.0
3	0.400	400	13.5	13.5	13.5	40.5	81.0
4	0.300	300	15.0	15.0	15.0	45.0	90.0
5	0.200	150	9.8	9.8	9.8	29.4	58.8
6	0.200	150	9.9	9.9	9.9	29.7	59.4
7	0.150	100	9.0	9.0	9.0	27.0	54.0
8	0.150	100	9.0	9.0	9.0	27.0	54.0
9	0.200	150	9.9	9.9	9.9	29.7	59.4
10	0.300	300	9.9	9.9	9.9	29.7	59.4
11	0.400	400	13.2	13.2	13.2	39.6	79.2
12	0.450	450	15.1	15.1	15.1	45.3	90.6

As minas 1, 3 e 5 contarão com tratamento passivo da DAM, composto de uma bacia de contenção, uma bacia de fluxo vertical, um leito de remoção de manganês e canais para a condução do efluente. As minas 2 e 4 terão a associação entre tratamento ativo e passivo, composta pela mesma estrutura anterior com o acréscimo de soda cáustica ( $NaOH$ ) para redução da acidez e da concentração de metais. A mina 3 terá lavra a céu aberto, devido às condições geológicas locais, mas, após desmobilização, terá cobertura asfáltica. As minas 1 e 5 terão revestimento de argila sem vegetação e serão exploradas pela técnica de câmaras e pilares. As minas 2 e 4 terão cobertura de argila com vegetação e terão o minério extraído pela técnica *longwall mining*. A Tabela 2 apresenta as áreas de superfície minerada e os custos associados à operação de cada mina.

Tabela 2. Características das minas e custos associados

Mina	Área ( $\times 10^5 \text{ m}^2$ )	CTrat (u.m)	CDesm (u.m)	CFext (u.m)	$\alpha$ (u.m./ton <sup>1.3</sup> )
1	1.0	3,000.00	5,000.00	20,000.00	2.0
2	0.8	3,600.00	5,400.00	22,000.00	3.0
3	2.0	3,000.00	7,500.00	10,000.00	4.0
4	0.8	3,600.00	5,400.00	22,000.00	3.0
5	1.0	3,000.00	5,000.00	20,000.00	2.0

A Tabela 3 mostra a composição do efluente antes e após o tratamento recebido. Cabe ressaltar que as formas de tratamento apresentadas são responsáveis por uma alta redução da presença de contaminantes no efluente das minas.

Tabela 3. Características do efluente gerado e padrões de redução obtidos

Mina	Concentração (mg/L)			Percentual Remanescente ( $\eta$ )		
	Fe	Zn	Mn	Fe	Zn	Mn
1	100.0	1.5	10.0	0.025	0.025	0.025
2	100.0	1.5	10.0	0.015	0.015	0.015
3	100.0	1.5	10.0	0.050	0.050	0.050
4	100.0	1.5	10.0	0.015	0.015	0.015
5	100.0	1.5	10.0	0.025	0.025	0.025

Por fim, por limites de capacidade produtiva, cada mina deverá produzir, no mínimo, 50,000 toneladas de carvão e, no máximo, 150,000 toneladas.

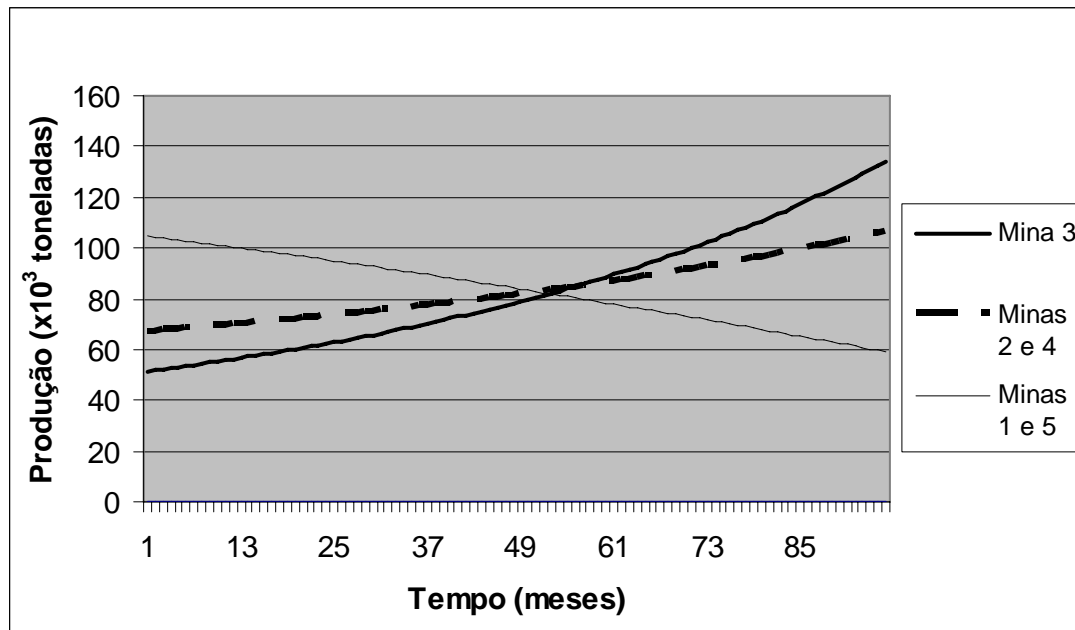
## 6. RESULTADOS

Por meio do suporte computacional para resolução de problemas de larga escala GAMS (Sistema de Modelagem Algébrica Geral – General Algebraic Modelling System), através de um algoritmo de resolução baseado no método do gradiente reduzido (Brooke et al., 1998), foi obtido o valor de  $3.189 \times 10^8$  u.m. para a função-objetivo na análise com a imposição de limites de concentração.

A ausência de limites de concentração, e da internalização dos custos de tratamento, faz com que a função-objetivo tome o valor de  $3.219 \times 10^8$  u.m. com a mesma produção obtida no caso anterior.

Devido à similaridade dos dados apresentados, as minas 1 e 5 e as minas 2 e 4 tiveram como resultado a mesma produção ótima. A mina 3 apresentou resultado único por se tratar de mina superficial com execução de cobertura impermeável na desmobilização. Conforme o modelo apresentado, todas as minas tiveram suas reservas esgotadas ao final do tempo de operação. A Fig. 2 exibe a produção ótima de cada mina.

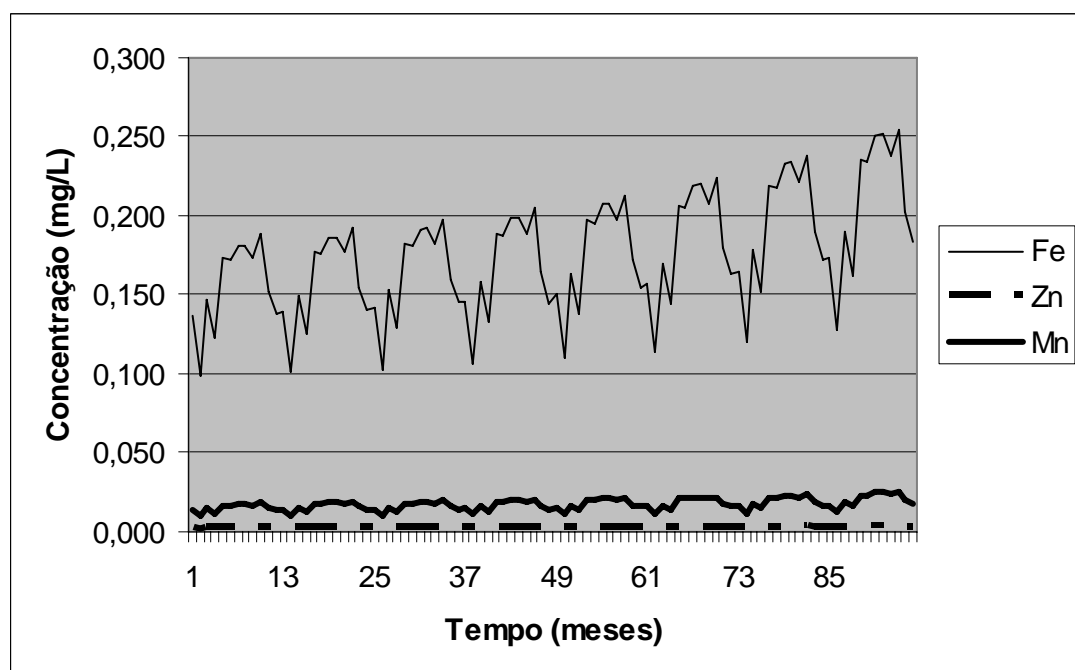




**Figura 2- Produção ótima das minas localizadas na Bacia Hidrográfica Z.**

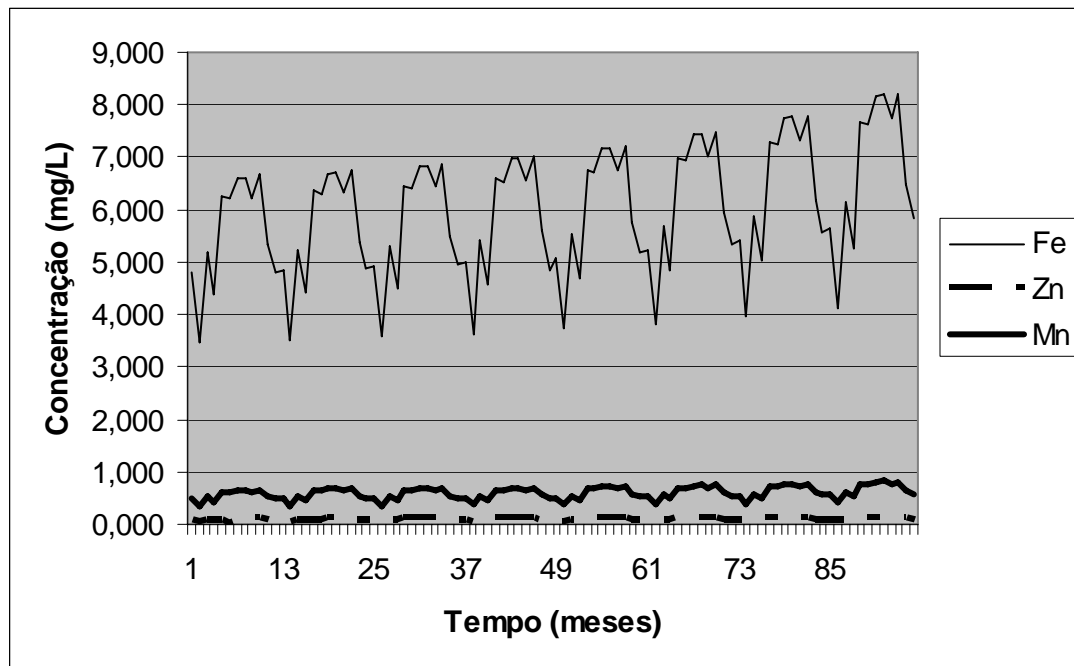
Apesar do alto grau de redução da concentração dos contaminantes analisados na drenagem ácida de mina, não foi possível a obediência dos parâmetros de qualidade da água estabelecidos sem a internalização dos custos ambientais. Em outras palavras, pode-se dizer que não se consegue obter qualidade da água sem que haja tratamento de efluentes.

A Fig. 3 mostra a concentração, ao longo do tempo de operação das minas, dos contaminantes no trecho ocupado pela mina 5. Cabe destaque o fato de que, nesse ponto, a qualidade da água reflete todas as atividades localizadas a montante.



**Figura 3- Concentração de metais, após tratamento, no exutório da bacia.**

Conforme já mencionado, sem a incidência dos custos ambientais não é possível o atendimento dos padrões de qualidade da água estabelecidos. A Fig. 4 exibe as concentrações dos metais analisados no mesmo ponto da bacia ao longo do tempo de operação das minas.



**Figura 4- Concentração de metais no exutório (sem tratamento de efluentes).**

Percebe-se que as curvas têm a mesma forma que o caso anterior. Tal se deve ao fato de a produção ótima ser igual a ambos os casos. As concentrações, contudo, são maiores no segundo caso, conforme mostra o eixo vertical.

Verifica-se também que a concentração das substâncias analisadas sofre um decréscimo nos meses em que a vazão dos cursos d'água é maior. Tal informação é de relevada importância para os órgãos públicos responsáveis pelos recursos hídricos de uma região, pois dela podem depender atividades sazonais, como a pesca e a prática de alguns esportes. Importa também registrar, conforme Fig.2, que as cinco minas não podem operar em plena capacidade simultaneamente, pois a bacia não suportaria o excesso de resíduos produzidos.

## 7. CONCLUSÃO

A falta de planejamento de uso dos recursos naturais acarreta elevados prejuízos financeiros não só a quem os provoca, mas também àqueles que deles dependem. O modelo apresentado torna possível concluir que, desde que haja o preparo necessário, pode-se aliar uma atividade lucrativa à proteção do meio ambiente. Tal conclusão é corroborada pelo valor positivo obtido pelo modelo para a função-objetivo. Ademais, cabe ressaltar que a inserção dos custos ambientais causou uma redução da renda total de, aproximadamente, 1,0%. Esta baixa redução permite dizer que, com o planejamento adequado podem coexistir a atividade econômica e a proteção ambiental, favorecendo, por sua vez, o desenvolvimento sustentável.

A aplicação do modelo, entretanto, não deve se restringir apenas aos cenários propostos. Em etapa anterior à exploração de carvão mineral, deve o empreendedor analisar e avaliar diferentes cenários e suas conseqüências. O modelo possibilita uma fácil manipulação de dados de entrada, permitindo que sejam avaliadas novas propostas de estruturas de tratamento de resíduos ou de tecnologias de extração. Sabe-se que a estimativa das reservas iniciais, em

geral, apresenta incertezas. Assim sendo, diversas possibilidades podem ser verificadas para que se possa obter a produção ótima que seja responsável por lucro. Além disso, aparece, ainda, a taxa de juros como parâmetro de acentuada importância, pois esta permite a comparação do empreendimento com outros investimentos. Em outras palavras, a análise de taxas distintas permite avaliar o retorno obtido pela atividade mineradora, face às opções disponíveis no mercado financeiro.

Enfim, ressalta-se a utilidade do modelo apresentado para os órgãos de controle e fiscalização de bacias hidrográficas. Neste caso, contudo, algumas adaptações podem se fazer necessárias. A primeira delas diz respeito ao fato de haver, em grande parte dos casos, outras fontes de poluição além da mineração. Propõe-se que nesses casos, todas as atividades instaladas na bacia sejam inseridas no modelo para que, mais uma vez, a renda total seja maximizada.

O segundo bloco de adaptações relaciona-se com a existência de atividades de uso consuntivo da água, isto é, atividades responsáveis pela retirada de água dos cursos d'água, a qual acarreta a diminuição da disponibilidade hídrica. Ainda que tais atividades, em alguns casos, não provoquem a poluição direta, a redução do volume de água dos cursos d'água faz com que a concentração dos contaminantes oriundos de outras atividades seja elevada em níveis que podem se situar acima do tolerável. Nesse caso, deve-se tratar aquele que despeja o efluente como um agente que se apropria de uma parte da disponibilidade hídrica da bacia para diluir os resíduos de sua atividade econômica.

## REFERÊNCIAS

- Bordallo, C. L. A., 1995, A Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento dos recursos hídricos. NUMA/UFPA. Belém.
- Brasil, 2004, Constituição da República Federativa do Brasil: de 5 de outubro de 1988. 22 ed. São Paulo: Atlas.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meerans, A., Raman, R., 1998, GAMS: A User's Guide. GAMS Development Corporation.
- Conrad, J.M. & Clarke, C.W., 1987, Natural Resource Economics: Notes and Problems. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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 Environment*, Springer-Verlag, Vol. 24 p.2-37.
- Gibson, J., 1987, Coal and the Environment. Rio de Janeiro: Science Reviews.
- Henderson, J., 1976, Teoria Microeconômica: uma abordagem matemática. São Paulo: Pioneira. 417 p.
- Lanna, A., 1995, Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos. IBAMA. Brasília.
- Pires, J. & Santos, J., 1995, Bacias Hidrográficas. Integração entre Meio Ambiente e Desenvolvimento. In: Ciência Hoje, Águas no Brasil: má utilização e falta de planejamento, No 110. SBPC. Rio de Janeiro.
- Oliveira Júnior, J. B., 2001, Desativação de Empreendimentos Mineiros: Estratégias para Diminuir o Passivo Ambiental. São Paulo: USP, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas e Petróleo), Universidade de São Paulo.
- Pindyck, R. & Rubinfeld, D., 2002, Microeconomia. São Paulo: Prentice Hall.
- Seyler, J., Figueroa, L., Ahmann, D., Wilderman, T., Robustelli, M., 2005, Effects of Solid Phase Organic Substrate Characteristics on Sulfate Reducer Activity and Metal Removal in Passive Mine Drainage Treatment Systems. *National Meeting of American Society for Mining and Reclamation*.

Tucci, C., 2006, Curso de Avaliação Ambiental Integrada de Bacia, vii, 311p.

World Coal Institute, 2005. *The Coal Resource: a Comprehensive Overview of Coal*. Disponível em [www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org) Acesso em 03 de junho de 2006.

## **CONTROL METHODOLOGY OF POLLUTANT LOADS DISCHARGE IN RIVER BASINS BY EXPLOITATION'S OPTIMIZATION**

**Abstract.** *The environmental impacts provoked by determined economic activities can cause financial damages in third parts since the cost of remediation, or that one to prevent the deleterious action, harms and, in some cases, makes impracticable the existence of other economic activities. In this context, the coal mining is situated. In such activity, the contact of superficial water, groundwater or rainwater with specific elements resultant from the drillings, in oxygen and microorganisms presence, forms the acid mine drainage, that, to a large extent of the cases, is poured in adjacent rivers harming other uses of the water. Thus, the present work aims to elaborate a methodology of the mineral coal exploitation planning in river basins that achieves the excellent production of the ore with the costs of effluent treatment internalization so that water quality parameters are respected and there is no incidence of damages in third parts. Such methodology is based on the elaboration of a model that is capable to simulate, during the mines exploitation time, the load of pollutants launched in river basins water.*

**Keywords:** *River Basin, Mining, Optimization, Acid Mine Drainage*