

Modelos para la lixiviación en pilas  
de oro por cianuración. Revision.

Cyanidation models for heap  
leaching gold ores. A review.

Fernando Torres  
Oscar E. Moreno  
Adriana S. Tua  
Germán Rodríguez  
Juan P. Moreno

---

Instituto de Investigaciones Mineras-Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas,  
Universidad Nacional de Catamarca. Maximio Victoria N° 55. Catamarca.  
Argentina. ftorres.ft241@gmail.com



## RESUMEN

La lixiviación en pilas es un proceso de bajo costo para recuperar metales de sus menas que fue desarrollado a principios de los años 1.970. Con este método muchos de los materiales considerados estériles en su momento, pueden ser procesados y sus valores metálicos recuperados. A esto se suma que se debe afrontar el procesamiento de menas de muy baja ley y con asociaciones mineralógicas-complejas. En este escenario la Hidrometalurgia como método de concentración de minerales a través de la lixiviación en pilas, ha crecido significativamente, por su bajo costo y por la posibilidad de tratar grandes tonelajes de minerales de muy baja ley. Los modelos de lixiviación son una herramienta para el manejo del inventario de metales para definir la producción y elaborar los planes de producción para satisfacer las necesidades económicas de los proyectos mineros en operación. La problemática es mayor al manejar inventarios cuando las pilas son permanentes, debido a los diversos factores de incertidumbre que gobiernan la operatividad de estos sistemas cerrados de lixiviación. El objetivo de este trabajo es plantear el estado actual del conocimiento de los modelos matemáticos aplicados a la lixiviación de minerales de oro por el método de cianuración.

**Palabras clave:** Modelos de lixiviación en pilas. Menas de Oro. Revisión.

## ABSTRACT

Heap leaching is a low-cost process to recover metals from its ores that was developed in the early 1970s. With this method, many of the materials considered sterile at the time, can be processed and their metal values recovered. Added to this is the processing of very low grade ores and complex mineralogical associations. In this scenario, Hydrometallurgy as a method of concentrating minerals through heap leaching has grown significantly, due to its low cost and the possibility of treating large tonnages of very low grade minerals. Leaching models are a tool for managing the metal inventory to define production and prepare production plans to meet the economic needs of mining projects in operation. The problem is greater when managing inventories when heap are permanent, due to the various factors of un-

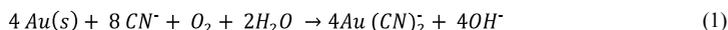
certainty that govern the operation of these closed leaching systems. The objective of this paper is to present the current state of knowledge of the mathematical models applied to the leaching of gold ores by the cyanidation method.

**Keywords:** Heap leach models. Gold ores. Review.

## INTRODUCCIÓN

Muchos modelos de lixiviación en pilas han sido desarrollados para contribuir a expresar matemáticamente los fenómenos que ocurren en la lixiviación de minerales metálicos, con el objetivo de estudiar la cinética de extracción y obtener modelos que puedan simular con el menor error posible los valores metálicos a obtener, facilitando los planes de producción a futuro con estimaciones certeras. Los modelos deben responder, además del metal a extraer, a las características mineralógicas de la mena portadora.

En la superficie de las partículas de oro, los agentes de lixiviación reaccionan con el oro sólido según la ecuación de Elsner:



La cinética de esta reacción es bien conocida para finos, debido a que la lixiviación en tanques con cianuro representa la mayoría de la producción mundial de oro. Los modelos desarrollados incluyen las concentraciones de cianuro, de oxígeno, y el tamaño de las partículas. Sin embargo, todavía no se ha desarrollado ningún modelo cinético para partículas gruesas de mineral de oro, tal como se utiliza industrialmente, la denominada lixiviación en pilas del ROM (“Run of Mine”), es decir con la granulometría con la que sale de la mina, excluyendo el costo de trituración, un costo alto que hace inaplicable el método para leyes bajas de mineral. Por otra parte, la complejidad de las menas de oro va siendo cada vez mayor, y esto conduce a la aplicación de modelos de cianuración para menas refractarias.

## MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos consideran los efectos de los mecanismos de transporte sobre el proceso y usan un mecanismo electroquímico para describir la cianuración del oro a nivel de grano. La Trans-

ferencia de masa de los reactantes y de los productos de la reacción en la pila se describen usando los conceptos de reactor de lecho fijo fluidizado (trickle bed reactor), que opera en condiciones de flujo transitorio no saturado. [1]

En los últimos 30 años se han desarrollado distintos modelos que varían según la cantidad de fenómenos considerados y la complejidad. Dixon [2], los clasifica en las categorías siguientes: Modelos abióticos: aquellos que se encuentran limitados a situaciones donde no existe regeneración de reactivos en la pila, que han sido aplicados a la lixiviación de óxidos de cobre y a la cianuración de oro, destacando las publicaciones de Roman, Benner, & Becker [3] y Dixon & Hendrix [4][5]; Modelos de biolixiviación-biooxidación: Utilizados para recuperación de cobre y aplicados a la menas sulfuradas de oro que resultan refractarias al cianuro. En esta categoría, destaca el modelo HeapSim©, descrito en las publicaciones de Bouffard & Dixon, [6], con una descripción de los principales procesos que ocurren en el interior de la pila. Por otra parte, los modelos multidimensionales, ofrecen un enfoque distinto del proceso, por medio de la aplicación de la fluido-dinámica computacional CFD (computing fluid dynamics) a la lixiviación, McBride [7], que confiere al modelo la habilidad de simular estructuras espaciales en las pilas; en estos modelos destacan el modelo de Bennett [8] y el modelo desarrollado por Leahy & Schwarz, [9] y De Andrade Lima [10].

Sanchez-Chacón & G.T. Lapidus [11], desarrollaron un modelo para describir el proceso de lixiviación en pilas en la extracción de oro por cianuración para menas no-refractarias. Este modelo considera que el flujo de reactantes difunde en partículas porosas para reaccionar con los granos metálicos de oro, considerando los efectos de los mecanismos de transporte y usa un mecanismo electroquímico para describir la cianuración de oro a nivel de partícula. La transferencia de masa de los reactantes y los productos en la pila, son descriptos usando los conceptos de reactor de lecho fijo fluidizado.

Crundwell y Godorr [12], desarrollaron un modelo basado en el modelo del núcleo recesivo (shrinking model), planteando que sobre la partícula de oro se forma una capa de material pasivante a medida que la lixiviación procede que aumenta en tamaño y considera a este fenómeno como el controlante de la cinética de la lixiviación de oro.

## TIPOS DE DEPÓSITOS DEL REACTANTE SÓLIDO: DEPÓSITO INTRA-PARTICULAR Y DEPÓSITOS SUPERFICIALES

La liberación del sólido reactante (oro) se produce por reducción de tamaños. En la lixiviación en pilas, donde los tamaños de apilamiento tienen un  $P_{80}$  alrededor de de  $\frac{1}{2}$ " a 1" puede considerarse que se encontrarán muy pocas partículas del sólido reactante liberadas y la mayor parte estarán como depósitos intra-particulares en la red porosa al interior de la misma, tal como se muestra en la Figura 1. En la lixiviación convencional en tanques se incluye la molienda y el tamaño de partículas tiene un  $P_{80}$  alrededor de 74 micrones, por este motivo se encontrarán más partículas liberadas como depósitos superficiales del sólido reactante. Wadsworth [13], tiene en cuenta los dos depósitos pero supone que la disolución ocurre en serie (primero la disolución de los depósitos superficiales y luego los depósitos intra-particulares del sólido reactante. Dixon y Hendrix [4], suponen que se producen en paralelo, es decir simultáneamente.

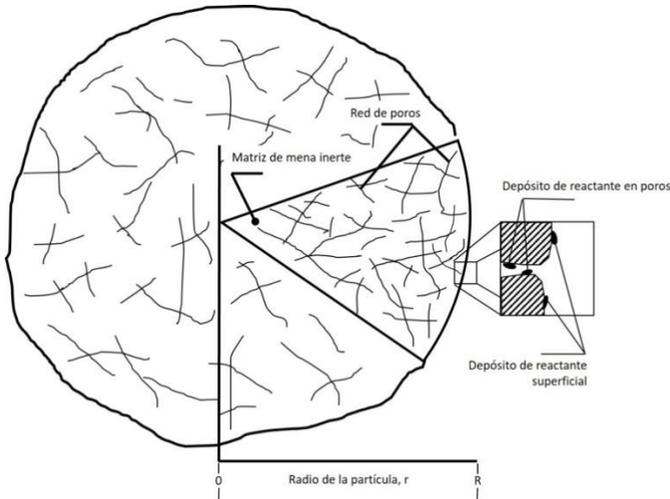


Figura 1: Efectos de la trituración y la accesibilidad de la solución lixiviante a los espacios porales de una partícula. Fuente: [4]

## MODELO PARA PARTÍCULAS FINAS:

Pueden considerarse en este modelo las partículas inferiores a #10, [15]. El modelo no tiene en cuenta los fenómenos de difusión, porque no tienen gran influencia en la velocidad de conversión. La ecuación de velocidad de Dixon y Hendrix [4] puede escribirse como:

$$G_0 \frac{dX'}{dt} = G_0 \frac{(1-X')^\phi}{\omega}; \text{ Donde: } X' = \frac{X}{X_{\max}} \quad (2)$$

X = Extracción de oro (%)

X<sub>max</sub> = Extracción máxima de oro (%)

T = tiempo (s)

φ = Coeficiente que depende de la forma de la partícula

G<sub>0</sub> = Ley inicial de oro (KmolAu/Kg mena)

El tiempo de la reacción, ω puede escribirse en función de la temperatura y la concentración de cianuro de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\omega} = K' e^{-E_a/RT} C_{NaCN}^n \quad (3)$$

Donde:

K' = constante de velocidad (s<sup>-1</sup>)

T = Temperatura (°K)

E<sub>a</sub> = Energía de activación (J/Kmol)

R = Constante de los gases (8314 KJ/mol)

C = Concentración de cianuro (Kmol/m<sup>3</sup>)

n = orden reacción respecto a la concentración de cianuro.

## MODELO PARA PARTÍCULAS GRUESAS:

Los modelos para partículas gruesas deben considerar la difusión de los reactantes y los productos, nos permitirán calcular: a) La concentración de cianuro. b) La concentración de O<sub>2</sub> y c) La concentración de oro disuelto en partículas porosas y a diferentes tiempos, también podremos obtener la extracción de oro y la recuperación, la cual será igual a la extracción si la difusión es extremadamente alta y menor si ocurre lo contrario. La ecuación de flujo en una partícula porosa esférica de radio R y de porosidad ε que se supone constante y uniforme (m<sup>3</sup>solución/m<sup>3</sup>), con una tortuosidad de sus poros, τ (msolución/m<sup>3</sup>) y una densidad de partícula ρ (Kg mineral/m<sup>3</sup> mineral) está dada por:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 j_r = \varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} - s; \text{ s = velocidad neta de producción de soluto (kmol soluto/m}^3\text{/s)} \quad (4)$$

El flujo del soluto en un medio poroso en una esfera tortuosa es

(Ley de Fick):

$$J_r = -\frac{D\varepsilon}{\tau} \frac{\partial c}{\partial r} \quad (5)$$

El modelo no tiene en cuenta las reacciones laterales del cianuro, formando complejos con el Cinc, el Hierro, la Plata, y el Cobre, entre otros.

$$s_i = v \rho G_0 \left(\frac{dX}{dt}\right)^i \quad (6)$$

Donde:

$v$ : Moles de soluto/mol de metal reaccionado (-2 para CNNa; 1 para Au; -1/4 para  $O_2$ )

$\rho$ : Peso específico mineral (Kg. mineral/m<sup>3</sup> mineral)

$G_0$ : Ley oro (Kmol Au/Kg mineral)

$$\left(\frac{dX}{dt}\right)^i = K' e^{\frac{E_a}{RT}} C_{NaCN}^n C_{O_2}^{0,5} (1 - X^i)^\varphi \quad (7)$$

La ecuación para la disolución de oro es:

$$s_{Au}^{(i)} = -2G_0 \rho K' e^{\frac{E_a}{RT}} (1 - X_{old}^{(i)})^\varphi (C_{NaCN;old}^{(i)})^n (C_{O_2;old}^{(i)})^{0,5} = K_{Au}^{(i)} \quad (8)$$

En la Figura 2, se muestra cómo reacciona el complejo dicianoaurato y como se transporta a través de la pila en función del tiempo de referencia de la corrida (6,5 días y en la mitad de la pila). Se ha graficado: La fracción de oro que no reacciona; el complejo que se encuentra dentro de las partículas minerales; el oro en la solución que percola en la pila y, finalmente, el oro que está saliendo de la pila como solución enriquecida. Se ve que todo el oro reacciona en menos de una semana. El mayor tiempo requerido para la extracción final depende de la difusión del complejo de oro  $[Au(CN)_2]$  a través de la partícula porosa, en el camino hacia el seno de la solución [11]. El hecho que la reacción química en capa límite solamente ocurre al principio del proceso es importante, porque después de este período (antes de la semana) la concentración de cianuro en la solución lixivante puede ser reducida en gran medida, confirmando lo encontrado por Bartlett [14].

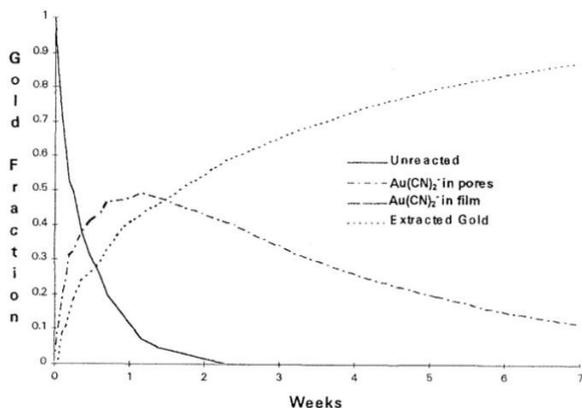


Figura 2: Distribución de oro en una lixiviación en función del tiempo. Fuente: [11]

## MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL TRATAMIENTO DE “RUN OF MINE”

El procesamiento del ROM (“Run of mine”: Mineral de mina), será cada vez más una alternativa para hacer económicamente factibles muchos yacimientos actualmente inexplotados al eliminar la trituración secundaria, que representa un porcentaje elevado en el costo operativo por tonelada de mineral procesado. La lixiviación con cianuro se practica en más de 100 operaciones en todo el mundo, y representa el 12% de la producción mundial de oro. 33% de las operaciones se apilan con mineral run-of-mine (ROM), 19% con una mezcla de ROM y minerales triturados, y el resto, 48%, con mineral triturado. [15]

El ROM tiene una distribución de tamaño de partícula más gruesa, más amplia, y por consecuencia más heterogénea, que el mineral triturado, ello conduce a pilas con menor permeabilidad y mayores dificultades para mojarlas en su totalidad, encontrándose también problemas operativos como la “compactación de pilas” que afecta la recuperación final. A escala industrial, las recuperaciones de oro de ROM oscilan entre 50 y 65%, mientras que las recuperaciones de lixiviación en pilas de oro en mineral triturado son típicamente un 20% más altas que las pilas armadas con ROM [15].

En el tratamiento del ROM, el sólido reactante se encuentra exclusivamente como depósito intra particular. Bouffard y Dixon [15], presentaron una comparación de la cinética de difusión poral en la lixiviación para tamaños  $-1.7\text{ mm}$  (10 mallas) las que requirieron solo 24 horas para alcanzar la completa disolución de oro, mientras que partículas entre  $102\text{ }\mu\text{m}$  ( $4''$ ) to  $152\text{ }\mu\text{m}$  ( $6''$ ) requirieron 85 días para ello. La lixiviación de partículas de  $-1,7\text{ mm}$  (10 mallas) se completó en 24 horas. La cinética de lixiviación no fue influenciada por el pH o la concentración de oro disuelto. Aplicaron 3 modelos: Un modelo de partículas finas (expresado en la ecuación 2) un segundo modelo que incluye la difusión al modelo anterior, y un tercer modelo (ya que los 2 anteriores no reprodujeron bien la recuperación). Las partículas menores a  $1,7\text{ mm}$  ( $\#10$ ) no sufren ninguna limitación por difusión y la cinética es casi directamente proporcional a la concentración de cianuro (ec. 3). 2) El Modelo de difusión/reacción para predecir la cinética de disolución de estas partículas finas no sería aplicable a partículas de mayor tamaño como ROM. 3) La cinética de lixiviación de oro intrínseca se mostró lejos más lenta que la difusión hacia adentro de las partículas de cianuro u oro, y la difusión hacia afuera del complejo dicianoaurato.

## CONCLUSIONES

-A medida que las partículas minerales a lixiviar son más gruesas, lo que realmente cambia es el desplazamiento total (camino) de los reactivos (Cianuro, Oxígeno) hacia el interior de las partículas y cuando estos acceden al reactante (el oro), el complejo dicianoaurato debe recorrer el camino de regreso hasta la solución, este tiempo es mucho mayor cuanto mayor es el tamaño de partícula y depende principalmente de la conexión del sistema de grietas al interior de las partículas (tortuosidad).

-La heterogeneidad granulométrica del ROM reduce la permeabilidad en la pila, contribuyendo a la aparición de los fenómenos de inundaciones por compactación y sectores que se mojan parcialmente por capilaridad o inclusive quedan sin humedecerse.

-Los modelos matemáticos aplicables a partículas finas tales como las que se tratan en plantas convencionales de agitación, funcionan adecuadamente por el hecho que la etapa controlante generalmente es la reacción química.

-En la lixiviación en pilas de mineral triturado, hay una serie de modelos matemáticos que ajustan bien a las estimaciones, y consideran a la difusión como la etapa controlante del proceso.

-En la lixiviación de “run of mine”, los modelos tradicionales no dan buenos resultados (en general sobreestiman la recuperación), y esto tiene que ver con las condiciones de las fracturas que conforman la red porosa al interior de las partículas de gran tamaño y la matriz mineral en la que se inserta el oro además de la heterogeneidad de las partículas que afecta seriamente la permeabilidad de la pila.

### **BIBLIOGRAFÍA CITADA:**

1. A. Gianetto and V. Specchia. Trickle-bed reactors: State of art and perspectives. Chemical Engineering Science. Vol. 47. No. 13114. pp. 3197-3213. 1992.
2. Dixon, D. G. Heap Leach Modeling. The current state of the art. Hydrometallurgy 2003 - Vol 1. (págs. 289-314). TMS.
3. Roman, R. J., Benner, B. R., & Becker, G. W. Diffusion model for heap leaching and its application to scale-up. (1974). AIME Transactions Vol. 256, págs. 247-252.
4. Dixon, D. G., & Hendrix, J. L. A general model for leaching of one or more solid reactants from porous ore particles. Metallurgical Transactions B, 24b, págs. 157-169. (1993).
5. Dixon, D. G., & Hendrix, J. L. A mathematical model for heap leaching of one or more solid reactants from porous ore pellets. Metallurgical Transactions B, 24B, págs. 1087-1102. (1993).
6. Bouffard, S. C., & Dixon, D. G. Modeling pyrite bioleaching in isothermal test columns with Heap Sim model.. Hydrometallurgy, 95, págs. 215-226. (2009)
7. D. McBride, M. Cross a, J.E. Gebhardt. Heap leach modeling employing CFD technology: A ‘process’ heap model. Minerals Engineering 33 72–79. (2012)
8. Bennett, C. R., McBride, D., & Gebhardt, J. E. A comprehensive model for copper sulphide heap leaching Part 1: Basic formulation and validation through column test simulation. Hydrometallurgy, 127-128, págs. 150-161. (2012).
9. Leahy, M. J., & Schwarz, M. P. Modeling jarosite precipitation in isothermal chalcopyrite bioleaching columns. Hydrometa-

- llurgy, 98, págs. 181-191. (2009).
10. L.R.P. De Andrade Lima. A mathematical model for isothermal heap and column leaching.. Brazilian Journal of Chemical Engineering. Vol. 21, No. 03, pp. 435 - 447, July - September 2004. ISSN:0104-6632.
  11. A.E. Sanchez-Chacón, G.T. Lapidus. Model for heap leaching of gold ores by cyanidation.. Hydrometallurgy 44 ; 1-20. (1.997)
  12. Crundwell Frank K. A & Godorr Sven A. Mathematical model of the leaching of gold in cyanide solutions. Hydrometallurgy 44; 147- 162. (1997)
  13. M.E. Wadsworth, X. Zhu, J.S. Thompson, C.J. Pereira. Gold dissolution and activation in cyanide solution: kinetics and mechanism. Hydrometallurgy 57; 1–11. (2000)
  14. Bartlett, R.W. Metal extraction from ores by heap leaching. The Extraction and Processing Distinguished Lecture. The Iron and Steel Society of AIME 28B; 529–545. (1997).
  15. Bouffard Sylvie C. & Dixon David G. Evaluation of kinetic and diffusion phenomena in cyanide leaching of crushed and run-of-mine gold ores. Hydrometallurgy 86 ; 63–71. (2007)