

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE
LIXIVIAÇÃO EM PILHA DE MINÉRIOS AURÍFEROS
VOLTADOS AO DESENVOLVIMENTO DE CRITÉRIOS DE
SUSTENTABILIDADE**

*Luiz Rogério Pinho de Andrade Lima¹, Roberto C. Villas Bôas²,
Hélio Marques Kohler³*

¹Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Rua Aristides
Novis 2, Federação, Salvador, Bahia, 40210-630.

²Centro de Tecnologia Mineral (CETEM-CNPq), Rua 4, Quadra D,
Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, 21941-590

³Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Caixa Postal
38008, Rio de Janeiro, RJ, 22453-900

RESUMO

Este artigo apresenta um algoritmo computacional desenvolvido com o objetivo de simular a evolução temporal do processo de lixiviação de minérios auríferos em pilha. Ele utiliza dados físico-químicos, geométricos e operacionais, tais como: composição dos metais lixiviáveis no minério, fluxo e concentração do lixiviante, parâmetros de passivação, distribuição granulométrica do minério, porosidade e saturação na pilha (ou o tempo médio de residência do líquido no seu interior), massa, altura e área média da pilha. Este algoritmo envolve a divisão da pilha em segmentos horizontais e planares, de cujas interações os resultados de extração de ouro, consumo de lixiviante e enriquecimento dos licores percolantes são calculados. O núcleo de cálculo do sistema é a equação que descreve a reação sólido-fluido sob controle difusivo (núcleo não reagido), a qual é resolvida para cada camada, em cada intervalo de tempo. No cálculo do progresso da extração, o escoamento na pilha é considerado como unidimensional com fluxo volumétrico constante, mas com a concentração das espécies

variáveis. Este algoritmo se revelou robusto e estável, com fraca dependência do número de subdivisões adotada para a pilha. O tempo médio de residência da solução no seio da pilha e a difusividade efetiva do cianeto no minério influenciam significativamente as evoluções temporais da extração do ouro e a sua concentração no licor de lixiviação. Os resultados obtidos com este algoritmo, quando aplicados a um caso industrial revelaram uma boa capacidade de representação, bem como adequados à formulação de critérios de sustentabilidade para a operação e/ou pilha.

Palavras chave: lixiviação em pilha, simulação, ouro, sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

O processo de lixiviação em pilha vem sendo utilizado no Brasil, Estados Unidos, Austrália e Chile, dentre outros, como um eficiente método para o tratamento de minérios auríferos oriundos de depósitos de pequeno porte ou com baixos teores.

Neste processo, o minério grosseiro é empilhado sobre uma superfície previamente impermeabilizada e preparada para ficar com uma pequena inclinação, a qual permite a drenagem da solução resultante. No topo da pilha assim formada é borrifada ou gotejada uma solução de lixiviante que percola o seu leito e dissolve progressivamente alguns constituintes da rocha até atingir a sua base impermeabilizada, quando então, o licor de lixiviação é conduzido para a etapa de recuperação.

O desempenho de um certo minério a ser submetido ao processo de lixiviação em pilha pode ser avaliado através de testes em colunas e em pequenas pilhas. Estes testes dão o consumo de lixiviante e a sua concentração no licor de lixiviação, a máxima extração dos metais, a sua evolução temporal e as suas concentrações no licor de lixiviação. Existe, entretanto, uma dificuldade para o escalamento, devido a difícil reprodução das proporções geométricas das pilhas industriais e das suas

condições hidrodinâmicas, que associada ao custo e ao tempo dos ensaios, conduzem a utilização de modelos fenomenológicos para a análise e para o projeto destes circuitos.

Encontra-se na literatura, a partir do fim dos anos 60 diversos modelos matemáticos fenomenológicos que descrevem o processo de lixiviação em pilha [1]. A maior parte destes, entretanto, foi desenvolvida para a lixiviação de minérios oxidados e sulfetados de cobre, assim como para lixiviação de pirita, no caso da formação de drenagem ácida.

Estes modelos são baseados na realização de um balanço de massa das espécies envolvidas, tanto no leito da pilha quanto na partícula do minério e da utilização de relações cinéticas para a representação das reações minério-lixiviante. Diversas hipóteses simplificadoras são consideradas para viabilizar a solução do sistema de equações diferenciais parciais assim obtido, sem uma apreciável perda na qualidade dos resultados.

Dentre estes modelos fenomenológicos pode-se destacar alguns como o modelo apresentado por Chae e Wadsworth [2], que utiliza a equação da continuidade para descrever o escoamento da solução no leito da pilha e um modelo cinético derivado do modelo de centro não reagido para descrever a reação minério-lixiviante. Os seus resultados foram validados com testes de lixiviação ácida de um minério oxidado de cobre. Posteriormente, Dixon e Hendrix [3] apresentaram um modelo que utiliza um equacionamento rigoroso, resolução por diferenças finitas e validação com resultados de experimentos de cianetação de um minério sintético de prata. Sanchez-Chacon e Lapidus [4] apresentaram recentemente uma abordagem similar a anteriormente descrita, mas modificando o modelo cinético, uma das condições de contorno e o método de resolução numérica do problema.

Dentre os modelos simplificados destaca-se o modelo de Roman [5], inicialmente proposto para descrever a lixiviação ácida de minérios oxidados de cobre, e que serviu de ponto de partida para alguns dos

outros trabalhos abaixo descritos. Neste modelo, um algoritmo, que permite contornar a resolução do sistema de equações diferenciais, foi utilizado para descrever o escoamento, livre de dispersão axial (pistom) da fase líquida no interior da pilha e o modelo de centro não reagido foi utilizado para representar a reação do minério com o lixiviante.

O modelo proposto por Box e Prosser [6-7] é uma generalização do modelo de Roman. Ele leva em consideração a interação simultânea de diversos minerais e lixiviantes, além dos próprios produtos de lixiviação, que eventualmente podem participar deste sistema reagente. Neste caso, o modelo de centro não reagido foi utilizado para descrever as reações sólidos-reagentes e o algoritmo de Roman foi utilizado para descrever o escoamento pistom do líquido no leito da pilha. Além disto, foram acrescentadas correlações empíricas para estimar o volume de líquido retido na pilha [8]. Este modelo foi posteriormente particularizado para o caso da lixiviação cianídrica de minérios auríferos na qual podem participar outros metais lixiviáveis [9].

2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

No presente estudo, é proposto, para descrever a lixiviação cianídrica de minérios auríferos, um modelo matemático dinâmico baseado nas hipóteses de que a pilha pode ser aproximada por esta forma geométrica simplificada, que o escoamento do líquido no seu leito ocorre sem apreciável dispersão axial, que o tempo médio de residência da solução no seu interior não varia com o tempo ou com a posição vertical, que a pilha apresenta uma distribuição granulométrica e de teores dos metais lixiviáveis homogênea e que as reações metais-lixiviante são controladas por difusão do lixiviante no interior das partículas pouco porosas do minério.

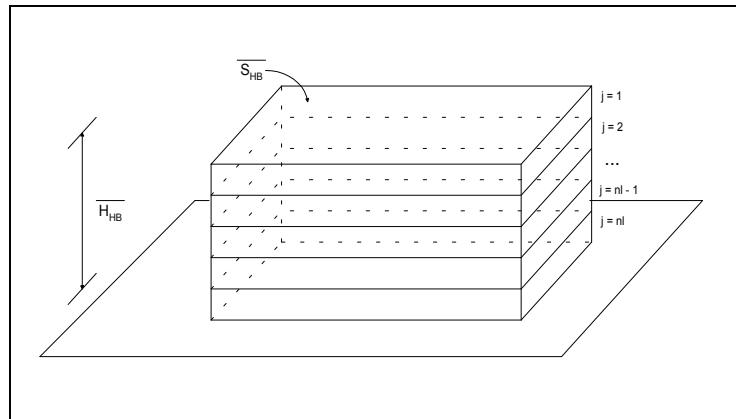


Figura 1 - Modelo geométrico da pilha

A pilha de minérios, aproximada por um paralelepípedo, mostrado na Figura 1, é subdividida em **nl** camadas de igual espessura, nas quais a solução, contendo o lixiviante e os produtos da lixiviação das camadas superiores, permanece retida por um tempo $\Delta\tau = \tau/nl$. Como decorrência da hipótese de que o tempo de residência médio da solução em cada camada é constante, a fração de líquido retido na pilha relaciona-se com este através da Eq. (1).

$$(\sigma_{HB} \varepsilon_{HB}) = \left[\frac{\tau(Q/S_{HB})}{H_{HB}} \right] \quad (1)$$

O modelo de escoamento utilizado envolve o acompanhamento do líquido desde a sua entrada na primeira camada até a sua saída na base da pilha, que devido a hipótese de escoamento pistom, tarda um tempo igual ao tempo de residência médio da solução na pilha (τ). Isto é feito através do incremento do contador do tempo, em múltiplos (t) do tempo de residência da solução nas camadas, do posterior incremento, em ordem inversa, do contador das camadas (j) desde a última até a primeira (sempre que o tempo

transcorrido for maior que o tempo médio de residência da solução na pilha), do posterior incremento do indicador da classe granulométrica (i) e do posterior incremento do contador que indica o metal lixiviável (m). Desta forma, calcula-se a recuperação dos metais em cada classe granulométrica, em cada camada e em toda pilha, assim como, as concentrações, dos metais e do lixiviante, que entram $C(t,j)$ e que saem $C(t,j+1)$ de cada camada (j) e dos teores residuais dos metais $\gamma(t,j)$, que serão lixiviados nos instantes posteriores.

Na Figura 2 o esquema seqüencial de cálculo acima descrito é mostrado para o caso de uma pilha, subdividida em três camadas, que é lixiviada por um tempo igual a $(nl+1)/nl$ do tempo médio de residência da solução na pilha. No instante $t=1$ o líquido que entra na primeira camada, com uma concentração $C(1,1)$, encontra o metal com teor $\gamma(0,1)$ e nela permanece por um tempo Δt saindo com uma concentração $C(1,2)$ e deixando um teor residual de metal $\gamma(1,1)$. No instante $t=2$ o líquido que entra na segunda camada, com uma concentração $C(1,2)$, encontra o metal com teor $\gamma(0,2)$ e ai permanece por um tempo Δt saindo com uma concentração $C(1,3)$ e deixando um teor residual de metal $\gamma(1,2)$, enquanto que o líquido que entra na primeira camada, com uma concentração $C(2,1)$, encontra o metal com teor $\gamma(1,1)$ e ai permanece por um tempo Δt , saindo com uma concentração $C(2,2)$ e deixando um teor residual de metal $\gamma(2,1)$. Procedese desta forma até que a solução que entrou no primeiro instante seja drenada (no tempo $t=3$) e em seguida sejam drenadas as outras frações.

Devido ao grande tamanho das partículas de minério utilizadas nas pilhas, existe um predominante caráter difusivo nas reações metais-lixiviante que podem ser descritas por um modelo reativo simplificado como o modelo de centro não reagido mostrado na Eq. (2) e descrito no Apêndice 1.

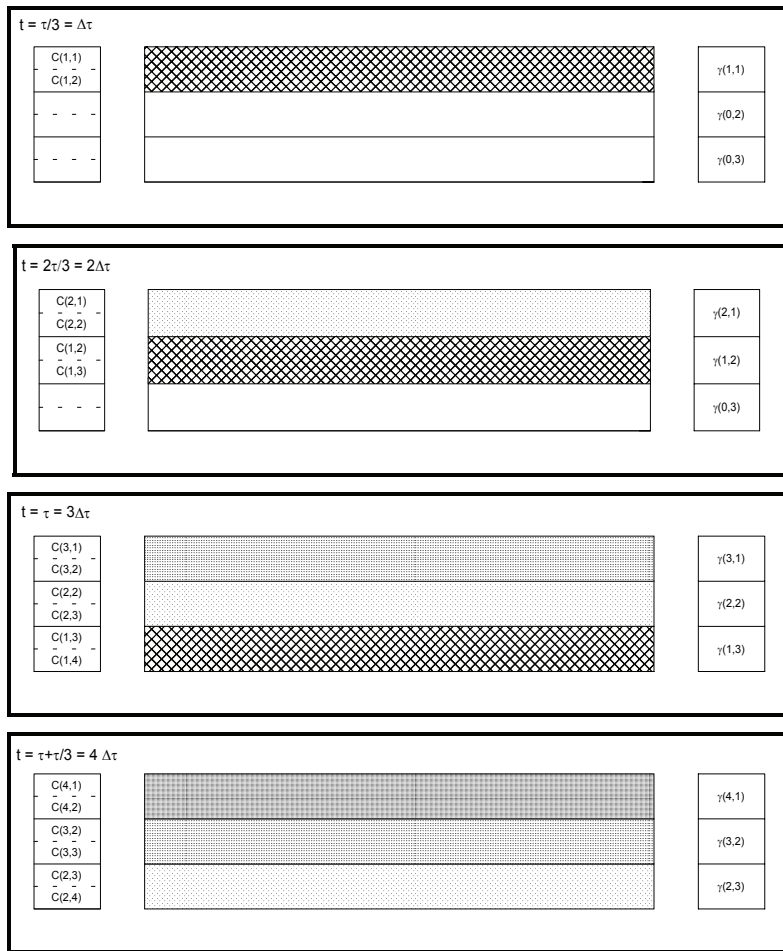


Figura 2 - Modelo do escoamento da solução e do cálculo das concentrações (C) e dos teores residuais (γ)

$$\frac{d\alpha'_{tjim}}{dt} = \frac{K_{tjim}}{(1 - \alpha'_{tjim})^{-1/3} - 1} \quad (2)$$

Onde:

$$K_{tjim} = \frac{3CCN_{tj} D_{CN}}{\left[\rho \sum_{m=1}^{nm} (lc_m \gamma_m \theta_m) \right] R_i^2} = \frac{3CCN_{tj} D_{CN}}{\rho lc_T R_i^2}$$

Diversos metais presentes no minério podem ser complexados pelo cianeto. O consumo de lixiviante individual para cada metal lixiviável pode ser estimado, a partir do consumo total, dos teores iniciais dos metais e dos fatores estequiométricos, através da Eq. (3).

$$lc_m = \frac{lc_T}{\theta_m \gamma_m} \left(\frac{F_m}{AW_m} / \sum_{m=1}^{nm} \frac{F_m}{AW_m} \right) \quad (3)$$

Manipulando-se algebricamente a Eq. (2), como é mostrado no Apêndice 2, chega-se a Eq. (4), que pode ser resolvida analiticamente e fornece as recuperações individuais, no tempo $t \cdot \Delta t$ de cada metal lixiviável m , contido nas partículas da faixa granulométrica i , localizada na camada j , quando são conhecidos o valor da recuperação no tempo anterior ($t-1 \cdot \Delta t$), o valor da concentração do lixiviante proveniente da camada anterior e os teores iniciais dos metais.

$$\alpha'^3_{tjim} + b_{tjim} \alpha'^2_{tjim} + c_{tjim} \alpha'_{tjim} + d_{tjim} = 0 \quad (4)$$

Devido a impossibilidade da solução lixiviante difundir-se completamente no interior das partículas do minério e assim dissolver completamente os metais lixiviáveis, utiliza-se para obter as recuperações possíveis dos metais (α'_{tjim}), fatores de passivação (α_m),

como indica a Eq. (5), que podem ser determinado experimentalmente.

$$\alpha_{t_{jim}} = \alpha'_{t_{jim}} \theta_m \quad (5)$$

Assumindo-se que a distribuição granulométrica de minério é conhecida e homogeneamente distribuídas em cada uma das **nl** camadas, que no incremento de tempo em que a Eq. (4) é resolvida não ocorre apreciável alteração no teor das partículas e que os teores dos metais lixiviáveis em cada faixa granulométrica são conhecidos, pode-se determinar para cada instante a recuperação global dos metais em cada camada, através da Eq. (6).

$$\alpha L_{t_{jm}} = \frac{\sum_{i=1}^{nf} (\alpha_{t_{jim}} w_{ji} \gamma_{jim})}{\sum_{i=1}^{nf} (w_{ji} \gamma_{jim})} = \sum_{i=1}^{nf} (\alpha_{t_{jim}} f_i) \quad (6)$$

Admitindo-se que as **nl** camadas da pilha tem a mesma massa, as recuperações globais dos metais lixiviáveis da pilha em cada instante podem ser calculadas pela Eq.(7).

$$\alpha H_{tm} = \frac{\sum_{j=1}^{nl} (\alpha L_{t_{jm}} w_j \gamma_{jm})}{\sum_{j=1}^{nl} (w_j \gamma_{jm})} = \frac{\sum_{j=1}^{nl} (\alpha L_{t_{jm}} \gamma_{jm})}{\sum_{j=1}^{nl} (\gamma_{jm})} \quad (7)$$

Os teores residuais dos metais em cada camada da pilha são atualizados em cada instante utilizando-se a Eq.(8).

$$\gamma r_{t_{jm}} = \gamma_{ojm} (1 - \alpha L_{t_{jm}}) \quad (8)$$

A concentração do lixivante na solução que deixa a camada **j** da pilha é calculada usando-se a Eq. (9) enquanto que as

concentrações dos metais na solução que deixa a camada **j** da pilha são atualizadas utilizando-se a Eq. (10), que corresponde a um balanço de massa nas camadas.

$$CCN_{t_{j+1}} = CCN_{t_j} - \left(\frac{M_{HB} \gamma_m}{S_{HB} H_{HB}} \right) \sum_{m=1}^{nm} [lc_m (\alpha L_{t_{jm}} - \alpha L_{t-1_{jm}})] \quad (9)$$

$$CM_{t_{j+1}m} = CM_{t_j m} + \left(\frac{M_{HB} \gamma_m}{S_{HB} H_{HB}} \right) (\alpha L_{t_{jm}} - \alpha L_{t-1_{jm}}) \quad (10)$$

3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Aqui é mostrado apenas o efeito de algumas variáveis para uma visualização da sua ação sobre o desempenho do modelo. Tomou-se com base o Caso 1 da Tabela 2 e comparou-se os seus resultados com aqueles obtidos com outras situações simuladas alterando-se o número de subdivisões da pilha (Casos 2 e 3), a difusividade efetiva do cianeto (Casos 4 e 5) e o tempo médio de residência da solução (Casos 6 e 7). Os resultados destes testes são mostrados nas Figuras 3 à 5. Pode-se ver que o número de subdivisões da pilha não apresenta apreciável efeito sobre os resultados de recuperação e da concentração do ouro na solução, que a difusividade efetiva do lixiviante bem como o tempo médio de residência da solução na pilha modificam fortemente os resultados. O que confirma as análises de sensibilidade mais detalhadas feitas anteriormente para este modelo [1,10,11].

A difusividade efetiva do lixiviante e o tempo médio de residência da solução na pilha não podem ser obtidas diretamente, mas podem ser estimadas se utilizadas como parâmetros de calibração do modelo. Elas podem ser posteriormente associadas através de correlações empíricas com as condições operacionais do processo,

tais como: altura e massa da pilha, distribuição granulométrica do minério, vazão e concentração do lixiviante.

Tabela 2: Dados usados para análise de sensibilidade do modelo

		1	2	3	4	5	6	7
D_{CN}	[mm ² h ⁻¹]	0,010	0,010	0,010	0,005	0,020	0,010	0,010
ρ	[g cm ⁻³]	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
lc_T	[g kg ⁻¹]	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
γ_{Au}	[g t ⁻¹]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
θ_{Au}	[%]	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
H_{HB}	[m]	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
M_{HB}	[t]	15000	15000	15000	15000	15000	15000	15000
S_{HB}	[m ²]	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500
τ	[dia]	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	5,0	10,0
C_{CN}	[g l ⁻¹]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Q/S_{HB}	[l h ⁻¹ m ⁻²]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
nl		20	5	50	20	20	20	20
R_1	[mm]	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525	9,525
f_1	[%]	100	100	100	100	100	100	100

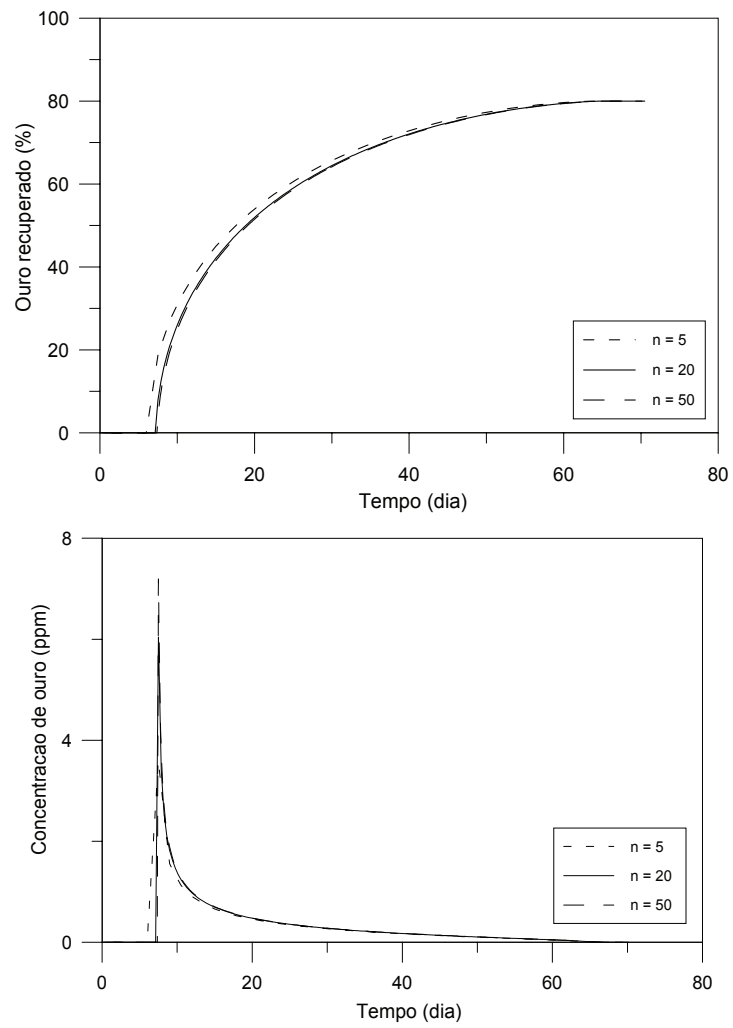


Figura 3 - Efeito do número de subdivisões da pilha

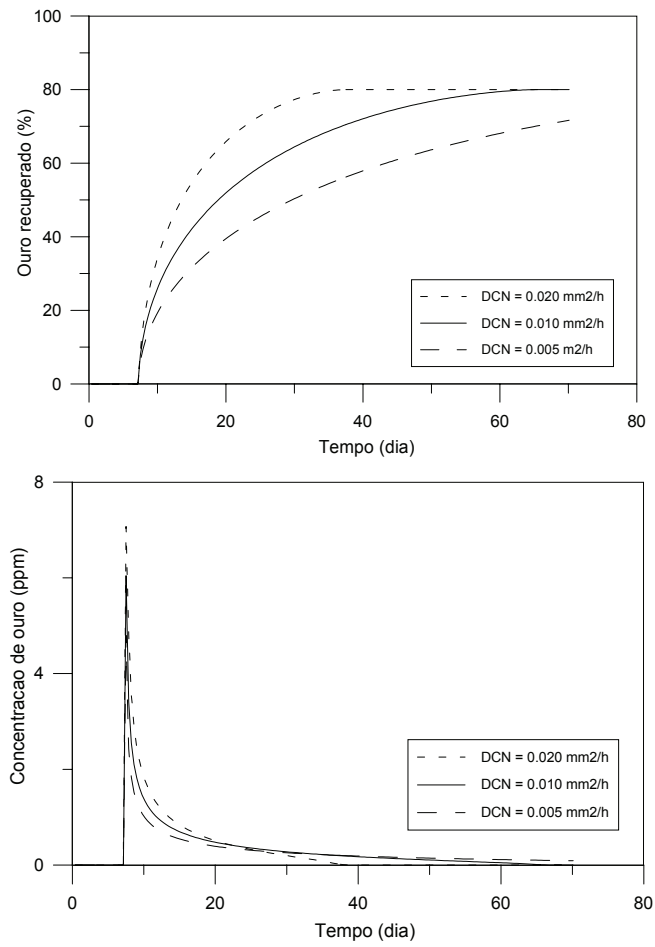


Figura 4 - Efeito da difusividade efetiva do cianeto

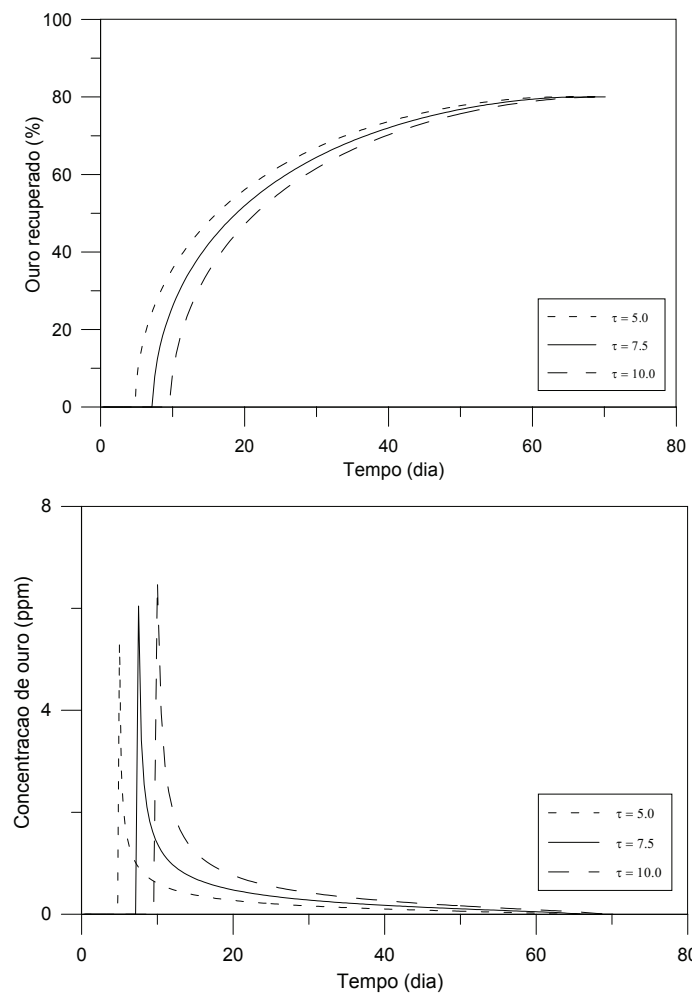


Figura 5 - Efeito do tempo de residência da solução na pilha

4. ESTUDO DE CASO

Utilizou-se a difusividade efetiva do cianeto no minério e o tempo de residência do líquido na pilha como os parâmetros de ajuste do modelo. O critério de minimização foi calculado através da Eq.(11), que descreve a soma ponderada do quadrado dos desvios associados a recuperação do ouro e a sua concentração no licor de lixiviação, levando em consideração o número de subdivisões da pilha.

$$Jc = \frac{\sum_{t=1}^{T \max} \sum_{m=1}^{nm} \left[\omega_{1m} (CMR_{tm} - CM_{t(nl+1)m})^2 + \omega_{2m} (\alpha R_{tm} - \alpha H_{tm})^2 \right]}{nl} \quad (11)$$

Para avaliar o modelo considerou-se uma das pilhas (RSM 42) da Rio Salitre Mineração (CBPM) que localizava-se na faixa Weber, pertencente a região do Greenstone belt do Rio Itapicuru (Bahia). O minério era composto pela parte oxidada do depósito e apresentava teores de sulfeto e de metais lixiviáveis desprezíveis.

A Tabela 3 apresenta os dados usados para a simulação. Devido a não disponibilidade da distribuição de tamanho das partículas, da altura e da área média da pilha, os valores nominais destes parâmetros foram utilizados.

A Figura 6 mostra como o critério de minimização (Jc) varia com a difusividade efetiva e com o tempo médio de residência da solução para a pilha RSM 42. Nota-se a existência de uma região de mínimo, correspondente aos melhores valores dos parâmetros estimados. Os ponderadores ω_1 e ω_2 foram considerados unitários neste caso, pois desta forma garante-se que os desvios entre os valores simulados e experimentais para a curva de recuperação influenciam mais o critério Jc.

A utilização do método de otimização de Nelder e Mead [12] permitiu a calibração do modelo com a determinação da difusividade

efetiva do cianeto e do tempo médio de residência da solução para a pilha RSM 42, indicados com (*) na Tabela 3. O valor da difusividade efetiva obtido é aceitável, podendo ser encontrado, por exemplo, em uma partícula de minério de porosidade 2% e tortuosidade 20.

Tabela 3: Dados para a simulação

		RSM 42
D_{CN}	$[m^2 h^{-1}]$	$6,0 \times 10^{-9} *$
ρ	$[g cm^{-3}]$	2,7
lc_T	$[g kg^{-1}]$	0,292
γ_{Au}	$[g t^{-1}]$	2,60
θ_{Au}	$[\%]$	75,1
H_{HB}	$[m]$	4,5
M_{HB}	$[t]$	14726
S_{HB}	$[m^2]$	2616
τ	$[dia]$	7,60 *
C_{CN}	$[g l^{-1}]$	1,0
Q/S_{HB}	$[l h^{-1} m^{-2}]$	4,8
R	$[mm]$	9,525
nl		25

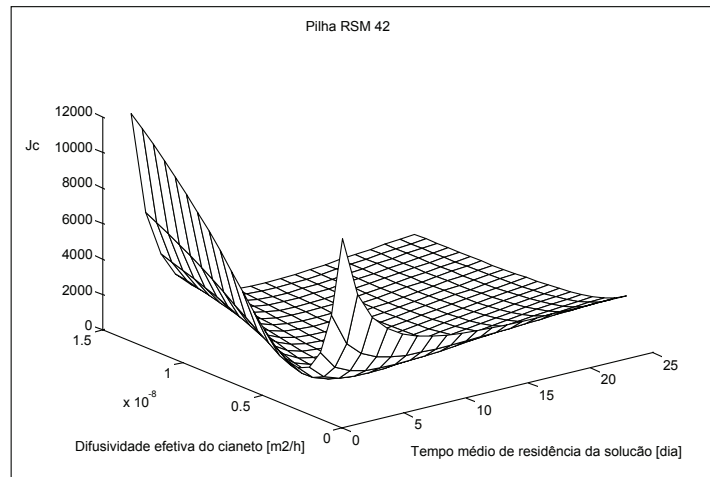


Figura 6 - Variação do critério J_c com os parâmetros estimados (D_{CN} e τ)

Os resultados da calibração, apresentados na Figura 7, mostram a existência de alguns desvios entre os resultados experimentais e simulados, que podem ser creditados as desconsiderações da distribuição granulométrica do minério, da área e da altura médias, do escoamento na base impermeabilizada da pilha, assim como, da limitação do modelo de escoamento adotado. Além disso, a concentração residual do ouro no licor de lixiviação e a sua recirculação explica as discrepâncias no final da curva de concentração. Nota-se, entretanto, que o comportamento das curvas simuladas são próximas das experimentais e que as suas tendências são bem seguidas.

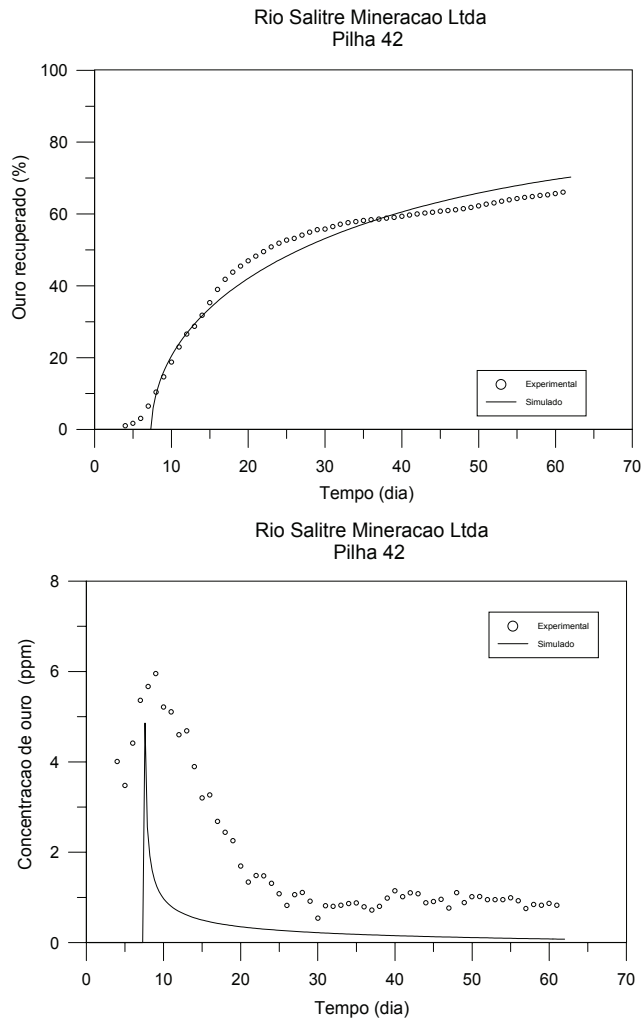


Figura 7 - Comparação entre os resultados simulados e experimentais

5. CONCLUSÕES

O processo de lixiviação em pilha de minérios auríferos pode ser descrito de forma aproximada por um modelo simples, no qual o escoamento da solução através do leito da pilha é livre de dispersão axial e a reação sólido-fluido tem um controle na etapa de difusão dos reagentes.

A solução analítica, para cada intervalo de tempo, do modelo de centro não reagido conferiu robustez ao algoritmo que mostrou fraca dependência do número de subdivisões utilizadas no método numérico, conforme foi indicado na análise de sensibilidade.

A difusividade efetiva do cianeto no minério e o tempo médio de residência da solução na pilha são parâmetros que se mostram adequados para a calibração do modelo.

Os resultados mostrados são bons indicadores para a representação dos desempenhos do processo e podem, então, ser utilizados como pontos de partida para processos de decisão que almejem a maximização do capital ambiental, neste caso representado pela própria pilha, suas espécies químicas presentes e seus fluxos de soluções.

É interessante observar que o consumo de cianeto, facilmente obtenível, para cada espécie metálica de interesse, dentro de um tempo requerido, bem como a eventual inibição da difusão da solução de lixiviação, produzem excelentes perspectivas para a definição de critérios de sustentabilidade para a pilha em questão.

BIBLIOGRAFIA

BOX, J.C. and YUSUF, R., 1984. Simulation of heap and dump leaching process. Proceedings of the Symposium on Extractive Metallurgy, Melbourne, Australia, p. 117-124

- BOX, J.C., and PROSSER, A.P., 1986. A general model for the reaction of several minerals and several reagents in heap and dump leaching. *Hydrometallurgy*, No.16, p.77-92.
- CASSA, J.C., and DE ANDRADE LIMA, L.R.P., 1997. Screening variables in complex systems: A comparative study, *Proceedings of the XX International Mineral Processing Congress, Aachen, Germany, Vol. 1, p. 433-444.*
- DE ANDRADE LIMA, L.R.P, 1992. Simulação da lixiviação em pilhas de minérios auríferos, M.Sc. Thesis, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, 235pp.
- DE ANDRADE LIMA, L.R.P., VILLAS-BÔAS, R.C. E KOHLER, H.M., 1995, Análise de sensibilidade de modelos usando as técnicas de cluster analyses e Plackett-Burman, In: XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro, Brazil
- DE ANDRADE LIMA, L.R., VILLAS BÔAS, R.C. and KOHLER, H.M., 1998, Mathematical Modeling of Gold Ore Heap Leaching, *International Symposium on Gold Recovery, Montreal, Canada, CIM, (in press).*
- DIXON, D.G. and HENDRIX, J.L., 1993. A mathematical model for heap leaching of one or more solid reactants from porous ore pellets, *Metallurgical Transactions, No.24B, p.1087-1102.*
- FROMENT, G.F. and BISCHOFF, K.B., 1979. *Chemical Reactor Analysis and Design*, John While and Sons, New York, 765pp.
- HAMMOND, A. Et al, 1995. *Environmental Indicators: A Systematic Approach to Measuring and Reporting on Environmental Policy Performance in the Context of Sustainable Development*, World Resources Institute, may, p.11

- PROSSER, A.P., 1988. Simulation of gold heap leaching as an aid to ore-process development, Proceedings of the Precious Metals'89, p.121-135.
- ROMAN, R.J., BENNER, B.R., and BECKER, G.W., 1974. Diffusion model for heap leaching and its application to scale-up, Trans. AIME, No.256, p.247-256.
- SANCHEZ-CHACON and LAPIDUS ,1997. Model for heap leaching of gold ores by cyanidation, Hydrometallurgy, No. 44, p.1-20.
- SIQUEIRA, L.T., MADEIRA, R., FIUZA, M., NAKAMURA, S., REINHARDT, M.C. AND TRANCOSOS, I., 1985, Projeto Ouro Bahia - "Fazenda Brasileiro" (CVRD), In: I Simposio Internacional do Ouro, Rio de Janeiro, Brazil, p. 1-22.
- VILLAS-BÔAS,1994. Materials Production and the Environment. Hydrometallurgy '94 , Chapman & Hall, Suffolk, p.107-121.

Versão final 17:40 19.06.98