

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PROCESOS E HIDRAULICA

"Modelo de lixiviación en pila de menas de oro por cianuración"

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA

Presenta

Adrián Efrén Sánchez Chacón
México, DF. Noviembre de 1995

Asesora

Dra. Gretchen Terri Lapidus Lavine

Sinodales

Dr. Salvador Aguayo Salinas.

Dr. Héctor Félipe López Isunza

Dr. Jesús Alberto Ochoa Tapia

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento otorgado para los estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa.

A los académicos de la UAMI en especial a mi asesora de tesis la Dra. Gretchen T. Lapidus Lavine por el apoyo, motivación y guía para la realización de este trabajo.

MODELO DE LIXIVIACION EN PILA DE MENAS DE ORO POR CIANURACION

Resumen

La importancia del presente trabajo consiste en la determinación de los fenómenos controlantes en el proceso de lixiviación en pila para la extracción de oro de menas no refractarias. El proceso implica la reacción heterogénea de cianuración en un lecho constituido de partículas porosas de mineral -consideradas en este estudio de forma esférica con porosidad y tamaño uniforme- a través del cual escurre la solución lixivante. Los agentes lixiviantes se difunden hacia el interior de las partículas porosas de mineral para reaccionar con los granos de oro metálico.

Se describe el proceso de lixiviación en pila, incorporando el enfoque y los resultados de la investigación en reactores de escurrimiento o trickle bed reactors, en especial al considerar los efectos de la efectividad de contacto entre la solución lixivante y las partículas de mineral. Se plantea un modelo simple que considera a las partículas porosas de mineral en completo contacto a través de su área externa con la solución lixivante. La existencia de un área externa parcialmente mojada se contempla al considerar una difusividad interna aparente, la cual se estima en función de la efectividad de contacto. Se emplea una expresión cinética basada en un estudio fundamental reportado en la literatura, para describir la reacción de cianuración de oro.

La solución numérica de las ecuaciones del modelo permite describir los perfiles de concentración de reactivos y productos en la pila de lixiviación. A partir de estos perfiles se efectúan balances que muestran como reacciona y se transporta el oro hasta salir de la pila de lixiviación. El estudio de la distribución de oro en el proceso como función del tiempo a partir de los balances mencionados, permite la posibilidad de implementar políticas dinámicas de operación en aspectos tales como la concentración de alimentación de reactivos y en la eficiencia del ciclo de enjuague de la pila de lixiviación, el cual tiene como finalidad eliminar el cianuro remanente en el mineral al término del ciclo de operación.

Se evalúa el efecto, en la tasa de extracción de oro, de parámetros tales como la porosidad y el radio de partícula, el flujo de solución lixivante, el área específica del oro en el mineral, la concentración de reactivos y la altura de pila. Los resultados obtenidos muestran que la etapa que controla la tasa de extracción es la difusión de reactivos y productos en el interior de las partículas de mineral. Por tanto, adquieren especial importancia parámetros como el radio de partícula, la porosidad del mineral y el flujo de solución lixivante, este último en función de su influencia en la efectividad de mojado de las partículas de mineral que constituyen el lecho.

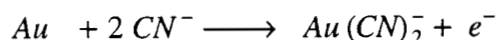
La estructura del modelo permite incorporar expresiones cinéticas para describir el consumo de cianuro y oxígeno por reacción con otros componentes del mineral.

INDICE

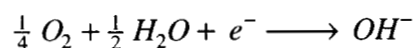
	página
Antecedentes y Revisión de la literatura	1
Planteamiento del modelo	6
Solución Numérica del Modelo	14
Resultados y Discusión	14
Conclusiones	31
Bibliografía	32
Nomenclatura	35
Apéndice A.-Parámetros empleados en el Modelo	39
Apéndice B.-Ecuaciones Adimensionales	53
Apéndice C-1.-Discretización de las ecuaciones del Modelo	56
Apéndice C-2.-Algoritmo del Programa	59
Apéndice D-1.-Condiciones Iniciales para el Programa	60
Apéndice D-2.-Variantes del Esquema Numérico	
a) Número de puntos de Colocación Ortogonal	62
b) Intervalo de tiempo empleado	64
Apéndice E-1.-Corrida de Referencia	66
Apéndice E-2.-Resumen de Corridas del Programa	
Balances Globales del Proceso	94
Apéndice E-3.-Parámetros Adimensionales y de Transporte	105

Antecedentes y Revisión Crítica de la literatura

La lixiviación es la operación que permite extraer un constituyente soluble de un sólido por medio de un solvente. La lixiviación de menas de oro empleando el proceso de cianuración fue patentada en Inglaterra en el año de 1887 (Habashi, 1992). Este proceso se basa en la propiedad de los iones cianuro de formar complejos muy estables con el oro, la plata y otros metales. Las soluciones débilmente alcalinas disuelven preferentemente el oro y la plata presentes en un mineral. El mayor avance en la comprensión del proceso de cianuración se debe a Kudryk y Kellogg (1954) quienes realizaron experimentos para demostrar que la disolución de oro en soluciones de cianuro es esencialmente un proceso electroquímico. La reacción anódica involucra la oxidación de oro (0) a oro (I) :



y la reducción catódica de oxígeno en la superficie de la partícula de oro :



Wadsworth (1991) desarrolló una expresión para la cianuración de una placa de oro en una solución agitada. El autor propone un mecanismo cinético basado en etapas de adsorción y transferencia de carga, acoplado al transporte de masa para explicar las curvas de polarización para la disolución anódica de oro y la reducción catódica de oxígeno sobre este metal, obtenidas por Kudryk y Kellogg (1954). En el Apéndice A se plantea una breve revisión de éste trabajo.

Tradicionalmente la cianuración se ha llevado a cabo en reactores agitados. El mineral se somete a un tratamiento previo de trituración y molienda que permite optimizar el transporte de masa, aunque no resulta económicamente viable cuando la ley del mineral es muy baja.

El proceso de lixiviación en pila de menas con bajo contenido de metales preciosos es una innovación relativamente reciente. Fue sugerido inicialmente, adoptando el tradicional método de cianuración, por el U.S. Bureau of Mines in 1967 (Fleming, 1992). La lixiviación en pila ha permitido la explotación de vastas reservas de minerales con ley tan baja como 0.65 g/t. El proceso no requiere gran inversión y es flexible, siendo viable a pequeña y gran escala.

El éxito de la lixiviación en pila depende de las características y el correspondiente procesamiento del mineral. En función de la permeabilidad del mineral tratado, se determinará el

grado de trituración. Si el mineral contiene gran cantidad de arcilla, los finos se deben separar y aglomerar antes de procesarse. Para un proceso eficiente de lixiviación, el oro debe presentarse como partículas libres de tamaño fino en un mineral poroso y no refractario. El carácter refractario de un mineral se debe a dos causas básicas: (1) Encapsulación física de partículas de oro finamente diseminadas (usualmente menos de unos cuantos micrones en tamaño) dentro de un mineral que es no reactivo e impermeable a la solución de cianuro. (2) Interferencia química de uno o más constituyentes del mineral con el proceso de cianuración (Fleming , 1992).

En esencia el proceso consiste en colocar el mineral en grandes montones o pilas sobre una superficie impermeable. La solución lixivante de cianuro se rocía sobre la pila y fluye a través del lecho de partículas de mineral, extrayendo los valores. La solución rica se envía a la sección de recuperación del metal, de donde se retorna para repetir el proceso, previa reposición de cianuro. En la Figura 1 se muestra el esquema del proceso de lixiviación en pila. El ciclo de lixiviación es de varias semanas y puede extenderse hasta meses. La recuperación de oro puede ser un 20-30% menor que en el proceso tradicional para mineral molido en tanques con agitación en función del mayor grado de accesibilidad a los granos de oro en este último.

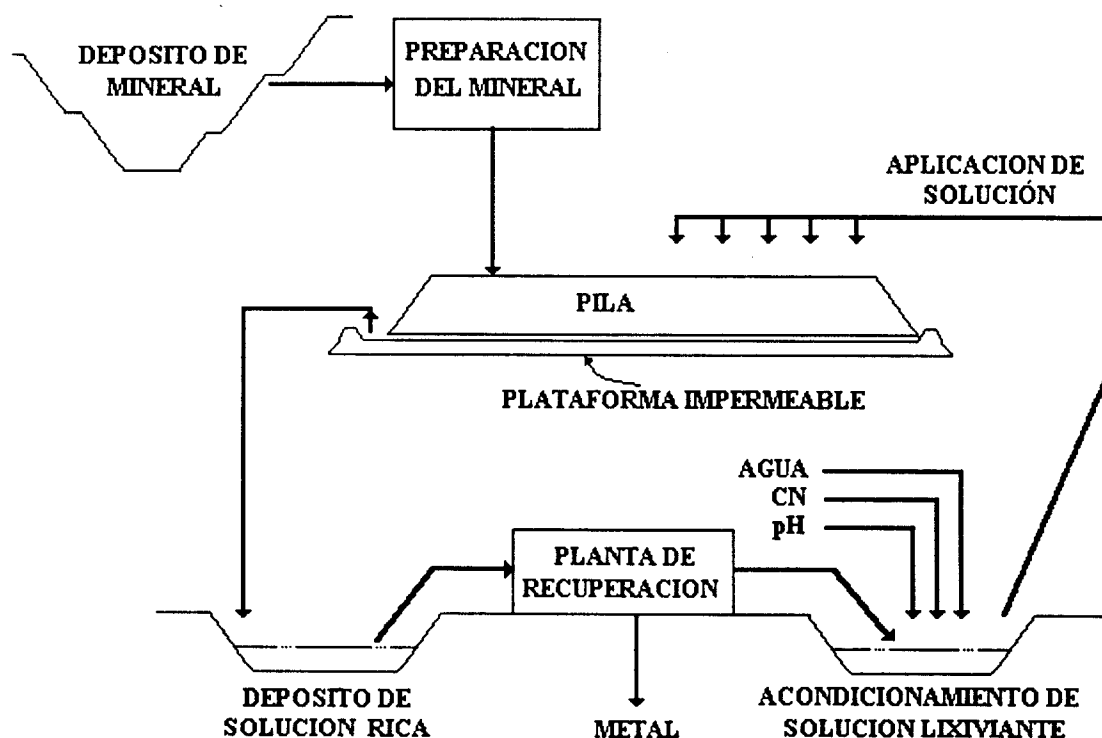


Figura 1.- Esquema del proceso de lixiviación en pila.

Como una opción para resolver los problemas planteados por el diseño y las variables de operación del proceso, surge el desarrollo de modelos que intentan representarlo. El trabajo de Roman (1974), orientado a la lixiviación en pila de piritas cuprosas constituye una referencia valiosa para trabajos posteriores. En relación a la extracción de metales preciosos cabe mencionar los trabajos de Prosser (1988) y Dixon y Hendrix (1993).

El objetivo de Roman (1974) fue desarrollar un modelo que pudiera usarse en el escalamiento de datos de laboratorio y en la simulación de los cambios en las variables de operación del proceso. El modelo se fundamenta en las siguientes consideraciones :

- Es conveniente representar la pila por una columna vertical que tipifica las condiciones de la pila entera.
- Se divide la columna vertical en secciones o capas, una sobre otra. En cada una de estas capas la concentración de reactivo en la solución lixivante así como el avance del frente de reacción en las partículas son uniformes.
- Las partículas de mineral apiladas se suponen esféricas . Se incluye un factor experimental para la corrección de área y volumen de una partícula de mineral en relación a una esfera del mismo radio.
- La difusión del reactivo lixivante en la capa de fluido estancado que rodea a las partículas de mineral no es una etapa limitante en la tasa de extracción de cobre
- La solución lixivante ocupa los poros de las partículas de mineral. El reactivo se difunde a través de esta solución hacia la superficie de reacción, donde se consume de inmediato. De esta forma se establece una frontera o frente de reacción bien definido que delimita una zona interna que no ha reaccionado de otra donde se ha lixiviado totalmente el metal. A este modelo de difusión reacción para la partícula de mineral se le conoce como "nucleo decreciente" introducido por Yagi y Kunii (1955).

Los resultados del modelo se comparan favorablemente con los obtenidos de pilas de lixiviación a nivel laboratorio. Se emplean en el modelo datos experimentales para el valor de la difusividad efectiva en las partículas de mineral y se utiliza como parámetro de ajuste el factor geométrico de área y volumen mencionado para las partículas de mineral.

El modelo de Prosser (1988) pretende la predicción de las consecuencias de cambios en las condiciones en el diseño y la operación de un proceso de lixiviación . Su uso es independiente de datos experimentales a nivel laboratorio y solo requiere de información básica en los aspectos

químico y mineralógico. Las partículas de mineral son esferas de tamaño uniforme en las cuales los granos de oro y otros reactivos están uniformemente distribuidos. Se supone que solamente el 70-80% de los granos de oro situados en los poros y fracturas del mineral son accesibles al agente lixivante en la solución. La solución lixivante fluye hacia abajo verticalmente a una velocidad uniforme sin efectos de dispersión. El interior de la pila se representa por una columna típica la cual se divide en capas en las cuales las condiciones son uniformes. Considera que alrededor del 99% del cianuro se consume por otros reactivos diferentes del oro, por tanto supone que la tasa de extracción de los valores es controlada por la difusión del ión cianuro a través de la solución que ocupa los poros de las partículas de mineral. Establece la posibilidad de tener mas de un elemento reactivo en el mineral y mas de un agente lixivante. Las reacciones que ocurren con velocidades similares se compactan en grupos cohesivos, cada grupo se resuelve como una reacción simple con el modelo de núcleo decreciente.

Aunque los datos para la simulación incluyen el tamaño medio y la porosidad de las partículas así como el contenido de oro y otros agentes reactivos en el mineral, no se incluyen estimaciones experimentales de la difusividad efectiva. El único efecto de transporte que incorpora el modelo es la difusión en condiciones ideales hacia el interior de las partículas porosas de mineral. La comparación de los resultados del modelo con las pilas en operación no es satisfactoria.

Dixon y Hendrix (1993) proponen un modelo en forma adimensional para la lixiviación en pila de uno o mas reactivos sólidos distribuidos en partículas porosas esféricas. El objetivo es la interpretación de datos de lixiviación en pila a nivel laboratorio para su uso en el diseño y escalamiento del proceso. Se propone un proceso simultáneo de difusión-reacción en partículas esféricas de tamaño, densidad y porosidad uniformes. Las reacciones de disolución son irreversibles, de primer orden en relación a la concentración de un agente lixivante y de orden variable en relación a la concentración en la fase sólida de los reactivos. La pila de lixiviación es un reactor transiente de flujo tapón y se supone que no existe resistencia al transporte de masa del seno de la solución lixivante a la frontera externa de las partículas de mineral.

Los autores presentan datos de columnas de lixiviación experimentales para validar el modelo. El mineral usado en estas columnas consiste en pelets preparados con arena, cemento Portland y plata pura pulverizada. Para el ajuste de los datos del modelo con los obtenidos experimentalmente recurren al ajuste del valor del parámetro adimensional w , el cual representa la relación entre el transporte difusivo en el interior de la partícula y el transporte convectivo de la solución lixivante a través del lecho de partículas. Se genera una correlación entre la relación que corrige este parámetro y el número de Reynolds.

La revisión de los trabajos mencionados muestra que presentan algunos aspectos en los cuales la descripción de proceso no es rigurosa. Las expresiones cinéticas que emplean para describir la cianuración de oro son empíricas. En el caso de Dixon and Hendrix (1993), la tasa de extracción es función lineal de la concentración de cianuro en solución y de orden ajustable en relación a la concentración en fase sólida del oro u otros reactivos. En el modelo de Prosser (1988) las reacciones se suponen instantáneas, limitando la tasa de extracción solo a la difusión del cianuro .

El proceso de lixiviación en pila está comprendido en el rango de condiciones de operación que define a los reactores de escurrimiento (trickle bed reactors). El flujo de solución lixivante se establece en un rango en el cual se tienen condiciones insaturadas de flujo en el lecho de partículas de mineral, es decir, la fase líquida ocupa solo una fracción del espacio libre que dejan las partículas del lecho, estableciendo zonas con fluído estancado, corrientes y escurrimientos. En estas condiciones un parámetro importante es el área efectiva de partícula porosa mojada por la solución lixivante. Este parámetro ejerce una influencia significativa en el transporte entre la solución lixivante y el lecho de partículas y en especial en la difusividad efectiva hacia el interior de la partícula porosa. En la recopilación que presentan Gianetto y Specchia (1992) en relación a los reactores de escurrimiento se hace referencia a una línea de investigación que aborda estos aspectos del proceso. En los modelos que se han revisado no se incorporan el enfoque y los resultados obtenidos por estos investigadores .

Planteamiento del modelo

Se plantea el presente trabajo como una primera etapa en la meta de desarrollar un modelo que sustente el escalamiento del proceso de lixiviación a partir de datos de laboratorio y permita marcar las políticas de operación. Se contempla incorporar en la descripción del proceso, el acervo acumulado en la investigación relativa a los reactores de escurrimiento o trickle bed reactors, e incluir una descripción rigurosa de la cinética de la reacción de lixiviación de oro por cianuración tal como la presenta Wadsworth (1991). El modelo debe describir los perfiles de concentración de reactivos y productos en la pila de lixiviación, evaluando los efectos de las diferentes variables del proceso. En el rango de condiciones de operación típicas del proceso es interesante analizar los valores de los parámetros adimensionales generados en el modelo, con la finalidad de lograr una visión global de los aspectos de transporte de masa y reacción involucrados en la lixiviación en pila. En el presente trabajo, el modelo se limita a un tamaño de partícula homogéneo en la pila.

El proceso de lixiviación en pila constituye un reactor heterogéneo de lecho fijo que opera bajo condiciones de flujo no saturado en estado transiente. La solución lixivante se aplica por la parte superior de la pila y escurre a través del lecho constituido por las partículas de mineral. La fracción de espacio que ocupa esta solución se denomina retención externa de líquido en la pila e incluye zonas de fluido semiestancado. En la figura 2 se muestra un detalle de la pila de lixiviación. El contacto efectivo entre la solución lixivante y las partículas que constituyen el lecho no está dado precisamente por el área externa físicamente mojada de las partículas. Esto se debe a que el fluido semiestancado contribuye poco al transporte de masa (Colombo y col., 1976).

Los reactivos presentes en la solución lixivante se difunden hacia el interior de las partículas porosas para reaccionar con los granos de oro metálico (figura 3). Aunque, en la mayoría de los casos, la solución lixivante llena completamente los poros y fracturas del mineral debido a la capilaridad, el proceso de difusión hacia el interior de la partícula resulta afectado por la efectividad de mojado del área externa de dicha partícula, pues las trayectorias de difusión cambian en relación a un mojado externo efectivo total (Colombo y col., 1976). Los productos de reacción se difunden hacia el exterior de la partícula porosa, de donde se incorporan a la solución lixivante.

Un modelo que describa en riguroso detalle las condiciones hidrodinámicas del lecho y el proceso de difusión y reacción para partículas porosas con un área externa parcialmente mojada, amén de otros aspectos, incurre en complejidades difíciles de tratar. Para abordar las dificultades planteadas en la descripción del proceso, el presente modelo considera el enfoque plasmado en la línea de investigación en relación a los reactores de escurrimiento presentado en la recopilación de Gianetto y Specchia (1992). Así, se establecen las siguientes bases:

- La pila opera en condiciones isotérmicas.
- La solución lixivante fluye a una velocidad promedio uniforme dada por el caudal de solución por área de pila y la retención externa de líquido. De acuerdo al criterio de Mears (1971) la dispersión axial es poco significativa para lechos de gran longitud que presenten bajos niveles de conversión, como en el proceso de lixiviación en pila -a pesar de tener bajos flujos-.
- El coeficiente de transferencia de masa entre la solución lixivante y el lecho de partículas de mineral se estima con la correlación de Rao y Drinkenburg (1985) incluida en el Apéndice A.
- Se plantea un modelo simple que considera a las partículas porosas de mineral en completo contacto a través de su área externa con la solución lixivante. La existencia de un área externa parcialmente mojada, la cual define la condición frontera para el proceso de difusión al interior de la partícula, se contempla al definir una difusividad interna aparente (Gianetto y Specchia, 1992). El tratamiento para la evaluación de ésta se incluye en el Apéndice A.
- Se consideran partículas esféricas porosas de tamaño uniforme. La distribución, dimensiones y forma de los granos de oro en el mineral se puede expresar como función del radio de partícula. En este estudio se considera una distribución uniforme de partículas hemiesféricas de oro. Las dimensiones se establecen como un parámetro variable.
- En la partícula de mineral se tiene un proceso simultáneo de difusión y reacción en estado transiente.
- Con la intención de lograr una descripción mas adecuada de la reacción de cianuración de oro, se deriva una expresión cinética a partir de aquellas obtenidas por Wadsworth (1991) para las densidades de corriente para la disolución anódica de oro y la reducción catódica de oxígeno sobre este metal. En el Apéndice A se incluye la discusión para la derivación de una cinética local para condiciones fijas de pH.
- No se considera el consumo de cianuro u oxígeno por reacción con otros componentes del mineral

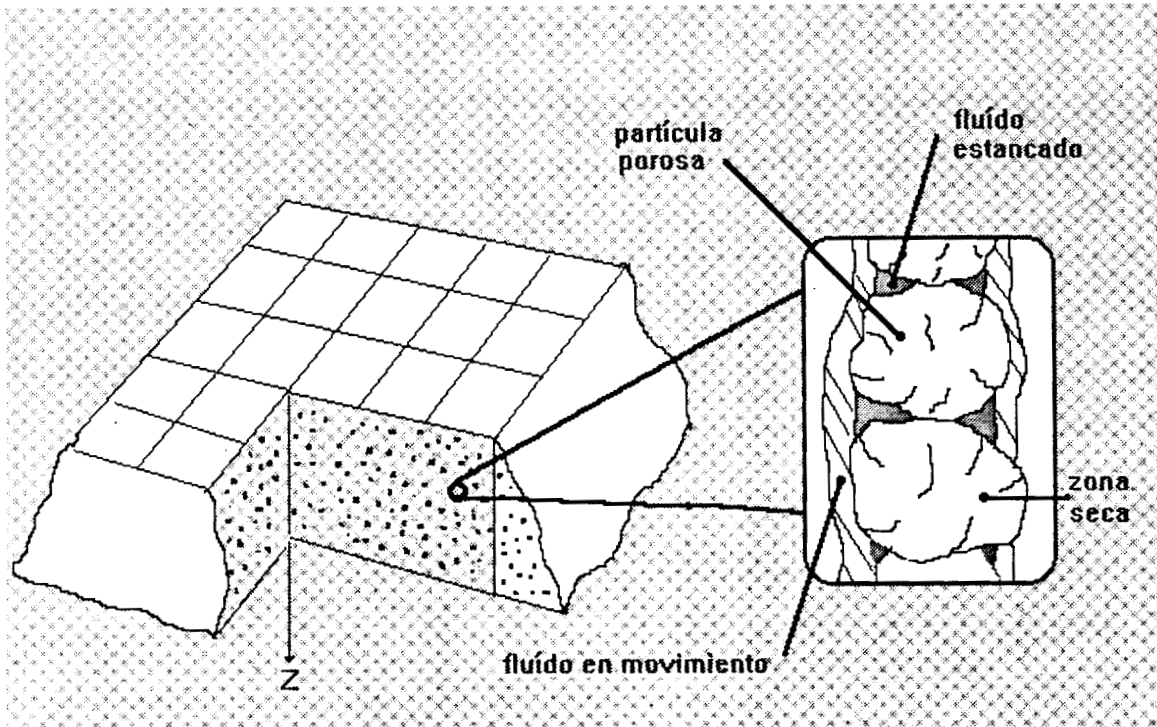


Figura 2.- Detalle de la pila de lixiviación.

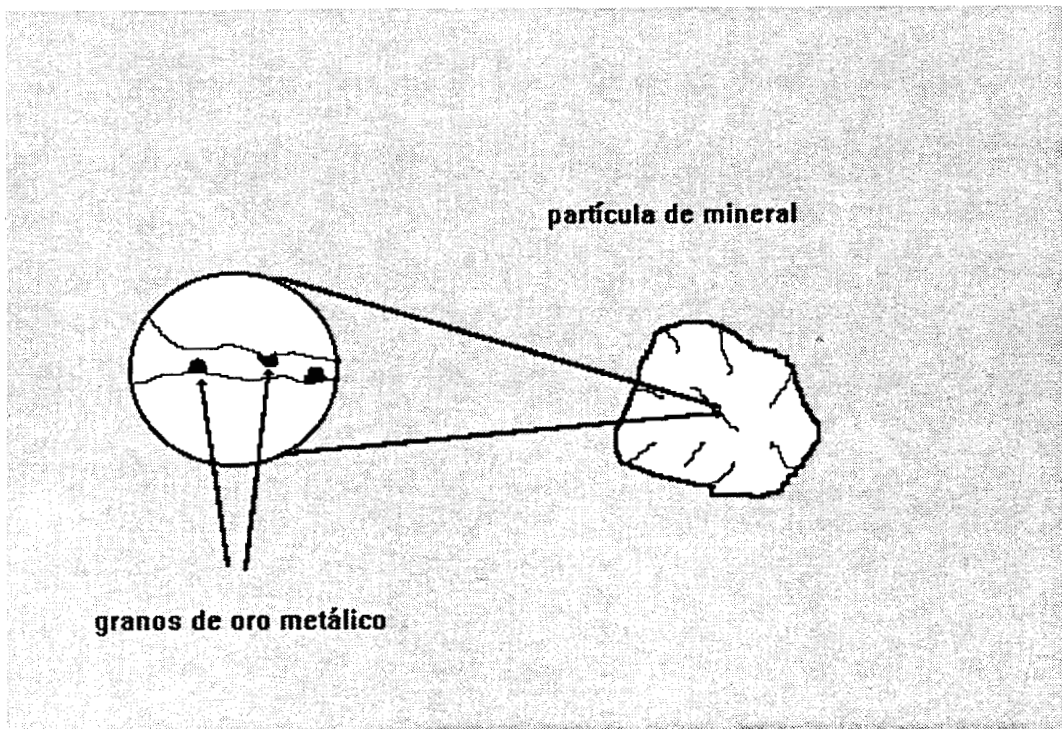


Figura 3.- Depósitos de oro metálico en la partícula de mineral.

- r_p radio de partícula (cm)
 z coordenada de profundidad de pila (cm)
 L profundidad de la pila (cm)
 t tiempo (seg)

La condición inicial define un perfil radial de concentraciones de la especie i -en la solución que ocupa los poros de la partícula de mineral- al inicio del ciclo de operación. Este perfil radial se da para cada posición axial en la pila.

$$\text{para toda } z \quad C_i(r, 0) = C_{i0}(r) \quad (1-a)$$

Las condiciones frontera representan la continuidad del flux de la especie i en la periferia de la partícula de mineral y la condición de simetría en la partícula esférica, respectivamente.

$$(1 - \varepsilon_h) D_{iapp} \frac{\partial C_i}{\partial r}(r_p, t) = \varepsilon_b k_{gi} [C_{ib}(z, t) - C_i(r_p, t)] \quad (1-b)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial r}(0, t) = 0 \quad (1-c)$$

donde:

- C_{ib} concentración de la especie i en la solución lixivante (mol i / cm³ solución)
 ε_h fracción de volumen vacío en el lecho.
 ε_b retención externa de líquido en la pila.
 k_{gi} coeficiente de transporte de masa de la especie i en la película de solución que rodea las partículas (cm / seg)

La ecuación que describe la difusión y reacción en estado transiente en la partícula porosa de mineral se deriva de un balance para una capa esférica de la misma, Bird y col.(1982). Siendo un medio heterogéneo, las concentraciones se interpretan como valores medios de un pequeño entorno del punto considerado.

De acuerdo al método del promedio volumétrico el medio poroso se describe como un medio continuo. La concentración asociada a un punto es la de una muestra tomada en el entorno de ese punto, la dimensión de la muestra es mucho menor que el radio de partícula aunque de mayor orden de magnitud que la dimensión asociada a los poros y fracturas del mineral (Carbonell y Whitaker, 1984).

El efecto de mojado parcial en el área externa de la partícula incide en la condición frontera para el proceso interno de difusión. En el presente trabajo se emplea el enfoque de Gianetto y Specchia (1992) que define una difusividad efectiva aparente, función de la efectividad de mojado (Apéndice A).

Cada uno de los términos de la ecuación expresa un cambio en moles de la especie i por unidad de volumen de lecho de mineral. La expresión se plantea para cada una de las especies en solución: O_2 , CN^- , $Au(CN)_2^-$ y OH^- .

$$\varepsilon_0 \frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{i,app} \left[\frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right] + \rho_p S_g R_i \quad 0 \leq r \leq r_p \quad (1)$$

donde:

$C_i(r,t)$	concentración de la especie i en la solución que ocupa los poros de las partículas de mineral (mol i / cm ³ solución)
$R_i = \alpha_i R$	tasa de reacción de la especie i (mol i /cm ² oro.seg)
α_i	relación estequiométrica (moles i /moles oro)
$R(r,t)$	tasa de reacción local según mecanismo de Wadsworth (mol Au /cm ² oro.seg)
$\rho_p(r,t)$	ley de oro (gramos Au / cm ³ mineral)
$S_g(r,t)$	área específica de granos de oro (cm ² oro/gramo oro)
ε_0	porosidad del mineral
$D_{i,app}$	difusividad efectiva aparente de la especie i , definida en el Apéndice A (cm ² / seg)
r	coordenada radial en la partícula (cm)

En relación a las variables descritas en la ecuación (1) se tienen además las siguientes expresiones.

La expresión cinética que se obtiene de acuerdo a los mecanismos propuestos por Wadsworth (1991) ajustando los datos de Kudryk y Kellogg (1954) para condiciones fijas de pH. Revisar Apéndice A.

$$R(r,t) = [k_1 C_{CN^-}]^\beta [k_2 C_{O_2}]^\gamma / F \quad (1.1)$$

k_1, k_2, β y γ son parámetros cinéticos, los valores se incluyen en la tabla 1.
 $F = 96500$ coul/mol

La tasa de cambio de la concentración de oro en el mineral

$$\frac{d\rho_p}{dt} = M \rho_p S_g R \quad 0 \leq r \leq r_p \quad (1.2)$$

M es el peso molecular del oro y la condición inicial define un perfil radial inicial de concentración de oro en el mineral.

$$\text{para toda } z \quad \rho_p(r,0) = \rho_{p0}(r) \quad (1.2-a)$$

Se define, asimismo un perfil radial inicial para el área específica de los granos de oro:

$$\text{para toda } z \quad S_g(r,0) = S_{g0}(r) \quad (1.3)$$

El área específica de grano de oro se relaciona con la concentración de oro en el mineral. Si se considera que la forma hemiesférica propuesta para los granos de oro no cambia, se tiene

$$S_g = \left[\frac{\rho_{p0}}{\rho_p} \right]^{1/3} S_{g0} \quad (1.3-a)$$

La pila de lixiviación opera en estado transiente, involucra convección axial por el escurrimiento de solución lixivante y se tiene transporte de masa entre esta solución y el lecho de partículas. Se plantea un balance para la especie i en un elemento diferencial de volumen construido a partir de una sección de área de pila y una altura dz (Carberry, 1976), se consideran la tasa de cambio de moles de la especie i , los fluxes de entrada y salida al elemento de volumen y la transferencia de masa entre la solución lixivante y el lecho de partículas expresada en función de un coeficiente de transporte.

Cada uno de los términos de la ecuación expresa un cambio en moles de la especie i por unidad de volumen de pila. La expresión se plantea para cada una de las especies en solución: O_2 , CN^- , $Au(CN)_2^-$ y OH^- .

$$\varepsilon_b \frac{\partial C_{ib}}{\partial t} = -u_s \frac{\partial C_{ib}}{\partial z} - \varepsilon_b k_g a (C_{ib} - C_{is}) \quad 0 \leq z \leq L \quad (2)$$

siendo:

C_{ib} concentración de la especie i en la solución lixivante (mol i / cm³ solución)

C_{is} concentración de la especie i en solución en la superficie del mineral
(mol i / cm³ solución)

u_s caudal de solución por área de pila (cm³ solución / cm² pila seg)

a factor área / volumen de la partícula de mineral (cm² / cm³)

La condición inicial representa la concentración inicial de la especie i en la solución lixivante.

$$C_{ib}(z, 0) = C_{ib0}(z) \quad (2-a)$$

La condición de frontera define la concentración de la especie i en la solución que se aplica en la parte superior de la pila y varía de acuerdo a las políticas de operación.

$$C_{ib}(0, t) = C_i^f(t) \quad (2-b)$$

Solución numérica del modelo

La solución numérica de las ecuaciones del modelo, en forma adimensional, implica para la ecuación (1) que describe la partícula porosa, la discretización del término de difusión radial con colocación ortogonal (Villadsen y Michelsen, 1978) y un Runge Kutta de cuarto orden para el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias resultante. Como alternativa a este método se cuenta con un Euler implícito, aunque en este último caso el término de reacción se maneja en forma explícita.

Para la ecuación (2) que involucra la solución lixivante que escurre en el lecho se plantea un enfoque Lagrangiano (Pantelis y Ritchie, 1991) donde se agrupan los términos transiente y de transporte convectivo para originar una derivada sustancial. La ecuación resultante se discretiza con diferencias finitas.

La adimensionalización y discretización de las ecuaciones, el algoritmo del programa y un análisis del efecto de variantes en parámetros del esquema numérico, tales como el número de puntos de colocación ortogonal y el intervalo de tiempo empleado se incluyen en los apéndices respectivos.

Resultados y Discusión

La solución numérica de las ecuaciones permite describir los perfiles de concentración de reactivos y productos en la pila. Se efectúan balances para estudiar la distribución del oro en el proceso y de esta forma analizar la influencia relativa en el proceso de los mecanismos de reacción y transporte.

Se presenta el análisis detallado de una corrida típica de lixiviación en pila simulada a partir de los datos mostrados en la Tabla I. La información se reunió de diversas fuentes (Apéndice A) y corresponde a condiciones de operación y características del mineral típicas en la práctica de la lixiviación en pila. Se asume que el lecho de partículas está mojado con solución lixivante no aerada antes de iniciar el ciclo de operación, el cual arranca con la dosificación de cianuro. Se incluye una variante de la corrida de referencia en la cual se considera que la solución que moja la pila inicialmente está aerada y su concentración de oxígeno en equilibrio con la atmósfera.

Posteriormente, se evalúa el efecto en las tasas de extracción al efectuar cambios en las características del mineral y en las condiciones de operación del proceso en relación a la corrida típica. En todas las corridas que se presentan se considera que la solución lixivante que abandona la pila se acondiciona antes de recircularse a la misma. La solución se trata para remover el complejo dicianurado de oro, aerarse y ajustar el pH.

Datos para el programa	
Corrida de referencia	
Características del mineral	Difusividades moleculares
$\rho_p = 4e-6$ gr oro / cm^3 de mineral	$D_{CN^-} = 1.75e-5$ cm^2/s
$S_g = 200$ cm^2 / gr oro	$D_{O_2} = 2.2e-5$ cm^2/s
$r_p = 1$ cm	$D_{OH^-} = 2.7e-5$ cm^2/s
$\epsilon_0 = 0.04$	$D_{Au(CN)_2^-} = 0.70e-5$ cm^2/s
Fracciones de espacio	Condiciones de operación
$\epsilon_b = 0.021$	$u_s = 6e-4$ $cm^3/cm^2.s$
$\epsilon_h = 0.39$	$L = 800$ cm
Concentraciones de referencia	
$C_{CN^-}^0 = 2e-6$ mol/ cm^3	Parámetros cinéticos de la reacción
$C_{O_2}^0 = 2.46e-7$ mol/ cm^3	$k_1 = 5.56e6$ amp. cm /mol
$C_{Au(CN)_2^-}^0 = 1e-6$ mol/ cm^3	$k_2 = 25$ amp. cm/mol
$C_{OH^-}^0 = 1e-6$ mol/ cm^3	$\beta = 0.4749$
	$\gamma = 0.5251$
Concentraciones de alimentación	
$C_{CN^-}^f = 2e-6$ mol/ cm^3	
$C_{O_2}^f = 2.46e-7$ mol/ cm^3	
$C_{Au(CN)_2^-}^f = 0$	
$C_{OH^-}^f = 1e-7$ mol/ cm^3	

Tabla I.- Datos para la corrida típica de lixiviación en pila

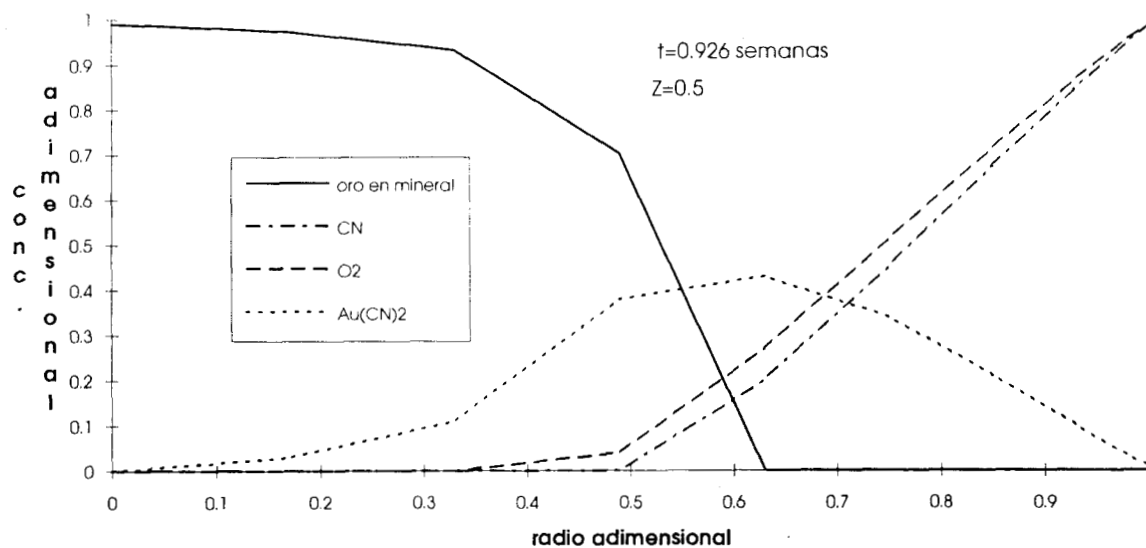


Figura 4.- Perfiles radiales de concentración adimensional en la partícula de mineral para una profundidad adimensional de pila $Z = 0.5$ y un tiempo adimensional de 20 (equivalente a 0.926 semanas). El ciclo de operación de la corrida típica es de alrededor de 7 semanas para una extracción de oro de 88 %.

La Figura 4 presenta las concentraciones de reactivos y productos como función del radio de partícula a una profundidad de pila y para un tiempo dados para la corrida típica.

El número de Thiele, parámetro definido en el Apéndice B, expresa la resistencia al transporte interno de masa en relación a la resistencia que representa la etapa de reacción toma valores altos del orden de 1×10^2 para todas las especies (Apéndice E-3), por lo que la etapa que controla es el transporte interno. El perfil de concentración de oro sin reaccionar en el mineral cae bruscamente en una estrecha zona de reacción, ubicada aproximadamente, en este caso, entre valores del radio adimensional de 0.5 y 0.6. El frente de reacción se puede asociar con un máximo en la concentración del complejo. La penetración del cianuro es ligeramente menor que la del oxígeno, para estas concentraciones de reactivos en función de que el módulo de Thiele de éste es menor, 0.93×10^2 para el oxígeno y 0.10×10^3 para el cianuro.

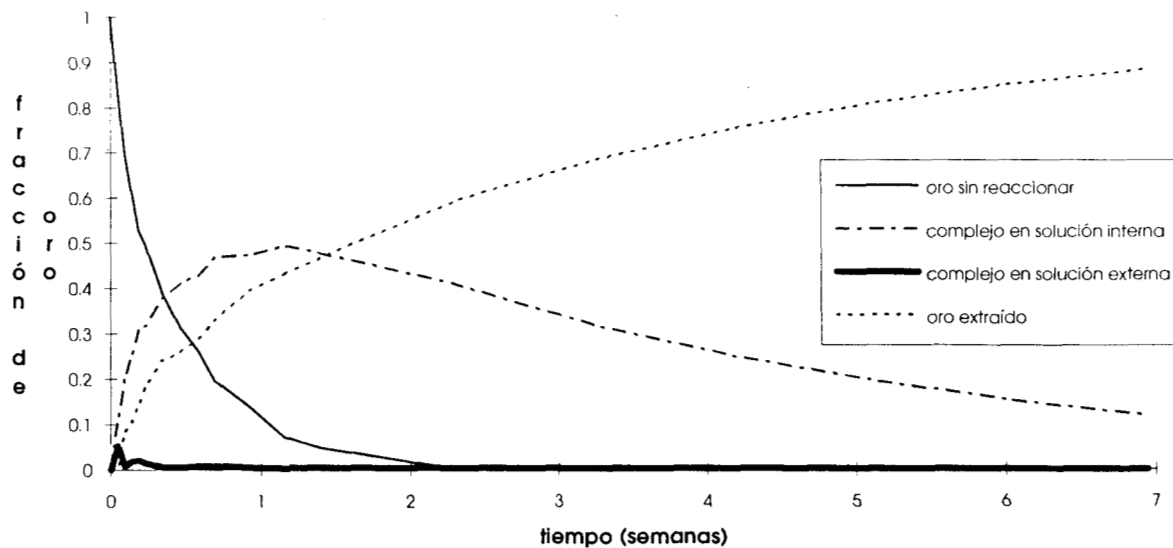


Figura 5.- Distribución del oro en el proceso como función del tiempo.

La Figura 5 permite determinar como reacciona el oro y como se transporta el complejo dicianuro de oro dentro de la pila de lixiviación en función del tiempo para la corrida típica. Al inicio del ciclo de lixiviación la totalidad del oro se encuentra como metal en el mineral. A un tiempo posterior una fracción de ese oro ha reaccionado y se encuentra como complejo en la solución que llena el interior de las partículas, otra fracción está presente como complejo en la solución lixivante que escurre por el lecho y, finalmente tenemos una fracción correspondiente al oro ya extraído del proceso. Esta distribución del oro en el proceso en función del tiempo se ha calculado a partir de balances que surgen de integrar los perfiles radiales de concentración de oro en el mineral y complejo en solución para cada posición axial en la pila, así como integrar el perfil axial de concentración de complejo en la solución lixivante que escurre en el lecho y finalmente evaluar la concentración media, en el tiempo, de la concentración de complejo en la solución que abandona la pila.

Se observa que la reacción ocurre en un lapso corto al inicio del ciclo de la pila, limitada como se mencionó por el transporte interno de masa en función de los valores del módulo de Thiele. El tiempo restante para la extracción depende del transporte, en particular de la difusión del complejo en solución hacia el exterior de las partículas de mineral. El transporte en la película de solución que rodea las partículas y el flujo de solución lixivante no constituyen resistencias apreciables. Esto último se explica en función de los altos valores que alcanzan los parámetros

adimensionales $Bi I_i$ y $Bi II_i$, Biot de masa I y II, que representan la resistencia al transporte interno en la partícula de mineral en relación al transporte externo en la película de solución que la rodea y al transporte debido al flujo de solución lixivante, respectivamente. El orden de estos parámetros está entre 1×10^3 y 1×10^4 (Apéndice E-3).

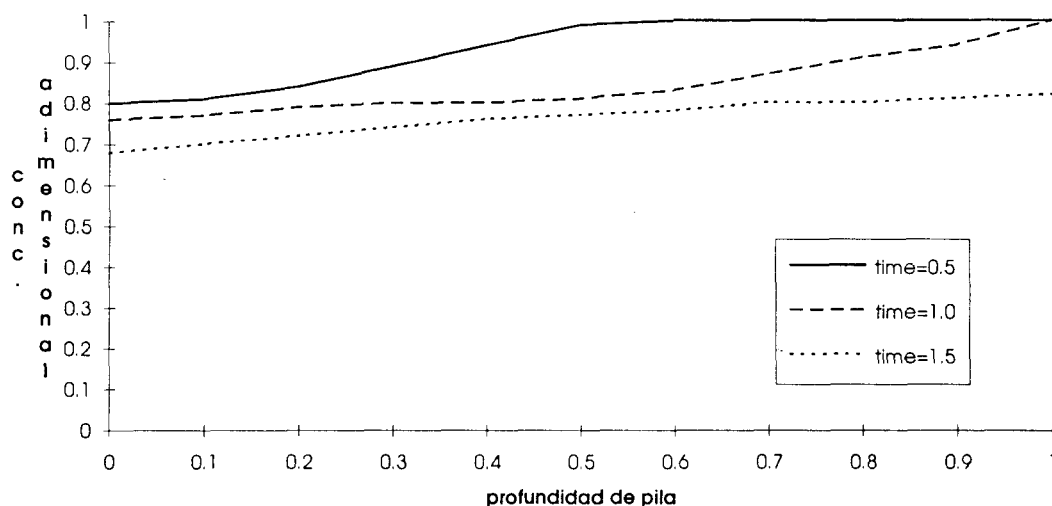


Figura 6.- Concentración de oro en el mineral en función de la profundidad de pila

La concentración adimensional de oro en el mineral se grafica como función de la profundidad de pila a diferentes tiempos, para la corrida típica. Para obtener este valor de concentración para cada posición en la pila se integra el perfil radial correspondiente. El ciclo de lixiviación para la corrida típica consume 150 unidades de tiempo adimensional, equivalentes a aproximadamente 7 semanas. Los perfiles axiales de concentración de oro en el mineral que se presentan, se ubican, por tanto, en el período inicial del proceso.

La curva para el tiempo adimensional 0.5 se ubica en el período de arranque del proceso, cuando el frente de solución lixivante apenas alcanza la parte media de la pila.

En la curva correspondiente al tiempo adimensional 1.0 la solución lixivante ha mojado la pila entera.

Finalmente al tiempo adimensional 1.5 se ha establecido un perfil axial de concentración casi plano, lo cual muestra que el transporte por convección dado por el flujo de solución lixivante no es la etapa limitante. Los valores del $Bi II_i$, ó Biot de masa II, del orden de 1×10^4 confirman lo anterior.

Así, se podría extraer una conclusión falsa: el flujo de solución lixivante no es parámetro importante de operación. Sin embargo, la influencia de este parámetro, especialmente en función de su efecto sobre la efectividad de mojado de las partículas de mineral en el lecho, se muestra mas adelante

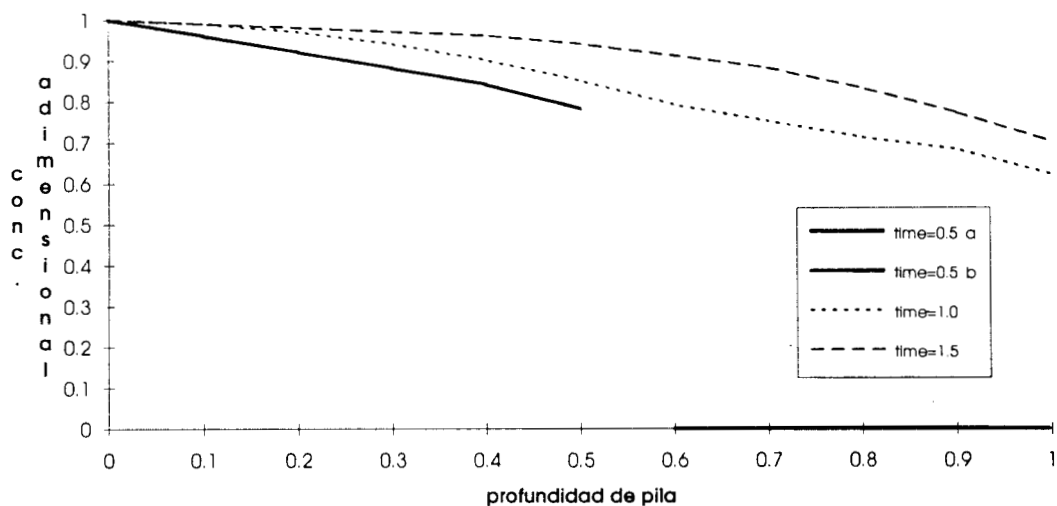


Figura 7.- Concentración de cianuro en la solución lixivante en función de la profundidad de pila

En la Figura 7 se muestra el perfil axial en pila de concentración de cianuro en la solución lixivante a varios tiempos, para la corrida típica.

En el tiempo adimensional 0.5 el frente de solución lixivante apenas alcanza la parte media de la pila. Para tiempos mayores la solución cubre la pila entera y el perfil de concentración es cada vez mas plano. Es claro que el escurrimiento de solución lixivante no es la etapa lenta del proceso. El gradiente axial de concentraciones es apenas notorio en el período de arranque de la pila cuando la solución escurre gradualmente a través de la pila. Es de notar que el período de operación de la corrida típica es de 150 unidades de tiempo adimensional, es decir alrededor de 7 semanas.

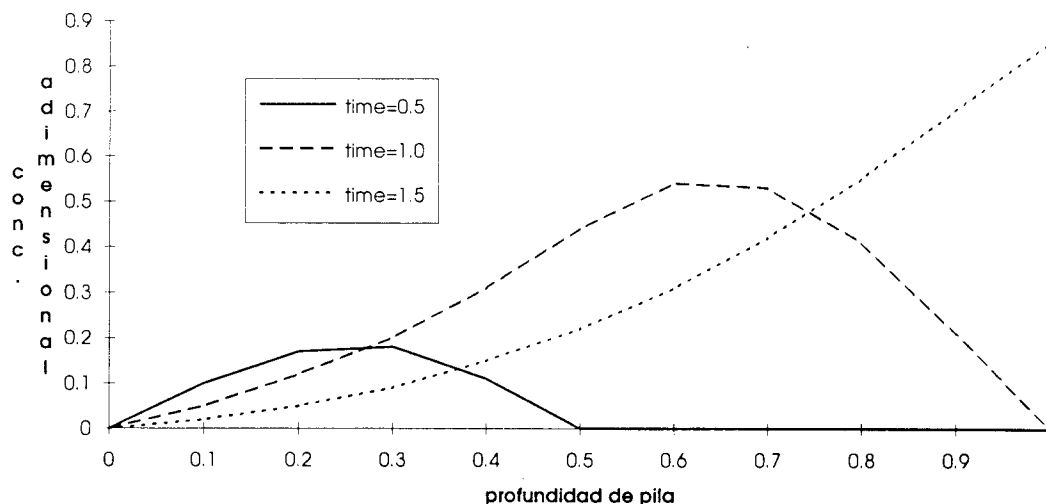


Figura 8.- Concentración de complejo en solución lixiviante en función de la profundidad de pila.

La Figura 8 muestra el perfil axial en pila de concentración de complejo en solución lixiviante a varios tiempos para la corrida típica.

Las curvas tienen características análogas a las mostradas en las Figuras 6 y 7. Se mencionan a continuación algunos aspectos distintivos.

Para tiempos adimensionales de 0.5 y 1.0 cuando el frente de solución lixiviante alcanza la parte media y la totalidad de la pila respectivamente, se observan máximos en la concentración de complejo. Esto es posible, pues no se está representando la trayectoria de una partícula de fluido la cual conservaría o aumentaría la concentración de complejo a partir de un punto de origen. Es interesante notar que para el valor de profundidad adimensional de pila de 0.2, la concentración de complejo disminuye con el tiempo a causa de que la zona de reacción en las partículas de mineral se aleja de la periferia estableciendo un perfil radial por difusión.

La curva para el tiempo 1.5 muestra la tendencia de un perfil creciente de concentración de complejo. Esta tendencia se mantiene para el resto del período de operación.

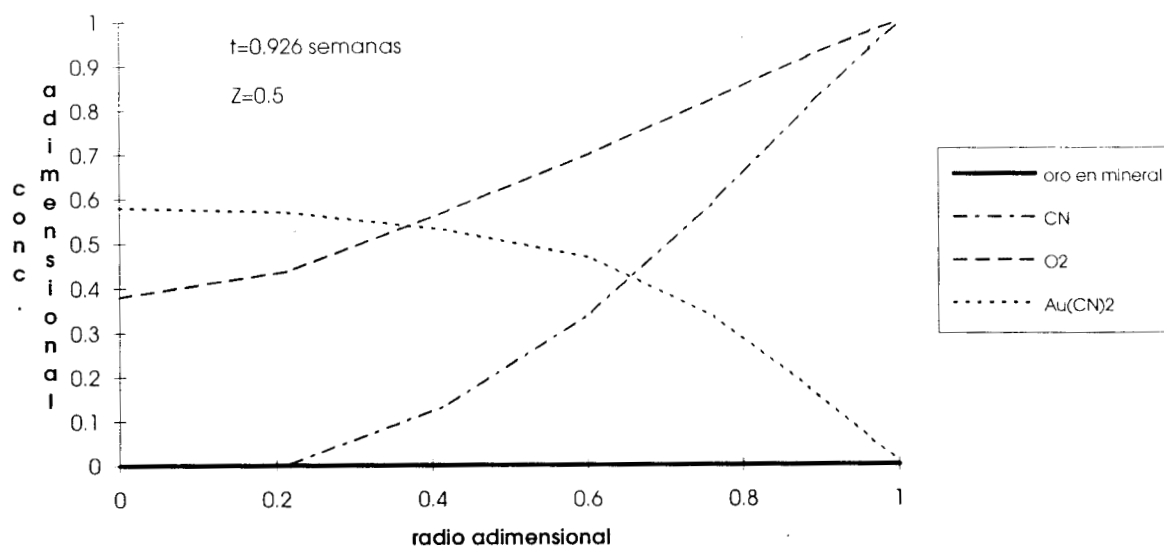


Figura 9.-Perfiles radiales de concentración adimensional en la partícula de mineral para la variante de la corrida típica. Se presenta el caso en el cual la solución que moja inicialmente la pila está saturada de oxígeno

En este caso el oro del mineral ha reaccionado totalmente. Dado que inicialmente se tiene un perfil de oxígeno en la partícula se acelera la etapa de reacción en relación a la referencia. El perfil de oxígeno decrece en la zona del frente de reacción pero no se abate. El perfil de cianuro nos muestra que justo a este tiempo el frente de reacción alcanzó el centro de la partícula de mineral.

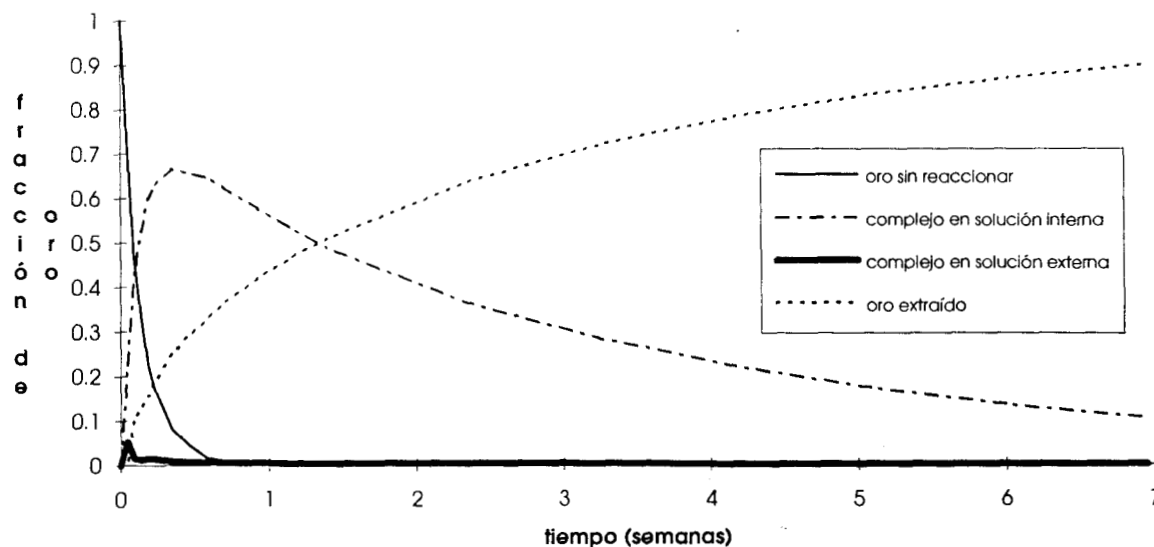


Figura 10.-Distribución del oro en el proceso como función del tiempo. Se presenta la variante de la corrida típica en la cual el oxígeno satura la solución que moja la pila inicialmente.

Se observa que el oro se consume mas rápidamente que en la referencia. Esto se explica en a causa de que el perfil inicial de oxígeno en las partículas de mineral proporciona este reactivo que en el caso de referencia debe difundir desde el exterior de la partícula.

Así, es mas notorio que la etapa limitante es la difusión del complejo soluble de oro al exterior de la partícula, pues la extracción solo aumenta ligeramente. En la Figura 11 se aprecia mas claramente éste último efecto.

A partir de los valores de la corrida típica se variaron uno por uno los parámetros de operación. A continuación se muestran los efectos a estas variaciones sobre la tasa de extracción de oro.

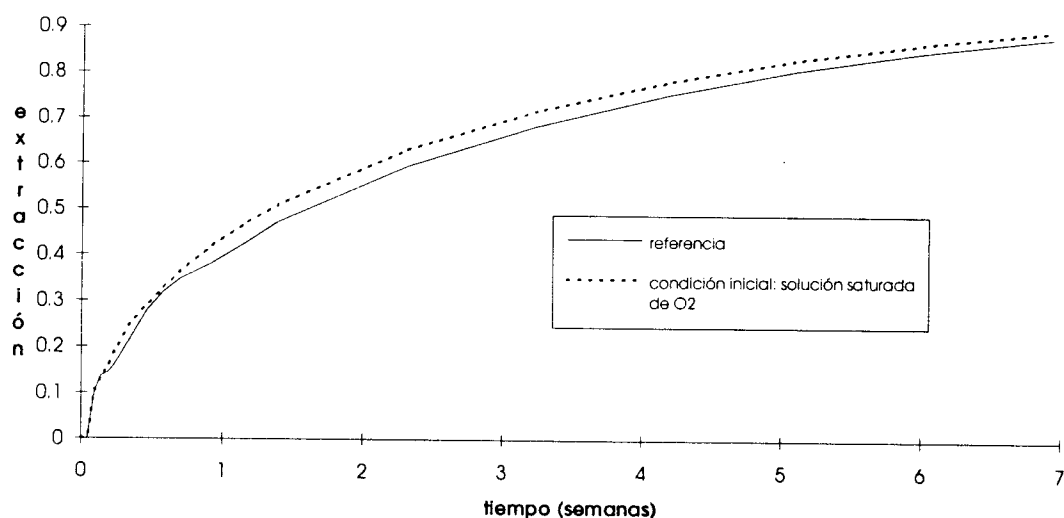


Figura 11.- Efecto de la variante en el perfil inicial de oxígeno en las partículas para la corrida típica. En la referencia no se tiene oxígeno al iniciar el ciclo de operación.

Como se analizó en las figuras 9 y 10 la presencia de un perfil inicial de oxígeno aumenta solo ligeramente la tasa de extracción de oro.

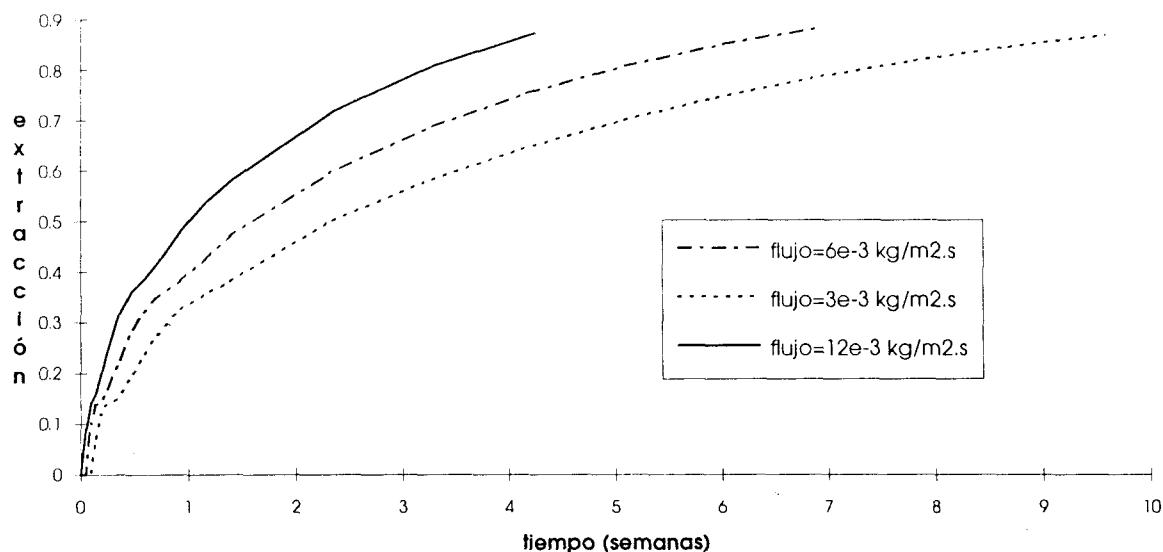


Figura 12.- Efecto del flujo de solución lixivante en la curva de extracción.

El flujo de solución lixivante es una condición de operación que afecta a todos los parámetros de transporte y por tanto, a los grupos adimensionales. Un aumento en el flujo incide directamente en el Biot de masa II, asimismo incrementa el valor del coeficiente de transporte de masa entre la solución lixivante y el lecho y de esta forma aumenta el número de Biot de masa I. Todo lo anterior favorece la extracción de oro aunque de manera poco significativa.

El efecto trascendente se da sobre el parámetro de efectividad de mojado. Este se incrementa con el flujo e incrementa por tanto el valor de la difusividad efectiva aparente, Apéndice A, obteniéndose así una disminución en la resistencia al transporte interno, el cual constituye la etapa limitante del proceso. El efecto de esta situación se plasma en la figura 12 donde se puede observar que una disminución en el flujo en el rango reportado aumenta considerablemente el período de extracción.

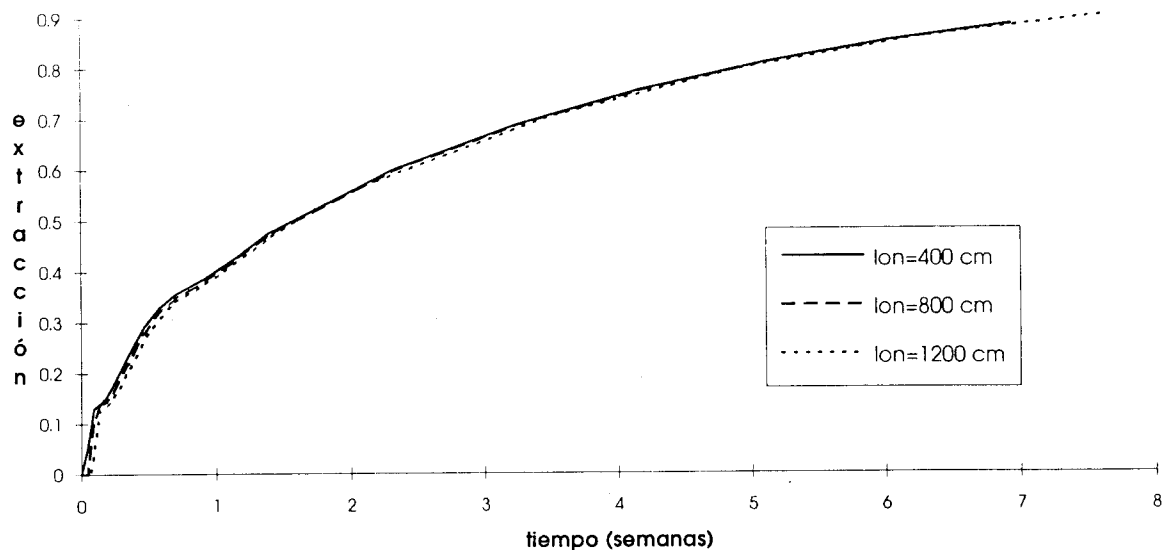


Figura 13.- Efecto de la altura de pila en la curva de extracción.

Las curvas de la Figura 13 muestran que la influencia en la tasa de extracción de la altura de pila es insignificante. Esto se explica en función de que el transporte externo por convección no constituye una resistencia apreciable. Los valores del Biot de masa II son del orden de 1×10^4 . Sin embargo, el presente modelo no considera el efecto de la altura de pila sobre los patrones de flujo, lo cual puede afectar la efectividad de mojado del lecho de partículas.

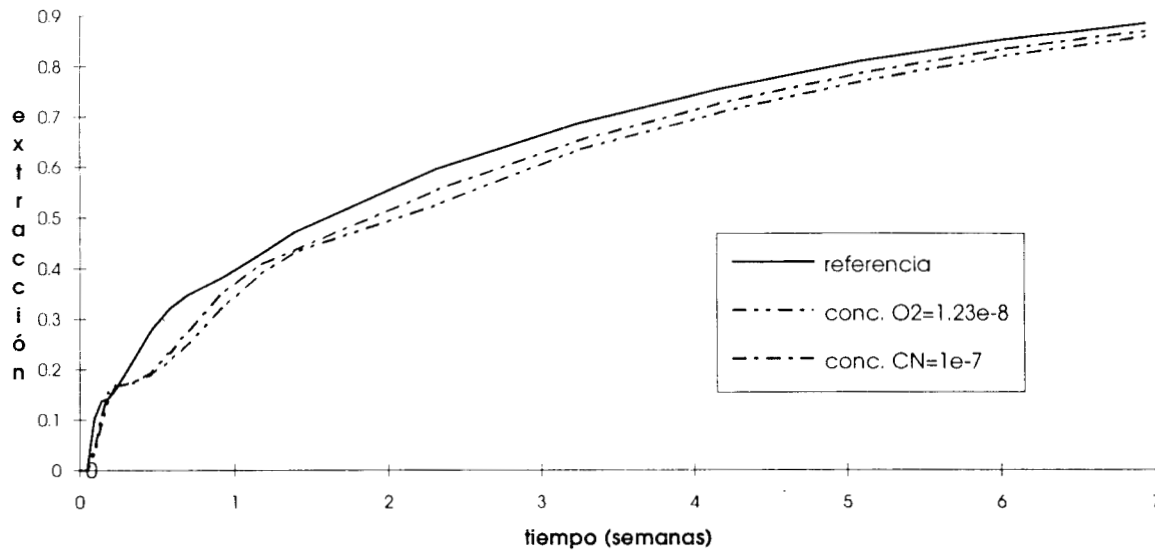


Figura 14.- Efecto de la concentración de reactivos en la extracción de oro.

En la Figura 14 se muestra el efecto del cambio en la concentración de cianuro y de oxígeno en la solución lixivante que se alimenta al proceso. La referencia es la corrida típica.

Se disminuye en una proporción de 20 la concentración de cianuro sin tener cambios significativos en las tasas de extracción. En otra corrida, se disminuye en la misma proporción la concentración de oxígeno, con el mismo resultado. Este efecto puede explicarse en función de dos factores: por un lado, la expresión cinética que define la tasa de reacción es poco sensible al cambio en la concentración (exponentes fraccionarios), y por el otro, el proceso de transporte interno, continua siendo la resistencia mas importante ante cambio que presenta el proceso de reacción.

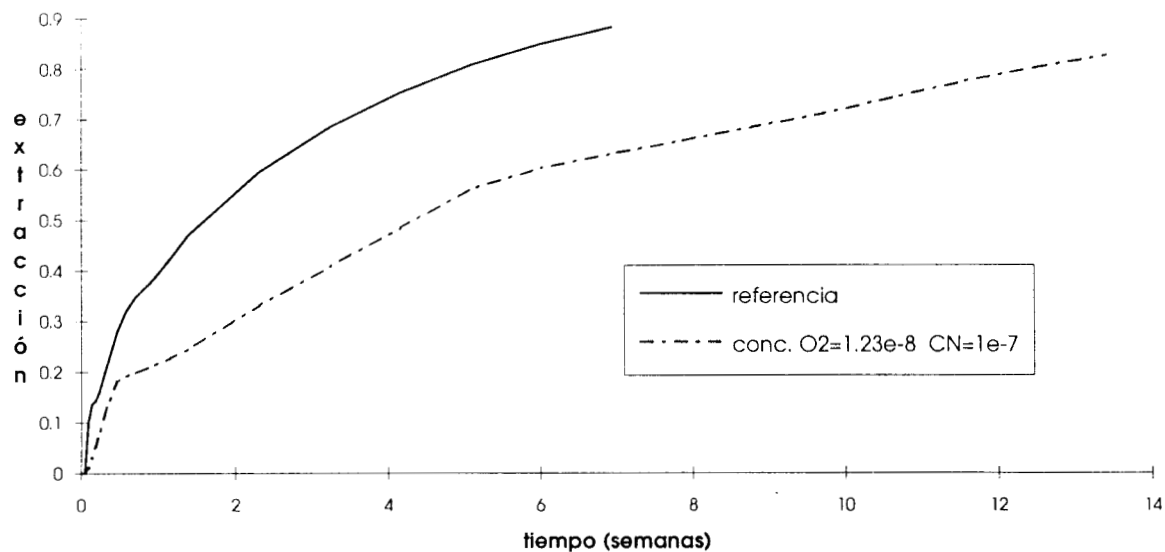


Figura 15.- Efecto de la concentración de reactivos en la extracción de oro.

En la figura 15 se muestra el efecto al disminuir simultáneamente las concentraciones de cianuro y oxígeno en la solución lixiviante en una proporción de 20, cada una. El tiempo para la extracción se duplicó.

La disminución en ambas concentraciones afecta por igual las etapas de transporte interno por difusión que la de reacción aumentando el período de reacción. La relación entre las resistencias que presentan ambas etapas no cambia -el número de Thiele para el cianuro y el oxígeno no se modifica en relación a la corrida típica-. El efecto mostrado puede presentarse en pilas en operación en las cuales se tenga consumo de reactivos por reacciones secundarias.

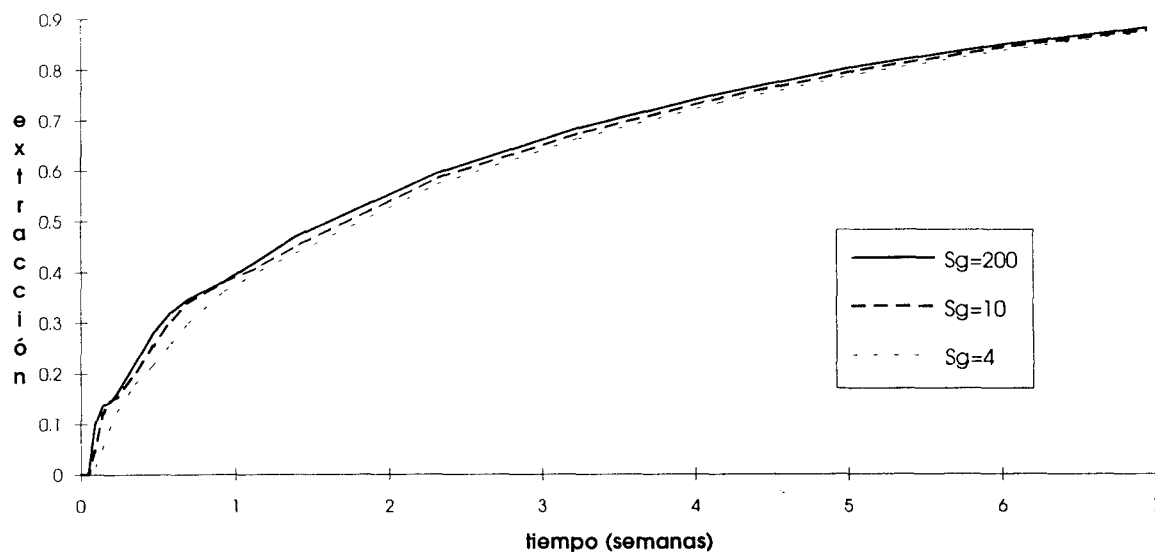


Figura 16.- Efecto del área específica de oro en el mineral en la extracción

En la Figura 16 se muestra el efecto del cambio en el área específica de oro en el mineral. Este parámetro está asociado con las dimensiones de los granos de oro presentes en el mineral y su exposición a la solución lixivante. La gráfica muestra que aún con la disminución que se presenta en la tasa de reacción, el mecanismo de transporte por difusión en la partícula continúa siendo el más lento, por lo cual el efecto en la curva de extracción es poco significativo, y hacia el final del período de extracción tiende a anularse. El valor del número de Thiele disminuye con S_g , aunque permanece todavía del orden de 10 para el valor de área específica igual a $4 \text{ cm}^2/\text{g}$ oro.

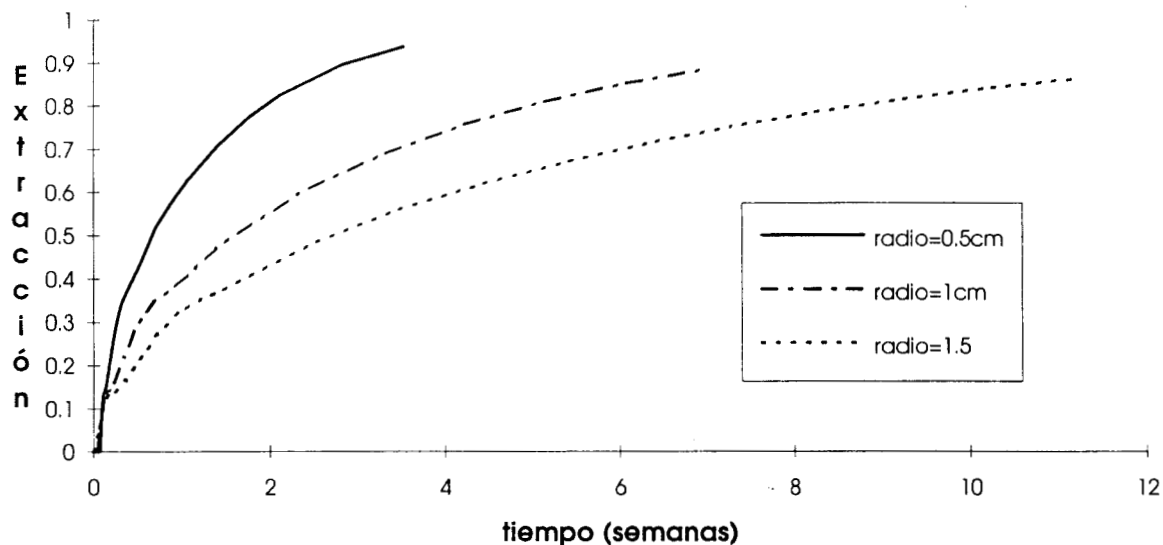


Figura 17.- Efecto del radio de partícula en la curva de extracción de oro.

Las curvas de la Figura 17 presentan el importante efecto del radio de partícula. El radio de partícula tiene efecto en el número de Reynolds definido para el flujo de solución lixivante a través del lecho, por lo que influye en factores tales como la retención de líquido en la pila, el coeficiente de transferencia de masa entre la solución lixivante y el lecho y la efectividad de mojado de partícula (Apéndice A). Sin embargo, su efecto más significativo se da en el transporte interno por difusión en la partícula. El aumento del radio, aumenta la resistencia al transporte interno. Resulta explicable que en la práctica es aconsejable triturar el mineral hasta diámetros de alrededor de dos centímetros en las pilas de lixiviación a gran escala. La reducción de tamaños es solo limitada por los problemas de taponamiento y canalización del flujo de solución lixivante.

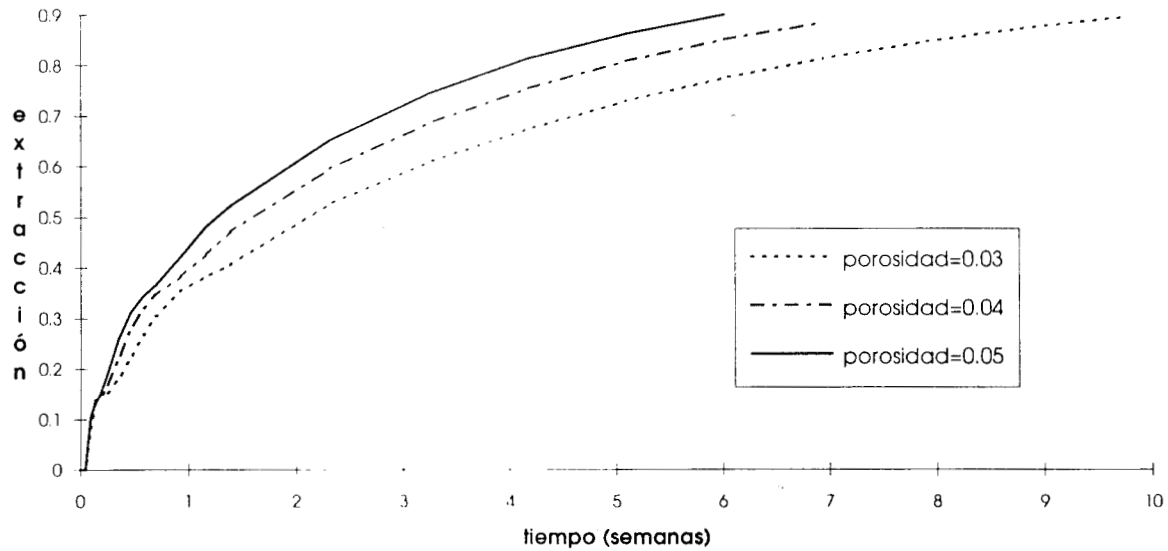


Figura 18.- Efecto de la porosidad del mineral en la curva de extracción de oro.

El efecto de la porosidad del mineral se observa en la Figura 18. La disminución en este parámetro aumenta la resistencia al transporte interno de masa, es decir la difusión efectiva de reactivos y productos en el interior de la partícula, por lo cual los ciclos de tiempo para extracción aumentan considerablemente.

Bartlett (1991) reporta un rango de porosidad típica para el mineral que se procesa en lixiviación en pila, de 0.02 a 0.08.

Conclusiones

La importancia del presente trabajo consiste en la determinación de los fenómenos controlantes en el proceso de lixiviación en pila de menas de oro, en el rango de condiciones de operación reales.

Se describe el proceso de lixiviación en pila, incorporando el enfoque y los resultados de la investigación en reactores de escurrimiento o trickle bed reactors, en especial al considerar los efectos de la efectividad de contacto entre la solución lixivante y las partículas de mineral. Se plantea un modelo simple que considera a las partículas porosas de mineral en completo contacto a través de su área externa con la solución lixivante. La existencia de un área externa parcialmente mojada se contempla al considerar una difusividad interna aparente, la cual se estima en función de la efectividad de contacto. Se emplea una expresión cinética basada en un estudio fundamental reportado en la literatura, para describir la reacción de cianuración de oro.

La solución numérica de las ecuaciones del modelo permite describir los perfiles de concentración de reactivos y productos en la pila de lixiviación. A partir de estos perfiles se efectúan balances que muestran como reacciona y se transporta el oro hasta salir de la pila de lixiviación. El estudio de la distribución de oro en el proceso como función del tiempo a partir de los balances mencionados, permite la posibilidad de implementar políticas dinámicas de operación en aspectos tales como la concentración de alimentación de reactivos y en la eficiencia del ciclo de enjuague de la pila de lixiviación, el cual tiene como finalidad eliminar el cianuro remanente en el mineral al término del ciclo de operación.

Se evalúa el efecto, en la tasa de extracción de oro, de parámetros tales como la porosidad y el radio de partícula, el flujo de solución lixivante, el área específica del oro en el mineral, la concentración de reactivos y la altura de pila.

Los resultados obtenidos muestran que la etapa que controla la tasa de extracción es la difusión de reactivos y productos en el interior de las partículas de mineral. Por tanto, adquieren especial importancia parámetros como el radio de partícula, la porosidad del mineral y el flujo de solución lixivante.

La estructura del modelo permite incorporar expresiones cinéticas para describir el consumo de cianuro y oxígeno por reacción con otros componentes del mineral.

Bibliografía

Alvarez-Ramirez, J, Nieves, S. y González, J., 1995, "Calculation of the effective diffusivity of heterogeneous media using Lattice-Boltzmann method", submitted to Physical Review E

Bird, R.B., Stewart W.E. y Lightfoot, E.N., 1982, "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, Inc., New York.

Bartlett, R.W., 1992, "Simulation of ore heap leaching using deterministic models", Hydrometallurgy, **29**, 231-260.

Carberry, J.J., 1976, "Chemical and Catalytic Reaction Engineering", McGraw-Hill Book Company.

Carbonell, R.G. y Whitaker, S. 1984, "Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media", edited by J. Bear and M. Y. Corapcioglu, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 129-198.

Colombo A.J., Baldi G. y Sicardi S., 1976, "Solid-liquid contacting effectiveness in trickle bed reactors", Chemical Engineering Science, **31**, 1101-1108.

Dixon, D.G., y Hendrix, J.L., 1993, "A mathematical model for heap leaching of one or more solid reactants from porous ore pellets", Metallurgical Transactions B, **24B**, 1087-1102.

Fleming, C.A., 1992, "Hydrometallurgy of precious metals recovery", Hydrometallurgy, **30**, 127-162.

Gasparri, C., 1983, "The mineralogy of gold and its significance in metal extraction", Canadian Institute of Mining Bulletin, **76**, 144-153.

Geankoplis, C.J., 1972, "Mass Transport Phenomena", Holt, Rinehart y Winston, Inc., New York, Cap. 3.

Giannetto, A. y Specchia, V., 1992, "Trickle Bed Reactors: State of Art and Perspectives", Chemical Engineering Science, **47**(13-14), 3197-3213.

Habashi, F., 1992, "A Textbook of Hydrometallurgy", Metallurgie Extractive Québec, Enr. Québec, Canada.

Haque K.E., 1992, "The role of oxygen in cyanide leaching of gold ore", Canadian Institute of Mining Bulletin, **85**, 31-38.

- Kameda, M., 1949, "Fundamentals studies on dissolution of gold in cyanide solutions: III. Effects of alkalis, lead acetate and some impurities contained in fowl cyanide solutions", Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ., Ser. A, **1**, 435-444.
- Kudryk, V. y Kellogg, H.H., 1954, "Mechanism and Rate-Controlling Factor in the Disolution of Gold in Cyanide Solutions", J.Metals, **6**, 541-548.
- Mears, D.E., 1971, "The Role of Axial Dispersion in Trickle-flow Laboratory Reactors", Chemical Engineering Science, **26**, 1361.
- Pantelis, G., y Ritchie, A.I.M., 1991, "Macroscopic transport mechanisms as a rate-limiting factor in dump leaching of pyritic ores", Appl. Math. modelling, **15**, 136-143.
- Perry, R.H. y Green D., 1984, "Perry's Chemical Engineers Handbook" sixth edition, eds.R.H. Perry, D.W. Green y J. O. Maloney. Mc Graw Hill Book Company.
- Prosser, A.P., 1988, "Simulation of gold heap leaching as an aid to process development", Precious Metal '89. eds M.C: Jha and S.D. Hill . TMS, Warrendale, PA, 1988, 121-135
- Rao V.G. y Drinkenburg A.A.H., 1985, "Solid-Liquid Mass Transfer in Packed Beds with Cocurrent Gas-Liquid Downflow", AIChE Journal , **31**, 1059-1068.
- Roman, R.J., Benner, B.R. y Becker, G.W., 1974, "Diffusion Model for Heap Leaching and its Application to Scale-Up", AIChE Transactions, **256**, 247-252.
- Satterfield Charles N., 1970, "Mass Transfer in Heterogeneous Catalysis", The Massachusetts Institute of Technology Press.
- Satterfield, Ch.N., 1975, "Trickle-Bed Reactors", AIChE Journal, **21**, No. 2, 209-228.
- Schmid, G.N. y Curley-Fiorino, M.E., 1975, "Gold", Encyclopedia of Electrochemistry of the Elements, Vol. IV, Ed. A.J. Bard, Marcel Dekkee, Inc. New York, Cap. IV-3.
- Specchia V. y Baldi G. , 1977, "Pressure Drop and Liquid Holup for two phase concurrent flow in Packed Beds", Chemical Engineering Science, **32**, 515-523.
- Villadsen, J.,y Michelsen, M.L., 1978, Solution of differential equation models by polinomial aproximation, Prentice Hall, Inc., Inglewood, California
- Wadsworth , M.E., 1991, "Rate processes in the leaching of gold and other metals forming stable complexes", Proceedings of the H.H. Kellog International Symposium.Quantitative Description of Metal Extraction Processes. TMS Warrendale,PA . 197-216.

Wammes W.J.A., Mechielsen S.J. y Westerterp K.R., 1991, "The Influence of Pressure on the Liquid Hold-Up in a Cocurrent Gas-Liquid Trickle-Bed Reactor Operating at Low Gas Velocities", Chemical Engineering Science, **46**, 409-417.

Wakao, N., y Smith J.M., 1962, Chemical Engineering Science, **17**, 825.

Yagi, S. y Kunii, D., 1955, "Studies on combustion of Carbon Particles in Flames and Fluidized Beds", 5th International Symposium on Combustion, Reinhold, New York, 231-244.

Zyl, D.V., Hutchison, I., y Kiel J.E., 1988, Introduction to evaluation, design, operation of precious Metal Heap Leaching Projects, Society of Mining Engineers, Inc., Littleton, Colorado.

Nomenclatura

a.-Ecuaciones del Modelo

$C_i(r, t)$	concentración de la especie i en la solución que ocupa los poros de las partículas de mineral (mol i / cm ³ solución)
$C_{ib}(z, t)$	concentración de la especie i en la solución lixivante (mol i / cm ³ solución)
$C_{is}(z, t)$	concentración de la especie i en solución en la superficie del mineral (mol i / cm ³ solución)
$R_i = \alpha_i R$	tasa de reacción de la especie i (mol i /seg cm ²)
α_i	relación estequiométrica (moles i /moles oro)
$R(r, t)$	tasa de reacción local de acuerdo al mecanismo de Wadsworth (mol Au /seg cm ²)
$\rho_p(r, t)$	ley de oro (gramos Au / cm ³ mineral)
$S_g(r, t)$	área específica de granos de oro (cm ² /gramo Au)
ϵ_o	porosidad del mineral
ϵ_h	fracción de volumen vacío en el lecho.
ϵ_b	retención externa de líquido en la pila.
r	coordenada radial en la partícula (cm)
r_p	radio de partícula (cm)
z	coordenada de profundidad de pila (cm)
L	profundidad de la pila (cm)
u_s	caudal de solución por área de pila (cm ³ solución / cm ² pila seg)
a	factor área / volumen de la partícula de mineral (cm ² / cm ³)
t	tiempo (seg)
D_{iapp}	difusividad efectiva aparente de la especie i , definida en el Apéndice A (cm ² / seg)
k_{gi}	coeficiente de transporte de masa de la especie i en la película de solución que rodea las partículas (cm / seg)
M	es el peso molecular del oro.

$C_i(r, 0) = C_{i0}(r)$ La condición inicial define un perfil radial de concentraciones de la especie i -en la solución que ocupa los poros de la partícula de mineral- al inicio del ciclo de operación. Se define para toda z .

$\rho_p(r, 0) = \rho_{p0}(r)$ perfil radial inicial de concentración de oro en el mineral, para toda z .

$C_{ib}(z, 0) = C_{ib0}(z)$ La condición inicial representa la concentración inicial de la especie i en la solución lixivante.

$C_{ib}(0, t) = C_i^f(t)$ La condición de frontera define la concentración de la especie i en la solución que se aplica en la parte superior de la pila y varía de acuerdo a las políticas de operación.

f_w efectividad de mojado de la partícula de mineral

D_e es la difusividad efectiva para una partícula completamente mojada

D_{app} la difusividad aparente intrapartícula para un mojado parcial

$Re_L = \frac{L d_p}{\mu_L}$ número de Reynolds definido para el flujo de solución lixivante.

L flujo másico superficial de líquido $kg / m^2.s$

d_p diámetro de partícula m

μ_L viscosidad del líquido $kg / m.s$

La expresión cinética que se obtiene de acuerdo a los mecanismos propuestos por Wadsworth (1991) ajustando los datos de Kudryk y Kellogg (1954) para condiciones fijas de pH.

$$R(r, t) = [k_1 C_{CN^-}]^\beta [k_2 C_{O_2}]^\gamma / F \quad (1.1)$$

k_1, k_2, β y γ son parámetros cinéticos.

$F = 96500 \text{ coul/mol}$

b.-Variables y parámetros dimensionales.

$x = r/r_p$	coordenada radial adimensional
$Z = z/L$	coordenada de profundidad de pila adimensional
$y_i = C_i/C_i^0$	concentración adimensional de la especie i en la solución que ocupa los poros en las partículas de mineral.
$y_{ib} = C_{ib}/C_i^0$	concentración adimensional de la especie i en la solución lixiviante
$S_g^* = S_g/S_g^0$	área específica de oro adimensional
$\rho_p^* = \rho_p/\rho_p^0$	ley de oro adimensional
$\theta = D_0 t/r_p^2$	tiempo adimensional

C_i^0	concentración de referencia de la especie i (mol/cm ³).
ρ_p^0	ley de mineral de referencia (gramos Au/cm ³ de mineral).
S_g^0	área específica de oro de referencia (cm ² /gramo Au).
D_0	difusividad de referencia (cm ² /s).

$$\phi_i^2 = \frac{r_p^2 \rho_p^0 S_g^0 \alpha_i R^0}{C_i^0 D_{iapp}} \quad \text{módulo de Thiele, } \phi_i, \text{ para la especie i.}$$

$$R^0 = [k_1 C_{CN^-}^0]^\beta [k_2 C_{O_2}^0]^\gamma / F \quad \text{tasa de reacción de referencia.}$$

$$\phi_{Au}^2 = \frac{M r_p^2 S_g^0 R^0}{D_o}$$

$$Bi I_i = \frac{k_{gi} r_p}{D_{iapp}} \quad \text{Biot de masa I para la especie i.}$$

$$Bi II_i = \frac{r_p^2 u_s}{D_{iapp} L} \quad \text{Biot de masa II para la especie i.}$$

c.-Nomenclatura empleada en archivos del programa reportados en Apéndices.

c.1.-Condiciones iniciales

RHO₀(IK,I) perfil radial para cada posición en la pila de la concentración de oro en el mineral

SGA₀(IK,I) perfil radial para cada posición en la pila del área específica de granos de oro

y_{i0}(IK,I) perfil radial para cada posición en la pila de la concentración de la especie i en solución

BULK_{i0}(IK) concentración de la especie i en la solución lixivante

c.2.- Perfiles radiales de concentración de la corrida típica.

time tiempo adimensional θ

prof ó PROF(IK) profundidad de pila adimensional Z

conv ó CONV(IK) conversión media en el mineral para posición definida por θ y Z.

c4ik concentración media del complejo $Au(CN)_2^-$ para posición definida por θ y Z

rad posición radial adimensional x

rho ley de mineral adimensional $\rho_p^*(x, \theta)$

CN concentración adimensional de cianuro $y_{CN^-}(x, \theta)$

O2 concentración adimensional de oxígeno $y_{O_2}(x, \theta)$

OH concentración adimensional de oxidrilo $y_{OH^-}(x, \theta)$

Co concentración adimensional de complejo $y_{Au(CN)_2^-}(x, \theta)$

c.3.-Balances globales

SEMS tiempo en semanas.

UNRA fracción de oro sin reaccionar en el mineral.

DENA fracción de oro como $Au(CN)_2^-$ en la solución del interior de las partículas.

OUTA fracción de oro como $Au(CN)_2^-$ en la solución lixivante que escurre en el lecho.

EXTR fracción de oro extraído del proceso.

Apéndice A

Parámetros empleados en el modelo.

Una de las tareas más importantes al realizar la simulación de lixiviación en pila es determinar los valores más representativos de los parámetros de operación. A continuación se justifican las cantidades empleadas en el programa.

1.- Flujo de solución lixivante

En la mayoría de las pilas de lixiviación de menas de oro se emplean flujos entre 0.001 y 0.006 lt/seg.m². (Zyl y col., 1988, pag. 97).

2.- Tamaño de la partícula de mineral

Es una práctica común en la industria triturar el mineral hasta un diámetro de alrededor de 20 mm para obtener un grado aceptable de extracción de oro en unas cuantas semanas de lixiviación en pila (Bartlett, 1991).

3.- Fracciones de espacio

3.1.- Porosidad de la partícula de mineral, ϵ_0

La porosidad típica del mineral está en el rango de 0.02 a 0.08. (Bartlett, 1991).

3.2.- Fracción de volumen vacío en el lecho, ϵ_h

Es la fracción de espacio que dejan las partículas de mineral en el lecho. Se consideran partículas esféricas

$$\epsilon_h = 0.39 \quad (\text{Dixon y Hendrix, 1993})$$

$$\epsilon_h = 0.40 \quad (\text{Satterfield, 1975})$$

3.3.- La retención externa de líquido en la pila, ϵ_b

La retención externa de líquido o hold up externo es la fracción de espacio que ocupa la solución lixivante que escurre a través del lecho de partículas de mineral. Se divide en (a) la retención externa de libre drenado o dinámica y (b) la retención externa residual o estática. La retención residual varía típicamente de cerca de 0.02 a 0.05. La retención de libre drenado es una función de los flujos de líquido y gas, las propiedades del fluido y las características de las partículas (Satterfield, 1975).

3.3.a.- Estimación de la retención externa estática de líquido

El hold up externo estático es función del número de Eötvos (Wammes y col., 1991). En esta referencia se presenta una gráfica del Hold up en función del número de Eötvos.

$$Eo = \rho_L g d_p^2 / \sigma_L$$

Eo número de Eötvos

ρ_L densidad del líquido kg/m^3

d_p diámetro de partícula m

σ_L tensión superficial gas líquido N/m^2 .

g aceleración de la gravedad m^2/s

3.3.b- Estimación de la retención externa dinámica de líquido

Se emplea la correlación de Spechia y Baldi (1977)

$$\beta_d = 3.86 \text{Re}^{0.545} \text{Ga}_L^{-0.42} \left[\frac{a_v}{\epsilon} D_p \right]^{0.65}$$

donde:

$$\text{Re}_L = \frac{v_L \rho_L D_p}{\mu_L}$$

$$Ga_L = \frac{D_p^3 \rho_L^2 g}{\mu_L^2}$$

- D_p diámetro nominal de partícula m
 ρ_L densidad del líquido kg/m³
 μ_L viscosidad del líquido kg/m.s
 v_L velocidad superficial del líquido m/s
 g aceleración de la gravedad 9.81 m/s²
 ε fracción de espacio vacío en el lecho
 a_v área de lecho por unidad de volumen de columna m⁻¹

4.- Estimación del coeficiente de transferencia de masa entre la solución lixiviante y el lecho de partículas del mineral.

Gianetto y Specchia (1992) presentan una figura con datos experimentales de varios autores. Entre estos los de Rao y Drinkenburg (1985) quienes reportan la siguiente correlación.

$$Sh \frac{\phi Sh'}{Sc^{2/3}} = 0.24 (Re'_L)^{0.75}$$

donde:

$$Re'_L = \frac{L d'_p}{h_t \mu_L}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D}$$

$$Sh' = \frac{k_s d'_p}{D}$$

- L velocidad másica superficial de líquido kg/m².s
 d'_p diámetro equivalente de partícula m
 h_t hold up externo del líquido $h_t = \beta_1 + \beta_2$

- β_s hold up estático del líquido volumen de líquido por unidad de volumen vacío en el lecho
 β_d hold up dinámico del líquido volumen de líquido por unidad de volumen vacío en el lecho
 μ_L viscosidad de líquido kg/m s
 ρ densidad de líquido kg/m³
 D difusividad molecular m²/s
 ϕ fracción de área externa mojada de partícula

5.- Valores para la difusividad molecular

$$D_{CN^-} = 1.75 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (\text{Wadsworth, 1991})$$

$$D_{O_2} = 2.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (\text{Wadsworth, 1991})$$

$$D_{O_2} (25^\circ \text{C}) = 2.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (\text{Perry y Green, 1984})$$

$$D_{OH^-} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (\text{Geankoplis, 1972})$$

$$D_{Au(CN)_2^-} (60^\circ \text{C}) = 1.65 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (\text{Schmid y Curley-Fiorino, 1975})$$

Empleando la ecuación (16.5-9) de Bird y col. (1982) para corregir el valor de la difusividad por el efecto de la temperatura, para el dato anterior se tiene:

$$D_{Au(CN)_2^-} (20^\circ \text{C}) = 0.70 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

6.- Estimación de la difusividad efectiva

La difusión en poros puede ocurrir por uno o mas de tres mecanismos: difusión ordinaria, difusión Knudsen y difusión en superficies. La trayectoria libre media de las moléculas en los líquidos es tan pequeña que la difusión Knudsen resulta insignificante. Por tanto si los poros están llenos de líquido y en ausencia de difusión en superficies, el proceso resulta de difusión ordinaria.

Si los poros estan orientados al azar, la sección transversal libre media del medio poroso es la misma en cualquier plano y es idéntica a la fracción volumen de espacio vacío o porosidad θ . Si los poros fueran un arreglo de cilindros paralelos a la trayectoria de difusión, el flux difusivo por unidad de sección transversal total del sólido poroso sería la fracción θ del flujo bajo condiciones similares sin sólido presente. Sin embargo, la longitud de la trayectoria tortuosa de difusión en los poros reales es mayor que la distancia a lo largo de una línea recta en la dirección media de difusión. Mas aún, los canales a través de los cuales ocurre la difusión son de forma irregular y sección transversal variable. Los factores mencionados originan que el flux sea menor que aquel en un poro uniforme de la misma longitud y radio medio. Se puede expresar, (Satterfield, 1970), un coeficiente de difusividad efectiva por unidad de sección transversal del medio poroso, D_e , como

$$D_e = \frac{D \theta}{L' S'} = \frac{D \theta}{\tau}$$

donde L' es un factor de longitud o ángulo y S' es un factor de forma, ambos mayores que la unidad y representan los efectos citados. Refiere Satterfield que se han realizado intentos para desarrollar expresiones teóricas que relacionen L' o S' con algunas propiedades fácilmente medibles tales como la porosidad o el tamaño de partícula en un agregado, aunque ninguna es de aplicación general . El mismo autor presenta una recopilación de datos experimentales de diferentes investigadores donde muestra que no existe una relación única entre τ y θ .

Un medio poroso constituye un sistema heterogéneo, el Método del Promedio Volumétrico (Carbonell y Whitaker, 1984) permite describirlo como un medio continuo, por medio del desarrollo de una ecuación de transporte que involucra variables promedio. Al tratar el caso de difusión y reacción surge el tensor de difusividad efectiva que se puede evaluar o predecir de acuerdo a las características geométricas del medio. Uno de los retos consiste en lograr una descripción adecuada de la estructura real del medio que se estudia.

Otro enfoque orientado al cálculo de la difusividad efectiva en un medio heterogeneo lo constituye el método de Lattice-Boltzman (Alvarez-Ramirez y col.,1995). Se calcula la difusividad efectiva para estructuras que consisten en inclusiones, permeables o no permeables, distribuidas en una fase continua. Los autores presentan simulaciones para estructuras bidimensionales.

Predecir o evaluar el valor de la difusividad efectiva para un medio poroso como el que representa una partícula de mineral y aplicarlo a una distribución de la mismas en la pila de lixiviación es un problema que no se aborda en el presente trabajo. Para el presente estudio se emplea el rango de porosidad reportado por Bartlett, (1991) y se considera el modelo de poros en desorden (Wakao y Smith, 1962) para un medio que cuenta únicamente de macroporos. Así, la difusividad efectiva, D_e se estima por

$$D_e = \varepsilon_0^2 D$$

donde ε_0 es la porosidad del mineral y D la difusividad molecular.

Es importante notar que, finalmente, la difusividad efectiva se considera como un parámetro libre, estudiando el comportamiento del modelo para un rango de valores de la misma.

7.- Efectividad de mojado de la partícula de mineral

La efectividad de mojado, f_w , es la fracción del área externa de la partícula efectivamente contactada por el liquido que fluye a través del lecho. Este parámetro puede ser diferente del área externa físicamente mojada, dado que las partículas están en contacto con zonas de líquido semiestancado que contribuyen muy poco al transporte de masa.

El área efectiva no es fácil de determinar y, por otro lado sería difícil de usar en el análisis de un reactor Trickle Bed, dado que las ecuaciones de difusión y reacción dentro de una partícula parcialmente mojada no son sencillas de tratar. Si se considera un modelo simple que supone un mojado total, la existencia de un área parcialmente mojada resulta en la evaluación de un valor menor de la difusividad interna aparente. El recorrido medio de una molécula que se difunde en una partícula porosa con un mojado externo parcial es mayor que aquel en una partícula totalmente cubierta. La razón de la difusividad interna en condiciones de mojado parcial a total

puede relacionarse con el área efectiva mojada externa de la partícula porosa (Colombo y col., 1976).

Gianetto y Specchia (1992) hacen referencia a varios artículos en donde se aborda el tema y se califica un mojado incompleto. D_{app} la difusividad aparente intrapartícula para un mojado parcial, medida por medio de un método dinámico, es comparada con la difusividad efectiva D_e para una partícula completamente mojada (reactor lleno de líquido). D_{app}/D_e se toma como una medida del contacto y la fracción mojada se calcula como

$$f_w = \sqrt{\left(\frac{D_{app}}{D_e}\right)}$$

Los autores mencionados presentan en una gráfica -Fig. 8 (Gianneto y Specchia, 1992)- una recopilación de datos para f_w en función de las condiciones de flujo definidas por el Re_L

$$Re_L = \frac{L d_p}{\mu_L}$$

donde

L flujo másico superficial de líquido $\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$

d_p diámetro de partícula m

μ_L viscosidad del líquido $\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s}$

8.- Relación estequiométrica α_i moles i / moles oro.

Dada la estequiometría de la reacción, las relaciones α_i , asumen los siguientes valores.

$$\alpha_{CN^-} = -2$$

$$\alpha_{O_2} = -0.25$$

$$\alpha_{OH^-} = 1$$

$$\alpha_{Au(CN)_2^-} = 1$$

9.- Concentraciones de referencia

9.1.- concentración de cianuro

La solución lixivante típica contiene entre 0.2 y 1.0 lb NaCN / ton (Zyl y col., 1988), lo cual equivale a valores entre 2×10^{-6} y 1.0×10^{-5} mol/cm³ aproximadamente. De acuerdo a esto la concentración de referencia que se emplea en el programa es

$$C_{CN^-}^0 = 2 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

9.2.- concentración de oxígeno

La solubilidad del oxígeno en agua a 20°C y una atmósfera de presión es de 2.46×10^{-7} mol/cm³ (Perry y Green, 1984), por tanto

$$C_{O_2}^0 = 2.46 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^3$$

9.3.- concentración de oxidrilo

A pH= 10 la concentración de oxidrilo tiene un valor de 1.0×10^{-7} mol / cm³. En la reacción se genera este ión, por tanto, para concentración de referencia se considera

$$C_{OH^-}^0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

9.4.- concentración de complejo

Se fija como referencia para adimensionalizar la concentración del complejo, un valor de

$$C_{Au(CN)_2}^0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

10.- Ley de mineral ρ_p

El mineral que se procesa en lixiviación en pila posee una ley de 1 a 5 g oro / ton (Zyl y col., 1988). Si para este rango se considera la densidad del mineral de 2 ton / m³, se tiene un contenido de 2.0×10^{-6} a 1.0×10^{-5} g oro / cm³ de mineral. Con base a lo anterior, se propone

$$\rho_p^0 = 4.0 \times 10^{-6} \text{ g oro / cm}^3 \text{ de mineral.}$$

11.- S_g , área en cm² por gramo de oro

En la cianuración se solubilizan partículas de oro finamente diseminadas de tamaño del orden de micrones (Haque, 1992).

S_g representa el área de oro disponible por unidad de masa del metal. Así, se tiene

$$S_g = \frac{a_p}{m_p} = \frac{a_p}{\rho V_p}$$

donde

a_p área en cm² de la partícula de oro

m_p masa en gramos de la partícula de oro.

ρ densidad del oro metálico, 19.3 g oro / cm³

V_p volumen de la partícula de oro

Si las partículas de oro se consideran hemisféricas, se tiene

$$S_g = \frac{3}{\rho R}$$

donde R es el radio de partícula, en cm.

De acuerdo a lo anterior si se propone

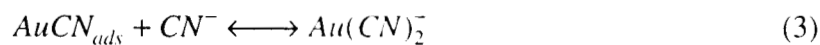
$$S_g = 200 \text{ cm}^2 / \text{g oro}$$

se trata de una partícula de 7.77×10^{-4} cm o sea, $7.77 \mu\text{m}$.

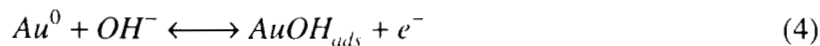
12.- Expresión para la tasa de Reacción de Cianuración de Oro.

Con la intención de lograr una descripción mas adecuada de la reacción de cianuración de oro, se obtiene un expresión cinética a partir de aquellas derivadas por Wadsworth (1991) para las densidades de corriente para la disolución anódica de oro y la reducción catódica de oxígeno sobre este metal. Este autor propone un mecanismo basado en etapas de adsorción y transferencia de carga que combina con el transporte de masa para obtener una cinética aparente para la cianuración de una placa de oro en una solución agitada

En el trabajo de Wadsworth (1991), se señala que las reacciones superficiales para la disolución de oro incluyen etapas de adsorción y pueden representarse por las siguientes reacciones



Se tiene, simultáneamente la pasivación por adsorción de OH^-



Las etapas de adsorción y transferencia de carga mencionadas se pueden expresar





Si las etapas de adsorción y desorción son reacciones rápidas, las ecuaciones (5a y 5b) están cerca del equilibrio. Si θ es la fracción de la superficie de oro cubierta por el cianuro adsorbido y θ' la fracción cubierta por el hidroxilo, entonces

$$k_f (CN^-)(1-\theta-\theta') \cong k_b \theta \quad (7)$$

La constante de equilibrio para las ecuaciones (5a y 5b) es $K_{ads} = k_f/k_b$. Para fracciones pequeñas de superficie cubierta $\theta \ll (1-\theta')$ y la cinética de transferencia de carga puede ser representada por la siguiente ecuación

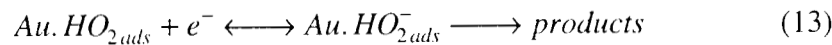
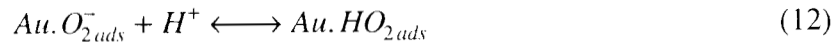
$$i_a = k_a' \theta e^{\frac{\alpha_a F E_a}{RT}} \quad (8)$$

$$i_a = k_a' K_{ads} (1-\theta') (CN^-) e^{\frac{\alpha_a F E_a}{RT}} \quad (9)$$

Donde i_a es la densidad de la corriente anódica (A/cm^2), (CN^-) es la concentración de cianuro en la cercanía de la superficie metálica, α_a es el coeficiente de transferencia, F es la constante de Faraday y E_a es el voltaje anódico. Las mediciones de la pendiente de Tafel indican que α_a es aproximadamente igual a 0.5. Si se define $k_1 = k_a' K_{ads} (1-\theta')$

$$i_a = k_1 (CN^-) e^{\frac{\alpha_a F E_a}{RT}} \quad (10)$$

La reducción de oxígeno es más compleja. Las siguientes etapas son consistentes con las observaciones, Wadsworth (1991)



El peróxido adsorbido, ecuación (13), reacciona después para formar productos a través de una serie de reacciones químicas y electroquímicas.

En soluciones alcalinas las pendientes de Tafel, 0.036 a 0.046, indican que la etapa controlante es la reacción (13), estando las etapas previas cerca del equilibrio, entonces

$$i_c = -k_c'(O_2)(H^+) e^{\frac{-[2-\alpha_a]FE_c}{RT}} \quad (14)$$

Se ha observado que la cinética de adsorción de oxígeno refleja el cambio en la energía libre de adsorción, ΔG_θ^0 , con el grado de superficie cubierta, θ , como lo expresa la isoterma de adsorción de Temkin, de esta forma la ecuación (14) se escribe

$$i_c = -k_c'(O_2)(H^+) e^{\frac{-[2-\alpha_a]FE_c}{RT}} e^{\frac{\theta}{RT} \frac{d\Delta G_\theta^0}{d\theta}} \quad (15)$$

En la ecuación (15) una función de Temkin modificada que correlacione los datos experimentales puede ser aproximada por

$$\frac{\theta}{RT} \frac{d\Delta G_\theta^0}{d\theta} = \frac{FE_c}{RT} + b'(O_2)_b \frac{FE_c}{2RT} \quad (16)$$

En donde b' es un parámetro evaluado experimentalmente y $(O_2)_b$ es la concentración de oxígeno en el seno de la solución (Wadsworth, 1991)

Y por tanto la densidad de corriente catódica se puede expresar

$$i_c = -k_c (H^+) (O_2) e^{\frac{-[1-b(O_2)_b] F E_c}{2RT}} \quad (17)$$

$$i_c = -k_2 (O_2) e^{\frac{-[1-b(O_2)_b] F E_c}{2RT}} \quad (18)$$

donde $k_2 = k_c (H^+)$

Para la reacción global de cianuración se combinan las reacciones anódica y catódica igualando los potenciales, es decir las ecuaciones (10) y (18), se obtiene para la densidad de corriente involucrada en el proceso

$$i = [k_1 (CN^-)]^{\frac{1-b(O_2)_b}{1-b(O_2)_b + 2\alpha_a}} [k_2 (O_2)]^{\frac{2\alpha_a}{1-b(O_2)_b + 2\alpha_a}} \quad (19)$$

La ecuación anterior se puede escribir:

$$i = [k_1 (CN^-)]^\beta [k_2 (O_2)]^\gamma \quad (20)$$

donde

$$\beta = \frac{1-b(O_2)_b}{1-b(O_2)_b + 2\alpha_a}$$

$$\gamma = \frac{2\alpha_a}{1-b(O_2)_b + 2\alpha_a}$$

Siendo la tasa de reacción

$$R = \frac{i}{F} [=] \frac{\text{mol Au}}{\text{cm}^2 \text{s}} \quad (21)$$

Empleando la notación definida en las ecuaciones del modelo

$$R(r,t) = [k_1 C_{CN}]^\beta [k_2 C_{O_2}]^\gamma / F \quad (22)$$

Los valores de las constantes cinéticas se obtienen (Wadsworth,1991), ajustando las curvas de polarización de Kudryk y Kellogg (1954) para condiciones fijas de pH y presión atmosférica.

$$k_1 = 5.56 \times 10^6 \text{ A.cm/mol}$$

$$k_2 = 25 \text{ A.cm/mol}$$

$$\beta = 0.4749$$

$$\gamma = 0.5251$$

El pH adecuado para la cianuración es de alrededor de 10.5 (Zyl y col., 1988). Cabe mencionar que la tasa de lixiviación se ve afectada significativamente solo por valores extremos de pH, arriba de 12 si se emplea hidróxido de sodio o potasio (Kameda, M., 1949).

Apéndice B

Ecuaciones Adimensionales

Empleando las variables adimensionales

$x = r/r_p$	coordenada radial adimensional
$Z = z/L$	coordenada de profundidad de pila adimensional
$y_i = C_i/C_i^0$	concentración adimensional de la especie i en la solución que ocupa los poros en las partículas de mineral.
$y_{ib} = C_{ib}/C_i^0$	concentración adimensional de la especie i en la solución lixiviante
$S_g^* = S_g/S_g^0$	área específica de oro adimensional
$\rho_p^* = \rho_p/\rho_p^0$	ley de oro adimensional
$\theta = D_0 t/r_p^2$	tiempo adimensional

y siendo las referencias:

C_i^0	concentración de referencia de la especie i (mol/cm ³).
ρ_p^0	ley de mineral de referencia (gramos Au/cm ³ de mineral).
S_g^0	área específica de oro de referencia (cm ² /gramo Au).
D_0	difusividad de referencia (cm ² /s).
r_p	radio de partícula (cm)
L	profundidad de la pila (cm)

Se plantea la ecuación que describe la difusión y reacción en estado transiente en la partícula porosa de mineral para cada una de las especies en solución: O_2 , CN^- , $Au(CN)_2^-$ y OH^- :

$$\varepsilon_v \frac{D_0}{D_{i,app}} \frac{\partial y_i}{\partial \theta} = \left[\frac{\partial^2 y_i}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial y_i}{\partial x} \right] + \phi_i^2 \rho_p^* S_g^* y_{CN^-}^\beta y_{O_2}^\gamma \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1')$$

Condición inicial

$$y_i(x, 0) = C_{i0}(x) / C_i^0 \quad (1-a')$$

Condiciones frontera

$$(1 - \varepsilon_h) \frac{\partial y_i}{\partial x}(1, \theta) = \varepsilon_b Bi I_i [y_{ib}(Z, \theta) - y_i(1, \theta)] \quad (1-b')$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial x}(0, Z, \theta) = 0 \quad (1-c')$$

La tasa de cambio de la concentración de oro en el mineral

$$\frac{d\rho_p^*}{d\theta} = \phi_{Au}^2 \rho_p^* S_g^* y_{CN^-}^\beta y_{O_2}^\gamma \quad (1.2')$$

Condición inicial

$$\rho_p^*(x, 0) = \rho_{p0}(x) / \rho_p^0 \quad (1.2-a')$$

El balance de la especie i en la solución lixiviante es:

$$\frac{D_0}{D_{iapp}} \frac{\partial y_{ib}}{\partial \theta} = -(1/\varepsilon_b) Bi I_i \frac{\partial y_{ib}}{\partial Z} - 3 Bi I_i (y_{ib} - y_{is}) \quad 0 \leq Z \leq 1 \quad (2')$$

Condiciones inicial y de frontera

$$y_{ib}(Z, 0) = C_{ib0}(Z) / C_i^0 \quad (2-a')$$

$$y_{ib}(0, \theta) = C_i^f(\theta) / C_i^0 \quad (2-b')$$

Los grupos adimensionales están dados por:

$$\phi_i^2 = \frac{r_p^2 \rho_p^0 S_g^0 \alpha_i R^0}{C_i^0 D_{iapp}} \quad \text{módulo de Thiele, } \phi_i, \text{ para la especie } i.$$

$$R^0 = [k_1 C_{CN}^0]^\beta [k_2 C_{O_2}^0]^\gamma / F \quad \text{tasa de reacción de referencia.}$$

$$\phi_{Au}^2 = \frac{M r_p^2 S_g^0 R^0}{D_o}$$

$$Bi I_i = \frac{k_{gi} r_p}{D_{iapp}} \quad \text{Biot de masa I para la especie } i.$$

$$Bi II_i = \frac{r_p^2 u_s}{D_{iapp} L} \quad \text{Biot de masa II para la especie } i.$$

Apéndice C-1

Discretización de las ecuaciones del modelo

Se procede en primer término a discretizar el término de difusión radial en la ecuación (1') (apéndice B), para la partícula porosa. Se emplea el método de Colocación Ortogonal (Villadsen y Michelsen, 1978).

En este caso se tienen condiciones de simetría dadas por la condición frontera expresada por la ecuación (1-c') del mismo apéndice. Se sugiere un cambio de variable $u = x^2$ para el radio adimensional debido a que los polinomios ortogonales tienen como argumento x^2 . De esta forma la ecuación (1') se escribe

$$\varepsilon_0 \frac{D_0}{D_{i,app}} \frac{\partial y_i}{\partial \theta} = 4u \frac{\partial^2 y_i}{\partial u^2} + 6 \frac{\partial y_i}{\partial u} + \phi^2 \rho_p^* S_g^* y_{CN}^{-\beta} y_{O_2}^\gamma \quad (c.1)$$

y la condición frontera (1-b')

$$2(1 - \varepsilon_h) \frac{\partial y_i}{\partial u}(1, \theta) = \varepsilon_b Bi I_i [y_{ib}(Z, \theta) - y_i(1, \theta)] \quad (c.2)$$

De acuerdo a la notación de la referencia (Villadsen y Michelsen, 1978) se establece para las ecuaciones (c.1) y (c.2) respectivamente. Por simplicidad se omite el subíndice relativo a la especie.

$$\varepsilon_0 \frac{D_0}{D_{i,app}} \frac{d y_j}{d \theta} = 4u_j \left[\sum_{m=1}^{N+1} B_{jm} y_m \right] + 6 \left[\sum_{m=1}^{N+1} A_{jm} y_m \right] + \phi^2 (\rho_p^* S_g^* y_{CN}^{-\beta} y_{O_2}^\gamma)_j \quad (1'')$$

$$2(1 - \varepsilon_h) \sum_{m=1}^{N+1} A_{N+1,m} y_m = \varepsilon_b Bi I [y_b - y_{N+1}] \quad (1-b'')$$

siendo

N el número de puntos internos de colocación ortogonal

y_j es el valor de y la concentración adimensional evaluado en el punto de colocación ortogonal j donde $j=1, \dots, N$. La posición $N+1$ corresponde al radio adimensional $x = 1$.

A_{jm} y B_{jm} son los elementos de las matrices definidas en la sección 3.3 de la referencia (Villadsen y Michelsen, 1978)

La tasa de cambio de la concentración de oro en el mineral, ecuación (1.2') del apéndice B se plantea a nivel local en cada uno de los puntos de colocación

$$\frac{d\rho_p^*}{d\theta} = \phi_{Au}^2 (\rho_p^* S_g^* y_{CN}^{\beta} y_{O_2}^{\gamma})_j \quad (1.2'')$$

En la expresión para el balance de la especie i en la solución lixiviante dada por la ecuación (2) del apéndice B se emplea el enfoque Lagrangiano aplicado en trabajos previos por Pantelis y Ritchie (1991). Se describe en primer término la notación empleada

z_p posición de una partícula de fluido en el instante t^k

z_p^{k-1} posición de origen de la partícula en el instante t^{k-1}

$\bar{v} = \frac{d\bar{z}}{dt}$ vector velocidad

De esta forma se puede plantear la siguiente aproximación

$$\bar{v} = \frac{z_p - z_p^{k-1}}{\Delta\theta}$$

En la ecuación (2') se agrupan los términos transiente y de transporte convectivo para originar una derivada sustancial. Así, la ecuación se escribe

$$\frac{D_0}{D_{iapp}} \frac{dy_{ib}}{d\theta} = -3 Bi I_i (y_{ib} - y_{is})$$

Discretizando se tiene

$$\frac{y_b^k - y_b^{k-1}}{\Delta\theta} = -3 \frac{D_{iapp}}{D_0} Bi I (y_b^{k-1} - y_{N+1}^{k-1}) \quad (2'')$$

donde

$$y_b^k = y_b(z_p, t^k)$$

$$y_b^{k-1} = y_b(z_p^{k-1}, t^{k-1})$$

$$y_{N+1}^{k-1} = y_{N+1}(z_p^{k-1}, t^{k-1})$$

Apéndice C-2

Algoritmo del programa

SE DESCRIBE LA SECUENCIA DE LAS ETAPAS BÁSICAS EN LA SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO.

- Calcular raíces y matrices de colocación ortogonal en función del número de puntos internos de colocación, N.
- Alimentar datos al programa. La Tabla 1 del capítulo de resultados muestra datos típicos.
- Calcular parámetros de transporte para cada especie empleando las ecuaciones del apéndice A.
- Calcular parámetros adimensionales definidos en el apéndice B.
- Fijar los intervalos de tiempo para ejecución del programa e impresión de resultados.
- Establecer las condiciones iniciales definidas en el apéndice D-1.

Tiempo CICLO K

Posición en la Pila CICLO IK

- Calcular para cada especie, la concentración de la solución lixivante para la posición IK en la pila y en el instante de tiempo actual K, a partir de las condiciones iniciales. Se emplea la ecuación (2") del apéndice C-1.
- Calcular el perfil radial de concentraciones en solución, ley de mineral y área específica de oro, en la posición IK en la pila y en el instante actual de tiempo K, a partir de condiciones iniciales. Se aplica el método de Runge Kutta de cuarto orden para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales definido por las ecuaciones (1") y (1.2") del apéndice C-1 y complementado por la ecuación (1-b") del mismo.
- Calcular balances para la posición IK en la pila.
- Imprimir los perfiles de concentración radial en la partícula y la concentración en la solución lixivante para la posición IK en la pila.

Cierra CICLO IK

- Calcular e imprimir los balances en la pila para el tiempo K.

Cierra CICLO K

- Efectuar impresiones finales.

Apéndice D-1
Condiciones Iniciales del Programa

Posición en la pila CICLO IK

Posición radial en la partícula CICLO I

$RHO_0(IK,I)$

$SGA_0(IK,I)$

Para $IK=1$

$y_{i0}(IK,I)$

Para $IK>1$

$y_{i0}(IK,I)$

Cierra CICLO I

Para $I=N+1$

$RHO_0(IK,I)$

$SGA_0(IK,I)$

$y_{i0}(IK,I)$

Para $IK=1$

$BULK_{i0}(IK)$

Para $IK>1$

$BULK_{i0}(IK)$

Cierra CICLO IK

Notación empleada

$RHO_0(IK,I)$ perfil radial para cada posición en la pila de la concentración de oro en el mineral

$SGA_0(IK,I)$ perfil radial para cada posición en la pila del área específica de granos de oro

$y_{i0}(IK,I)$ perfil radial para cada posición en la pila de la concentración de la especie i en solución

$BULK_{i0}(IK)$ concentración de la especie i en la solución lixivante

Apéndice D-2 Variantes del esquema numérico

a) Número de puntos de colocación ortogonal

Se muestra en la Figura D.1 el efecto del número de puntos de colocación ortogonal empleados en el esquema numérico. No se tienen efectos significativos en las curvas de extracción. Se incluye el resumen de las corridas correspondientes mostrando dichos datos de extracción y el resto de los balances globales.

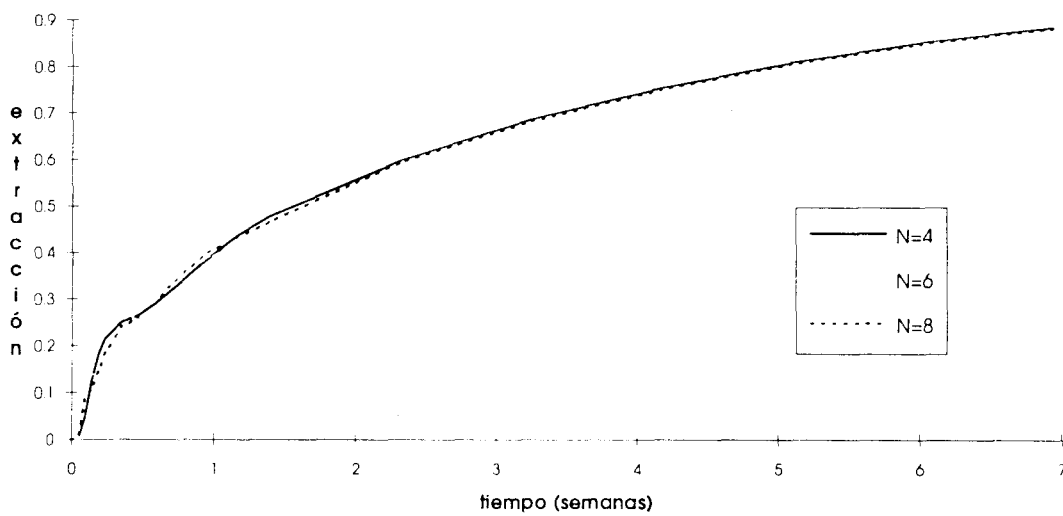


Figura D.1.- Efecto del número de puntos de colocación ortogonal en la curva de extracción de la corrida típica

Corridas correspondientes a la Figura D.1

Intervalo de tiempo adimensional empleado=0.01

>

N=4

SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.807	0.623	0.498	0.293	0.203	0.089	0.044	0	0	0
DENA	0	0.133	0.238	0.31	0.433	0.454	0.516	0.481	0.314	0.193	0.118
OUTA	0	0.017	0.029	0.011	0.004	0.006	0.006	0.004	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.126	0.216	0.264	0.318	0.38	0.478	0.684	0.806	0.881

>

N=6

SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.838	0.579	0.506	0.304	0.2	0.122	0.032	0	0	0
DENA	0	0.112	0.285	0.303	0.423	0.46	0.485	0.494	0.317	0.195	0.119
OUTA	0	0.047	0.003	0.011	0.009	0.004	0.004	0.005	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.137	0.159	0.277	0.348	0.382	0.467	0.682	0.804	0.88

>

N=8

SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.843	0.613	0.496	0.312	0.195	0.138	0.049	0	0	0
DENA	0	0.109	0.249	0.32	0.412	0.467	0.473	0.478	0.318	0.196	0.12
OUTA	0	0.053	0.019	0.015	0.005	0.008	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.106	0.185	0.259	0.329	0.395	0.465	0.68	0.803	0.88

>

Notación

SEMS tiempo en semanas.

UNRA fracción de oro sin reaccionar en el mineral.

DENA fracción de oro como $Au(CN)_2^-$ en la solución del interior de las partículas.

OUTA fracción de oro como $Au(CN)_2^-$ en la solución lixivante que escurre en el lecho.

EXTR fracción de oro extraído del proceso.

b) Intervalo de tiempo empleado.

En la Figura D.2 se muestra el efecto en la tasa de extracción de la corrida de referencia del intervalo de tiempo adimensional empleado en el esquema numérico, al integrar las ecuaciones discretizadas dadas en el apéndice C. Para la corrida de referencia, la unidad de tiempo es de 0.324 días. Las curvas muestran que no existen mejoras significativas al emplear intervalos de tiempo adimensional menores a 0.02. Se incluye el resumen de las corridas correspondientes mostrando los datos de extracción y el resto de los balances globales.

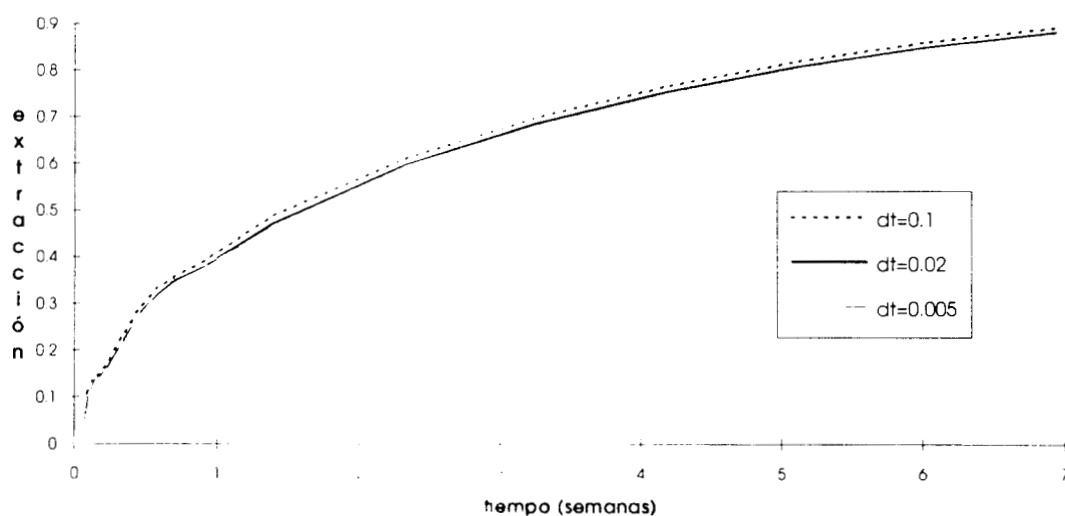


Figura D.2.- Efecto del intervalo de tiempo empleado en el esquema numérico en la curva de extracción de la corrida de referencia.

Corridas correspondientes a la Figura D.2

 $\Delta\theta = 0.1$

TIME	0	1	3	5	10	15	20	30	70	110	150
SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.832	0.569	0.465	0.28	0.146	0.103	0.024	0	0	0
DENA	0	0.117	0.297	0.345	0.445	0.51	0.501	0.497	0.311	0.19	0.116
OUTA	0	0.047	0.004	0.012	0.009	0.004	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.141	0.17	0.293	0.355	0.393	0.487	0.696	0.817	0.891

 $\Delta\theta = 0.02$

TIME	0	1	3	5	10	15	20	30	70	110	150
SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.838	0.579	0.497	0.299	0.184	0.117	0.027	0	0	0
DENA	0	0.111	0.285	0.313	0.427	0.474	0.489	0.497	0.315	0.193	0.118
OUTA	0	0.047	0.003	0.011	0.009	0.004	0.004	0.004	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.137	0.16	0.279	0.347	0.382	0.471	0.684	0.806	0.881

 $\Delta\theta = 0.01$

TIME	0	1	3	5	10	15	20	30	70	110	150
SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.838	0.579	0.506	0.304	0.2	0.122	0.032	0	0	0
DENA	0	0.112	0.285	0.303	0.423	0.46	0.485	0.494	0.317	0.195	0.119
OUTA	0	0.047	0.003	0.011	0.009	0.004	0.004	0.005	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.137	0.159	0.277	0.348	0.382	0.467	0.682	0.804	0.88

 $\Delta\theta = 0.005$

TIME	0	1	3	5	10	15	20	30	70	110	150
SEMS	0	0.046	0.139	0.231	0.463	0.694	0.926	1.389	3.241	5.093	6.944
UNRA	1	0.837	0.579	0.507	0.307	0.211	0.125	0.04	0	0	0
DENA	0	0.112	0.285	0.303	0.42	0.449	0.482	0.486	0.318	0.196	0.12
OUTA	0	0.048	0.003	0.011	0.009	0.004	0.003	0.005	0.002	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.137	0.159	0.277	0.349	0.383	0.465	0.68	0.803	0.879

>

Apéndice E-1

Corrida de referencia

Los datos de alimentación corresponden a los de la Tabla I de la página 15. Las fuentes se precisan en el Apéndice A.

Los resultados que reporta el programa incluyen

- Parámetros adimensionales y de transporte.
- Perfiles radiales de concentración en la solución que ocupa los poros de la partícula de mineral para varias posiciones en la pila. Esto se reporta para intervalos de tiempo establecidos en el ciclo de operación.
- La concentración media de complejo en la solución del interior de la partícula de mineral y la conversión media de oro en el mineral para cada perfil radial.
- Concentraciones en la solución lixiviante para cada tiempo y posición de pila
- Se presentan los balances en toda la pila que definen la distribución de oro en el proceso a un tiempo dado.

La notación empleada:

time	tiempo adimensional θ
prof ó PROF(IK)	profundidad de pila adimensional Z
conv ó CONV(IK)	conversión media en el mineral para posición definida por θ y Z .
c4ik	concentración media del complejo $Au(CN)_2^-$ para posición definida por θ y Z
rad	posición radial adimensional x
rho	ley de mineral adimensional $\rho_p^*(x, \theta)$
CN	concentración adimensional de cianuro $y_{CN^-}(x, \theta)$
O2	concentración adimensional de oxígeno $y_{O_2}(x, \theta)$
OH	concentración adimensional de oxidrilo $y_{OH^-}(x, \theta)$
Co	concentración adimensional de complejo $y_{Au(CN)_2^-}(x, \theta)$

La última columna en las tablas de los perfiles radiales corresponde a la concentración en la solución lixivante

SEMS	tiempo en semanas.
UNRA	fracción de oro sin reaccionar en el mineral.
DENA	fracción de oro como $Au(CN)_2^-$ en la solución del interior de las partículas.
OUTA	fracción de oro como $Au(CN)_2^-$ en la solución lixivante que escurre en el lecho.
EXTR	fracción de oro extraído del proceso.

Datos para el programa

Fracciones de espacio

$$\varepsilon_0 = 0.04$$

$$\varepsilon_b = 0.021$$

$$\varepsilon_h = 0.39$$

Características del mineral

$$\rho_p = 4 \times 10^{-6} \text{ gr oro / cm}^3 \text{ de mineral}$$

$$S_g = 200 \text{ cm}^2/\text{gr oro}$$

Concentraciones de referencia

$$C_{CN^-}^0 = 2 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

$$C_{O_2}^0 = 2.46 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^3$$

$$C_{Au(CN)_2^-}^0 = 1 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

$$C_{OH^-}^0 = 1 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

Concentraciones de alimentación

$$C_{CN^-}^f = 2 \times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3$$

$$C_{O_2}^f = 2.46 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^3$$

$$C_{Au(CN)_2^-}^f = 0$$

$$C_{OH^-}^f = 1 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^3$$

Difusividades moleculares

$$D_{CN^-} = 1.75 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{O_2} = 2.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{OH^-} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$D_{Au(CN)_2^-} = 0.70 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Difusividad de referencia

$$D_0 = 0.36 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Condiciones de operación

$$u_s = 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^2.\text{s}$$

$$L = 800 \text{ cm}$$

$$r_p = 1 \text{ cm}$$

Efectividad de mojado

$$f_w = 0.40$$

Parámetros cinéticos de la reacción

$$k_1 = 5.56 \times 10^6 \text{ amp. cm} / \text{mol}$$

$$k_2 = 25 \text{ amp. cm} / \text{mol}$$

$$\beta = 0.4749$$

$$\gamma = 0.5251$$

Intervalos de tiempo y profundidad de pila

$$\Delta\theta = 0.020$$

$$\Delta Z = 0.020$$

$$\text{unidad de tiempo} = 0.324 \text{ días}$$

Parámetros adimensionales y de transporte

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN^-	0.32E-04	0.45E-08	0.10E+03	0.71E+04	0.80E+04
O_2	0.37E-04	0.56E-08	0.93E+02	0.66E+04	0.63E+04
OH^-	0.42E-04	0.69E-08	0.83E+02	0.61E+04	0.52E+04
$\text{Au}(\text{CN})_2^-$	0.17E-04	0.18E-08	0.16E+03	0.96E+04	0.20E+05

Perfiles radiales de concentración

tiempo adimensional $\theta = 1$

>

1

```
time= 1.000
prof= 0.000
conv= 0.242
c4ik= 0.078
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.999  0.996  0.995  0.983  0.807  0.000  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.000  0.002  0.555  0.954  1.000
O2   0.000  0.000  0.001  0.000  0.049  0.610  0.960  1.000
OH   0.101  0.102  0.103  0.126  0.250  0.164  0.104  0.100
Co   0.002  0.001  0.005  0.004  0.160  0.226  0.030  0.000
```

>

11

```
time= 1.000
prof= 0.200
conv= 0.215
c4ik= 0.071
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  1.000  0.996  0.999  0.983  0.920  0.000  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.000  0.001  0.448  0.901  0.966
O2   0.000  0.000  0.001  0.000  0.031  0.512  0.910  0.966
OH   0.101  0.101  0.103  0.114  0.221  0.194  0.120  0.108
Co   0.001  0.001  0.003  0.002  0.099  0.275  0.053  0.012
```

>

21

```
time= 1.000
prof= 0.400
conv= 0.197
c4ik= 0.071
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  1.000  0.996  1.000  0.984  0.991  0.000  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.001  0.000  0.268  0.806  0.901
O2   0.000  0.000  0.000  0.000  0.011  0.333  0.813  0.898
OH   0.101  0.101  0.103  0.105  0.191  0.277  0.168  0.138
Co   0.001  0.001  0.002  0.003  0.048  0.346  0.085  0.031
```

>

31

```

time= 1.000
prof= 0.600
conv= 0.172
c4ik= 0.068
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  1.000  0.997  1.000  0.987  1.000  0.141  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.001  0.000  0.074  0.671  0.791
O2   0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.122  0.660  0.772
OH   0.101  0.100  0.102  0.102  0.155  0.366  0.249  0.207
Co   0.000  0.001  0.001  0.004  0.022  0.360  0.109  0.054

```

>

41

```

time= 1.000
prof= 0.800
conv= 0.094
c4ik= 0.034
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  1.000  0.999  1.000  0.994  1.000  0.606  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.036  0.594  0.708
O2   0.000  0.000  0.000  0.001  0.000  0.060  0.562  0.670
OH   0.100  0.100  0.101  0.101  0.115  0.261  0.219  0.198
Co   0.000  0.001  0.000  0.002  0.005  0.184  0.068  0.041

```

>

51

```

time= 1.000
prof= 1.000
conv= 0.009
c4ik= 0.000
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  0.695
CN   0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.497  0.601
O2   0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.436  0.534
OH   0.100  0.100  0.100  0.100  0.100  0.100  0.100  0.100
Co   0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000

```

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.000

porcentaje de oro extraido

0.000

tiempo en dias:

0.324

>

Balances

UNRA= 0.838

DENA= 0.111

OUTA= 0.047

EXTR= 0.000

>

CONV(IK) 0.24 0.23 0.21 0.20 0.20 0.19 0.17 0.13 0.09 0.06 0.01

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 5$

1
time= 5.000
prof= 0.000
conv= 0.543
c4ik= 0.170
rad 0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho 0.988 0.979 0.969 0.574 0.000 0.000 0.000
CN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.436 0.816 0.979 1.000
O2 0.000 0.000 0.000 0.054 0.494 0.838 0.980 1.000
OH 0.111 0.126 0.208 0.333 0.217 0.136 0.106 0.100
Co 0.005 0.012 0.033 0.312 0.283 0.109 0.010 0.000
>

11
time= 5.000
prof= 0.200
conv= 0.527
c4ik= 0.165
rad 0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho 0.988 0.983 0.969 0.638 0.000 0.000 0.000
CN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.415 0.799 0.967 0.988
O2 0.000 0.000 0.000 0.048 0.474 0.821 0.966 0.987
OH 0.109 0.123 0.199 0.324 0.219 0.140 0.111 0.104
Co 0.005 0.011 0.027 0.285 0.290 0.116 0.013 0.003
>

21
time= 5.000
prof= 0.400
conv= 0.510
c4ik= 0.160
rad 0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho 0.988 0.986 0.969 0.704 0.000 0.000 0.000
CN 0.000 0.000 0.000 0.000 0.391 0.780 0.954 0.976
O2 0.000 0.001 0.000 0.042 0.451 0.802 0.953 0.974
OH 0.108 0.120 0.190 0.314 0.223 0.146 0.115 0.109
Co 0.004 0.011 0.021 0.256 0.300 0.124 0.015 0.006
>

31

```

time= 5.000
prof= 0.600
conv= 0.495
c4ik= 0.156
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.988 0.989 0.969 0.766 0.000 0.000 0.000
CN   0.000 0.000 0.000 0.000 0.364 0.759 0.941 0.964
O2   0.000 0.001 0.000 0.036 0.425 0.781 0.938 0.960
OH   0.107 0.117 0.180 0.304 0.229 0.152 0.119 0.113
Co   0.003 0.010 0.017 0.226 0.312 0.131 0.017 0.008

```

>

41

```

time= 5.000
prof= 0.800
conv= 0.480
c4ik= 0.153
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.988 0.991 0.969 0.823 0.000 0.000 0.000
CN   0.000 0.000 0.000 0.000 0.333 0.736 0.928 0.951
O2   0.000 0.001 0.000 0.031 0.395 0.758 0.923 0.945
OH   0.106 0.114 0.171 0.294 0.236 0.160 0.124 0.118
Co   0.003 0.009 0.013 0.197 0.326 0.139 0.019 0.010

```

>

51

```

time= 5.000
prof= 1.000
conv= 0.468
c4ik= 0.151
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.988 0.993 0.969 0.874 0.000 0.000 0.000
CN   0.000 0.000 0.000 0.000 0.298 0.711 0.913 0.937
O2   0.000 0.001 0.000 0.026 0.362 0.733 0.907 0.929
OH   0.106 0.112 0.163 0.284 0.247 0.169 0.129 0.123
Co   0.003 0.009 0.010 0.169 0.343 0.146 0.020 0.012

```

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.019

porcentaje de oro extraido

15.963

tiempo en dias:

1.620

>

Balances

UNRA= 0.497

DENA= 0.313

OUTA= 0.011

EXTR= 0.160

>

CONV(IK) 0.54 0.54 0.53 0.52 0.51 0.50 0.49 0.49 0.48 0.47 0.47

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 10$

```

1
time= 10.000
prof= 0.000
conv= 0.715
c4ik= 0.217
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.982  0.950  0.822  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.238  0.598  0.872  0.987  1.000
O2   0.001  0.000  0.021  0.311  0.649  0.888  0.988  1.000
OH   0.158  0.232  0.341  0.285  0.199  0.132  0.103  0.100
Co   0.018  0.028  0.237  0.398  0.242  0.076  0.007  0.000

```

>

```

11
time= 10.000
prof= 0.200
conv= 0.709
c4ik= 0.217
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.984  0.950  0.855  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.000  0.000  0.219  0.581  0.862  0.979  0.993
O2   0.001  0.000  0.019  0.292  0.632  0.877  0.980  0.992
OH   0.154  0.226  0.335  0.293  0.207  0.137  0.106  0.102
Co   0.017  0.025  0.219  0.407  0.247  0.078  0.009  0.002

```

>

```

21
time= 10.000
prof= 0.400
conv= 0.703
c4ik= 0.216
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.986  0.950  0.886  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.001  0.000  0.197  0.564  0.851  0.971  0.985
O2   0.001  0.000  0.017  0.271  0.613  0.866  0.971  0.984
OH   0.151  0.219  0.329  0.302  0.215  0.142  0.109  0.105
Co   0.017  0.022  0.200  0.416  0.251  0.080  0.011  0.004

```

>

31

time= 10.000

prof= 0.600

conv= 0.698

c4ik= 0.217

rad	0.215	0.421	0.606	0.764	0.885	0.965	1.000		
rho	0.987	0.949	0.913	0.000	0.000	0.000	0.000		
CN	0.000	0.002	0.000	0.174	0.546	0.839	0.962	0.977	
O2	0.000	0.000	0.015	0.248	0.594	0.853	0.962	0.976	
OH	0.147	0.212	0.324	0.312	0.225	0.147	0.113	0.109	
Co	0.017	0.020	0.182	0.427	0.255	0.082	0.014	0.006	

>

41

time= 10.000

prof= 0.800

conv= 0.693

c4ik= 0.217

rad	0.215	0.421	0.606	0.764	0.885	0.965	1.000		
rho	0.988	0.949	0.936	0.000	0.000	0.000	0.000		
CN	0.000	0.003	0.000	0.149	0.528	0.828	0.953	0.968	
O2	0.000	0.000	0.013	0.223	0.575	0.841	0.952	0.966	
OH	0.145	0.206	0.318	0.325	0.234	0.153	0.117	0.113	
Co	0.016	0.019	0.165	0.439	0.258	0.084	0.017	0.009	

>

51

time= 10.000

prof= 1.000

conv= 0.690

c4ik= 0.219

rad	0.215	0.421	0.606	0.764	0.885	0.965	1.000		
rho	0.988	0.949	0.954	0.000	0.000	0.000	0.000		
CN	0.000	0.004	0.000	0.122	0.511	0.817	0.943	0.959	
O2	0.000	0.000	0.011	0.195	0.556	0.828	0.941	0.956	
OH	0.142	0.200	0.313	0.339	0.244	0.159	0.122	0.117	
Co	0.016	0.018	0.149	0.452	0.260	0.086	0.020	0.012	

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.016

porcentaje de oro extraido

27.893

tiempo en dias:

3.241

>

Balances

UNRA= 0.299

DENA= 0.427

OUTA= 0.009

EXTR= 0.279

>

CONV(IK) 0.72 0.71 0.71 0.71 0.70 0.70 0.70 0.70 0.69 0.69 0.69

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 20$

1
time= 20.000
prof= 0.000
conv= 0.889
c4ik= 0.246
rad 0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho 0.918 0.799 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN 0.000 0.000 0.192 0.496 0.763 0.927 0.993 1.000
O2 0.000 0.019 0.268 0.557 0.793 0.936 0.993 1.000
OH 0.366 0.423 0.337 0.243 0.167 0.121 0.103 0.100
Co 0.066 0.308 0.462 0.324 0.155 0.047 0.003 0.000
>

11
time= 20.000
prof= 0.200
conv= 0.887
c4ik= 0.247
rad 0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho 0.918 0.827 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN 0.000 0.000 0.179 0.485 0.757 0.923 0.989 0.996
O2 0.000 0.017 0.255 0.546 0.786 0.931 0.988 0.996
OH 0.360 0.419 0.343 0.248 0.170 0.123 0.104 0.102
Co 0.061 0.292 0.467 0.327 0.156 0.048 0.004 0.001
>

21
time= 20.000
prof= 0.400
conv= 0.884
c4ik= 0.248
rad 0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho 0.918 0.854 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN 0.000 0.000 0.164 0.474 0.750 0.918 0.984 0.992
O2 0.000 0.016 0.240 0.535 0.779 0.926 0.984 0.991
OH 0.353 0.414 0.349 0.253 0.172 0.125 0.106 0.104
Co 0.057 0.275 0.474 0.330 0.158 0.049 0.005 0.002
>

31

```

time= 20.000
prof= 0.600
conv= 0.881
c4ik= 0.248
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.918 0.879 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN   0.002 0.000 0.149 0.463 0.744 0.913 0.980 0.988
O2   0.000 0.015 0.224 0.523 0.772 0.920 0.979 0.986
OH   0.347 0.410 0.356 0.258 0.175 0.127 0.108 0.106
Co   0.053 0.259 0.481 0.332 0.159 0.051 0.006 0.003

```

>

41

```

time= 20.000
prof= 0.800
conv= 0.879
c4ik= 0.249
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.918 0.901 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN   0.003 0.000 0.132 0.452 0.738 0.909 0.976 0.984
O2   0.000 0.014 0.208 0.511 0.765 0.915 0.975 0.982
OH   0.341 0.406 0.364 0.263 0.177 0.128 0.110 0.107
Co   0.050 0.243 0.489 0.334 0.161 0.052 0.007 0.004

```

>

51

```

time= 20.000
prof= 1.000
conv= 0.877
c4ik= 0.250
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.918 0.920 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN   0.004 0.000 0.115 0.441 0.731 0.904 0.972 0.980
O2   0.000 0.013 0.190 0.500 0.758 0.910 0.970 0.977
OH   0.335 0.402 0.373 0.268 0.179 0.130 0.111 0.109
Co   0.047 0.228 0.497 0.336 0.163 0.053 0.007 0.004

```

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.011

porcentaje de oro extraido

38.216

tiempo en dias:

6.481

>

Balances

UNRA= 0.117

DENA= 0.489

OUTA= 0.004

EXTR= 0.382

>

CONV(IK) 0.89 0.89 0.89 0.89 0.88 0.88 0.88 0.88 0.88 0.88 0.88

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 30$

```

1
time= 30.000
prof= 0.000
conv= 0.973
c4ik= 0.248
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.904  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.084  0.384  0.653  0.840  0.951  0.995  1.000
O2   0.017  0.168  0.457  0.701  0.864  0.958  0.995  1.000
OH   0.509  0.441  0.306  0.204  0.146  0.114  0.102  0.100
Co   0.329  0.587  0.413  0.253  0.125  0.038  0.003  0.000
>

```

```

11
time= 30.000
prof= 0.200
conv= 0.973
c4ik= 0.250
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.916  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.068  0.376  0.647  0.835  0.947  0.992  0.997
O2   0.015  0.150  0.448  0.695  0.859  0.955  0.992  0.997
OH   0.508  0.453  0.310  0.206  0.147  0.115  0.103  0.101
Co   0.314  0.594  0.414  0.255  0.127  0.040  0.004  0.001
>

```

```

21
time= 30.000
prof= 0.400
conv= 0.973
c4ik= 0.252
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.918  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.049  0.368  0.641  0.830  0.944  0.989  0.994
O2   0.009  0.130  0.439  0.689  0.854  0.951  0.989  0.994
OH   0.510  0.467  0.313  0.207  0.149  0.117  0.104  0.103
Co   0.304  0.603  0.414  0.257  0.129  0.041  0.006  0.002
>

```

```

31
time= 30.000
prof= 0.600
conv= 0.973
c4ik= 0.254
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.918  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.030  0.361  0.635  0.825  0.940  0.986  0.991
O2   0.004  0.108  0.430  0.683  0.849  0.947  0.986  0.991
OH   0.512  0.482  0.316  0.209  0.151  0.118  0.106  0.104
Co   0.293  0.611  0.415  0.260  0.130  0.042  0.007  0.003
>

```

```

41
time= 30.000
prof= 0.800
conv= 0.973
c4ik= 0.255
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.918  0.002  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.009  0.354  0.629  0.820  0.936  0.982  0.988
O2   0.001  0.085  0.423  0.677  0.844  0.943  0.982  0.987
OH   0.511  0.499  0.319  0.210  0.153  0.120  0.107  0.105
Co   0.283  0.619  0.415  0.262  0.132  0.043  0.008  0.004
>

```

```

51
time= 30.000
prof= 1.000
conv= 0.970
c4ik= 0.256
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.918  0.032  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.000  0.002  0.348  0.622  0.815  0.932  0.979  0.985
O2   0.000  0.075  0.416  0.670  0.839  0.939  0.979  0.984
OH   0.508  0.503  0.320  0.212  0.154  0.122  0.109  0.107
Co   0.271  0.614  0.415  0.264  0.134  0.045  0.009  0.005
>

```

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.009

porcentaje de oro extraido

47.095

tiempo en dias:

9.722

>

Balances

UNRA= 0.027

DENA= 0.497

OUTA= 0.004

EXTR= 0.471

>

CONV(IK) 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97 0.97

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 70$

```

1
time= 70.000
prof= 0.000
conv= 1.000
c4ik= 0.157
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.650  0.723  0.813  0.893  0.951  0.985  0.998  1.000
O2   0.763  0.812  0.873  0.927  0.967  0.990  0.999  1.000
OH   0.175  0.159  0.140  0.123  0.111  0.103  0.100  0.100
Co   0.482  0.377  0.254  0.145  0.066  0.020  0.002  0.000
>

```

```

11
time= 70.000
prof= 0.200
conv= 1.000
c4ik= 0.158
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.644  0.718  0.809  0.890  0.949  0.984  0.998  0.999
O2   0.757  0.808  0.869  0.925  0.965  0.989  0.998  0.999
OH   0.177  0.161  0.142  0.124  0.111  0.104  0.101  0.100
Co   0.484  0.379  0.255  0.146  0.067  0.020  0.002  0.000
>

```

```

21
time= 70.000
prof= 0.400
conv= 1.000
c4ik= 0.159
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   .638  0.713  0.805  0.888  0.948  0.983  0.997  0.998
O2   0.752  0.803  0.866  0.923  0.964  0.988  0.997  0.999
OH   0.179  0.163  0.143  0.125  0.112  0.104  0.101  0.101
Co   0.487  0.381  0.257  0.147  0.068  0.021  0.002  0.001
>

```

31

```

time= 70.000
prof= 0.600
conv= 1.000
c4ik= 0.160
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.631  0.708  0.801  0.885  0.946  0.982  0.996  0.997
O2   0.746  0.798  0.862  0.920  0.962  0.987  0.997  0.998
OH   0.182  0.165  0.144  0.126  0.112  0.104  0.101  0.101
Co   0.491  0.383  0.259  0.149  0.069  0.022  0.003  0.001

```

>

41

```

time= 70.000
prof= 0.800
conv= 1.000
c4ik= 0.162
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.625  0.703  0.797  0.882  0.944  0.980  0.995  0.997
O2   0.740  0.793  0.859  0.918  0.960  0.986  0.996  0.997
OH   0.184  0.167  0.146  0.127  0.113  0.105  0.102  0.101
Co   0.494  0.386  0.260  0.150  0.070  0.022  0.003  0.002

```

>

51

```

time= 70.000
prof= 1.000
conv= 1.000
c4ik= 0.163
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.619  0.697  0.793  0.880  0.942  0.979  0.994  0.996
O2   0.734  0.788  0.855  0.915  0.959  0.985  0.995  0.996
OH   0.187  0.169  0.148  0.128  0.114  0.105  0.102  0.101
Co   0.497  0.388  0.262  0.151  0.070  0.023  0.004  0.002

```

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.006

porcentaje de oro extraido

68.368

tiempo en dias:

22.685

>

Balances

UNRA= 0.000

DENA= 0.315

OUTA= 0.002

EXTR= 0.684

>

CONV(IK) 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 110$

```

1
time= 110.000
prof= 0.000
conv= 1.000
c4ik= 0.096
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.898  0.919  0.945  0.969  0.986  0.996  1.000  1.000
O2   0.950  0.960  0.973  0.984  0.993  0.998  1.000  1.000
OH   0.111  0.109  0.106  0.103  0.102  0.100  0.100  0.100
Co   0.291  0.230  0.156  0.089  0.041  0.012  0.001  0.000
>

```

```

11
time= 110.000
prof= 0.200
conv= 1.000
c4ik= 0.097
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.896  0.917  0.944  0.968  0.985  0.995  0.999  1.000
O2   0.948  0.959  0.972  0.984  0.992  0.998  1.000  1.000
OH   0.112  0.109  0.106  0.104  0.102  0.101  0.100  0.100
Co   0.292  0.232  0.157  0.090  0.041  0.013  0.001  0.000
>

```

```

21
time= 110.000
prof= 0.400
conv= 1.000
c4ik= 0.098
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.893  0.915  0.942  0.967  0.984  0.995  0.999  1.000
O2   0.946  0.957  0.971  0.983  0.992  0.997  0.999  1.000
OH   0.112  0.110  0.107  0.104  0.102  0.101  0.100  0.100
Co   0.294  0.233  0.158  0.091  0.042  0.013  0.002  0.001
>

```

31

time= 110.000

prof= 0.600

conv= 1.000

c4ik= 0.098

rad	0.215	0.421	0.606	0.764	0.885	0.965	1.000	
rho	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CN	0.891	0.913	0.941	0.966	0.984	0.995	0.999	0.999
O2	0.945	0.956	0.970	0.982	0.992	0.997	0.999	1.000
OH	0.113	0.110	0.107	0.104	0.102	0.101	0.100	0.100
Co	0.296	0.235	0.159	0.091	0.042	0.013	0.002	0.001

>

41

time= 110.000

prof= 0.800

conv= 1.000

c4ik= 0.099

rad	0.215	0.421	0.606	0.764	0.885	0.965	1.000	
rho	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CN	0.889	0.911	0.939	0.965	0.983	0.994	0.998	0.999
O2	0.943	0.955	0.969	0.982	0.991	0.997	0.999	0.999
OH	0.113	0.111	0.107	0.104	0.102	0.101	0.100	0.100
Co	0.298	0.236	0.161	0.092	0.043	0.014	0.002	0.001

>

51

time= 110.000

prof= 1.000

conv= 1.000

c4ik= 0.100

rad	0.215	0.421	0.606	0.764	0.885	0.965	1.000	
rho	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
CN	0.886	0.909	0.938	0.964	0.983	0.994	0.998	0.999
O2	0.941	0.953	0.968	0.981	0.991	0.997	0.999	0.999
OH	0.114	0.111	0.108	0.104	0.102	0.101	0.100	0.100
Co	0.300	0.238	0.162	0.093	0.043	0.014	0.002	0.001

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.004

porcentaje de oro extraido

80.596

tiempo en dias:

35.648

>

Balances

UNRA= 0.000

DENA= 0.193

OUTA= 0.001

EXTR= 0.806

>

CONV(IK) 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

tiempo adimensional $\theta = 150$

```

1
time= 150.000
prof= 0.000
conv= 1.000
c4ik= 0.059
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.970  0.976  0.984  0.991  0.996  0.999  1.000  1.000
O2   0.989  0.991  0.994  0.997  0.998  1.000  1.000  1.000
OH   0.102  0.101  0.101  0.101  0.100  0.100  0.100  0.100
Co   0.177  0.141  0.095  0.055  0.025  0.007  0.001  0.000
>

```

```

11
time= 150.000
prof= 0.200
conv= 1.000
c4ik= 0.059
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.969  0.976  0.983  0.990  0.996  0.999  1.000  1.000
O2   0.989  0.991  0.994  0.997  0.998  0.999  1.000  1.000
OH   0.102  0.101  0.101  0.101  0.100  0.100  0.100  0.100
Co   0.179  0.142  0.096  0.055  0.025  0.008  0.001  0.000
>

```

```

21
time= 150.000
prof= 0.400
conv= 1.000
c4ik= 0.060
rad  0.215  0.421  0.606  0.764  0.885  0.965  1.000
rho  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000  0.000
CN   0.969  0.975  0.983  0.990  0.995  0.998  1.000  1.000
O2   0.988  0.991  0.994  0.996  0.998  0.999  1.000  1.000
OH   0.102  0.101  0.101  0.101  0.100  0.100  0.100  0.100
Co   0.180  0.143  0.097  0.056  0.026  0.008  0.001  0.000
>

```

31

```

time= 150.000
prof= 0.600
conv= 1.000
c4ik= 0.060
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN   0.968 0.974 0.982 0.990 0.995 0.998 1.000 1.000
O2   0.988 0.990 0.993 0.996 0.998 0.999 1.000 1.000
OH   0.102 0.102 0.101 0.101 0.100 0.100 0.100 0.100
Co   0.181 0.144 0.098 0.056 0.026 0.008 0.001 0.001

```

>

41

```

time= 150.000
prof= 0.800
conv= 1.000
c4ik= 0.061
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN   0.967 0.974 0.982 0.989 0.995 0.998 1.000 1.000
O2   0.987 0.990 0.993 0.996 0.998 0.999 1.000 1.000
OH   0.102 0.102 0.101 0.101 0.100 0.100 0.100 0.100
Co   0.182 0.145 0.099 0.057 0.026 0.008 0.001 0.001

```

>

51

```

time= 150.000
prof= 1.000
conv= 1.000
c4ik= 0.062
rad  0.215 0.421 0.606 0.764 0.885 0.965 1.000
rho  0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
CN   0.966 0.973 0.981 0.989 0.995 0.998 0.999 1.000
O2   0.987 0.990 0.993 0.996 0.998 0.999 1.000 1.000
OH   0.102 0.102 0.101 0.101 0.100 0.100 0.100 0.100
Co   0.184 0.146 0.099 0.057 0.027 0.009 0.001 0.001

```

>

Concentracion media de complejo extraida WARM

0.003

porcentaje de oro extraido

88.110

tiempo en dias:

48.611

>

Balances

UNRA= 0.000

DENA= 0.118

OUTA= 0.001

EXTR= 0.881

>

CONV(IK) 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

PROF(IK) 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00

>

Moles extraidos por cm2 de pila

0.87E-05

Moles en mineral por cm2 de pila

0.99E-05

Balances globales

TIME 0.00 1.00 2.00 3.00 4.00 5.00 7.50 10.00 12.50 15.00

SEMS 0.000 0.046 0.093 0.139 0.185 0.231 0.347 0.463 0.579 0.694

UNRA 1.000 0.838 0.698 0.579 0.541 0.497 0.351 0.299 0.247 0.184

DENA 0.000 0.111 0.200 0.285 0.295 0.313 0.412 0.427 0.444 0.474

OUTA 0.000 0.047 0.023 0.003 0.008 0.011 0.013 0.009 0.006 0.004

EXTR 0.000 0.000 0.101 0.137 0.143 0.160 0.219 0.279 0.320 0.347

>

TIME 20.0 25.0 30.0 50.0 70.0 90.0 110.0 130.0 150.0

SEMS 0.926 1.157 1.389 2.315 3.241 4.167 5.093 6.019 6.944

UNRA 0.117 0.071 0.027 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

DENA 0.489 0.492 0.497 0.403 0.315 0.247 0.193 0.151 0.118

OUTA 0.004 0.005 0.004 0.003 0.002 0.002 0.001 0.001 0.001

EXTR 0.382 0.425 0.471 0.595 0.684 0.752 0.806 0.848 0.881

>

Apéndice E-2

Resumen de corridas del programa

Balances globales en la pila

Se muestran los balances globales en la pila.

Estos balances indican como reacciona y se transporta el oro en el proceso.

Cada corrida se identifica por el parámetro que se modifica en relación a la referencia.

La corrida de referencia se establece con los datos de la Tabla1 de la Sección de Resultados.

NOTACION

SEMS tiempo en semanas

UNRA fracción de oro sin reaccionar en el mineral

DENA fracción de oro como complejo en la solución del interior de las partículas

OUTA fracción de oro como complejo en la solución lixivante que escurre en el lecho

EXTR fracción de oro extraído del proceso

Corrida de referencia

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.838	0.698	0.579	0.541	0.497	0.351	0.299	0.247	0.184
DENA	0	0.111	0.2	0.285	0.295	0.313	0.412	0.427	0.444	0.474
OUTA	0	0.047	0.023	0.003	0.008	0.011	0.013	0.009	0.006	0.004
EXTR	0	0	0.101	0.137	0.143	0.16	0.219	0.279	0.32	0.347

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.117	0.071	0.027	0	0	0	0	0	0
DENA	0.489	0.492	0.497	0.403	0.315	0.247	0.193	0.151	0.118
OUTA	0.004	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.382	0.425	0.471	0.595	0.684	0.752	0.806	0.848	0.881

>

Corrida típica

Variante en la condición inicial

Solución saturada de oxígeno

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.727	0.458	0.329	0.225	0.17	0.08	0.045	0.017	0.008
DENA	0	0.219	0.434	0.526	0.599	0.629	0.666	0.656	0.647	0.624
OUTA	0	0.053	0.016	0.012	0.016	0.015	0.009	0.007	0.007	0.006
EXTR	0	0	0.105	0.132	0.156	0.187	0.251	0.291	0.327	0.362

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DENA	0.576	0.53	0.489	0.367	0.282	0.219	0.17	0.133	0.104
OUTA	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.42	0.467	0.508	0.631	0.717	0.78	0.829	0.866	0.896

>

radio de partícula=1.5cm

>

SEMS	0	0.061	0.121	0.182	0.243	0.364	0.485	0.606	0.728	0.97
UNRA	1	0.799	0.715	0.596	0.557	0.503	0.42	0.326	0.308	0.252
DENA	0	0.142	0.185	0.278	0.296	0.308	0.361	0.43	0.427	0.441
OUTA	0	0.02	0.006	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002
EXTR	0	0.044	0.117	0.137	0.14	0.165	0.2	0.238	0.273	0.322

>

SEMS	1.213	1.455	2.425	3.395	4.365	5.335	6.305	7.275	9.215	11.16
UNRA	0.178	0.126	0.027	0	0	0	0	0	0	0
DENA	0.477	0.497	0.497	0.447	0.385	0.332	0.288	0.249	0.187	0.14
OUTA	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0	0
EXTR	0.353	0.372	0.475	0.554	0.615	0.667	0.712	0.75	0.813	0.86

>

radio de partícula=0.5 cm

>

SEMS	0	0.035	0.071	0.106	0.141	0.176	0.212	0.247	0.282	0.317
UNRA	1	0.89	0.7	0.547	0.442	0.362	0.306	0.271	0.229	0.183
DENA	0	0.074	0.2	0.289	0.35	0.397	0.424	0.431	0.446	0.468
OUTA	0	0.039	0.101	0.029	0.045	0.048	0.041	0.03	0.023	0.016
EXTR	0	0	0	0.129	0.151	0.193	0.241	0.285	0.318	0.343

>

SEMS	0.353	0.529	0.705	0.882	1.058	1.411	1.764	2.116	2.822	3.527
UNRA	0.147	0.057	0.015	0	0	0	0	0	0	0
DENA	0.481	0.485	0.457	0.414	0.365	0.284	0.222	0.172	0.104	0.063
OUTA	0.013	0.018	0.013	0.01	0.009	0.007	0.006	0.004	0.003	0.002
EXTR	0.361	0.435	0.519	0.577	0.627	0.709	0.774	0.824	0.894	0.936

>

SEMS	4.233	4.938
UNRA	0	0
DENA	0.038	0.023
OUTA	0.001	0.001
EXTR	0.961	0.977

>

porosidad =0.05

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.822	0.638	0.546	0.492	0.41	0.301	0.232	0.144	0.118
DENA	0	0.126	0.253	0.304	0.325	0.381	0.441	0.464	0.512	0.504
OUTA	0	0.053	0.016	0.009	0.014	0.016	0.013	0.008	0.004	0.005
EXTR	0	0	0.107	0.132	0.151	0.179	0.258	0.312	0.344	0.366

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.055	0.022	0.004	0	0	0	0	0	0
DENA	0.512	0.496	0.472	0.346	0.255	0.188	0.139	0.102	0.075
OUTA	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.422	0.48	0.523	0.651	0.743	0.811	0.86	0.897	0.924

>

porosidad=0.03

```
>
SEMS      0 0.046 0.093 0.139 0.185 0.231 0.347 0.463 0.579 0.694
UNRA      1 0.856 0.76  0.67 0.584 0.554 0.482 0.387 0.313 0.295
DENA      0 0.098 0.148 0.209 0.274 0.285 0.31  0.37 0.418 0.411
OUTA      0 0.035 0.03  0.007 0 0.004 0.009 0.009 0.008 0.006
EXTR      0 0 0.084 0.135 0.147 0.148 0.179 0.222 0.267 0.305
```

```
>
SEMS 0.926 1.157 1.389 2.315 3.241 4.167 5.093 6.019 6.944 7.87
UNRA 0.22 0.138 0.116 0.022 0 0 0 0 0 0
DENA 0.438 0.479 0.468 0.453 0.393 0.327 0.272 0.227 0.189 0.157
OUTA 0.003 0.002 0.003 0.002 0.002 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001
EXTR 0.354 0.382 0.405 0.526 0.607 0.672 0.727 0.772 0.81 0.842
```

>

```
SEMS 8.796 9.722
UNRA 0 0
DENA 0.131 0.109
OUTA 0.001 0.001
EXTR 0.869 0.891
```

>

Sg=10 cm²/gr oro

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.917	0.771	0.676	0.597	0.543	0.442	0.343	0.298	0.254
DENA	0	0.055	0.153	0.206	0.257	0.286	0.334	0.395	0.408	0.42
OUTA	0	0.017	0.04	0.015	0.005	0.006	0.011	0.011	0.008	0.006
EXTR	0	0	0.048	0.12	0.145	0.154	0.198	0.254	0.304	0.339

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.151	0.113	0.073	0	0	0	0	0	0
DENA	0.467	0.462	0.465	0.415	0.326	0.256	0.201	0.158	0.124
OUTA	0.003	0.004	0.004	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.381	0.412	0.451	0.585	0.673	0.743	0.798	0.842	0.876

>

Sg=2 cm²/gr oro

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.975	0.898	0.81	0.729	0.658	0.523	0.426	0.354	0.292
DENA	0	0.016	0.067	0.122	0.17	0.212	0.289	0.341	0.376	0.406
OUTA	0	0.004	0.018	0.021	0.018	0.014	0.007	0.008	0.009	0.007
EXTR	0	0	0.014	0.05	0.09	0.125	0.179	0.216	0.259	0.3

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.207	0.142	0.095	0.011	0	0	0	0	0
DENA	0.435	0.452	0.458	0.416	0.336	0.265	0.208	0.163	0.128
OUTA	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.362	0.403	0.438	0.573	0.663	0.734	0.791	0.836	0.872

>

concentración de oxígeno=1.23e-8 mol/cm³

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.938	0.865	0.819	0.779	0.728	0.613	0.551	0.505	0.431
DENA	0	0.031	0.075	0.088	0.102	0.135	0.212	0.232	0.24	0.288
OUTA	0	0.011	0.031	0.027	0.013	0.003	0.002	0.005	0.007	0.007
EXTR	0	0	0.031	0.091	0.141	0.167	0.174	0.19	0.216	0.25

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.321	0.276	0.215	0.071	0.014	0	0	0	0
DENA	0.355	0.355	0.372	0.393	0.356	0.295	0.234	0.184	0.145
OUTA	0.007	0.006	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.322	0.386	0.431	0.524	0.632	0.705	0.766	0.815	0.855

>

concentración de cianuro =1e-7 mol/cm³

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.929	0.847	0.8	0.747	0.68	0.564	0.514	0.427	0.347
DENA	0	0.038	0.087	0.099	0.128	0.178	0.249	0.253	0.307	0.363
OUTA	0	0.014	0.036	0.026	0.008	0.001	0.004	0.007	0.008	0.008
EXTR	0	0	0.038	0.107	0.154	0.168	0.173	0.196	0.232	0.274

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.272	0.203	0.129	0.021	0	0	0	0	0
DENA	0.389	0.408	0.44	0.423	0.35	0.276	0.218	0.171	0.134
OUTA	0.007	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.351	0.406	0.435	0.553	0.65	0.723	0.782	0.829	0.866

>

concentración de oxígeno = $1.23e-8$ mol/cm³

concentración de cianuro = $1e-7$ mol/cm³

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.969	0.937	0.914	0.892	0.87	0.822	0.793	0.772	0.75
DENA	0	0.01	0.024	0.035	0.043	0.049	0.058	0.059	0.066	0.075
OUTA	0	0.004	0.01	0.012	0.013	0.013	0.011	0.003	0.001	0.001
EXTR	0	0	0.01	0.029	0.052	0.077	0.138	0.181	0.192	0.198

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944	7.87
UNRA	0.706	0.663	0.62	0.516	0.441	0.37	0.31	0.274	0.235	0.199
DENA	0.091	0.106	0.118	0.124	0.142	0.155	0.155	0.144	0.145	0.146
OUTA	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.212	0.228	0.245	0.331	0.408	0.484	0.561	0.602	0.63	0.656

>

SEMS	8.796	9.722	10.65	11.57	12.5	13.43
UNRA	0.165	0.131	0.115	0.098	0.08	0.063
DENA	0.146	0.145	0.128	0.118	0.112	0.108
OUTA	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
EXTR	0.683	0.709	0.741	0.773	0.8	0.825

flujo de solución=3e-4 cm³/cm².s

>

SEMS	0	0.046	0.091	0.137	0.183	0.228	0.342	0.456	0.57	0.685
UNRA	1	0.927	0.816	0.721	0.637	0.576	0.501	0.406	0.325	0.299
DENA	0	0.052	0.125	0.188	0.246	0.285	0.315	0.376	0.431	0.432
OUTA	0	0.015	0.061	0.046	0.014	0.005	0.014	0.017	0.017	0.013
EXTR	0	0	0	0.065	0.118	0.135	0.151	0.188	0.23	0.27

>

SEMS	0.913	1.141	1.369	2.282	3.194	4.107	5.02	5.933	6.845	7.758
UNRA	0.225	0.141	0.116	0.021	0	0	0	0	0	0
DENA	0.459	0.502	0.493	0.481	0.421	0.356	0.302	0.257	0.218	0.185
OUTA	0.007	0.004	0.005	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
EXTR	0.324	0.355	0.378	0.496	0.576	0.641	0.696	0.742	0.781	0.814

>

SEMS	8.671	9.583
UNRA	0	0
DENA	0.157	0.133
OUTA	0.001	0.001
EXTR	0.842	0.866

flujo de solución=12e-4 cm³/cm².s

>

SEMS	0	0.047	0.094	0.142	0.189	0.236	0.354	0.472	0.59	0.708
UNRA	1	0.741	0.562	0.513	0.425	0.332	0.274	0.18	0.124	0.096
DENA	0	0.168	0.293	0.299	0.353	0.421	0.423	0.467	0.482	0.475
OUTA	0	0.029	0.003	0.009	0.01	0.01	0.006	0.003	0.003	0.003
EXTR	0	0.083	0.14	0.16	0.196	0.235	0.316	0.36	0.385	0.415

>

SEMS	0.944	1.179	1.415	2.359	3.302	4.246	5.19
UNRA	0.027	0.011	0	0	0	0	0
DENA	0.484	0.449	0.416	0.281	0.191	0.129	0.087
OUTA	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0
EXTR	0.485	0.541	0.583	0.718	0.808	0.87	0.912

>

altura de pila=400 cm

>

SEMS	0	0.046	0.093	0.139	0.185	0.231	0.347	0.463	0.579	0.694
UNRA	1	0.787	0.648	0.558	0.534	0.488	0.336	0.299	0.25	0.189
DENA	0	0.143	0.236	0.295	0.29	0.312	0.42	0.421	0.436	0.465
OUTA	0	0.03	0.005	0.002	0.005	0.006	0.007	0.004	0.003	0.002
EXTR	0	0.051	0.13	0.14	0.152	0.173	0.234	0.291	0.329	0.355

>

SEMS	0.926	1.157	1.389	2.315	3.241	4.167	5.093	6.019	6.944
UNRA	0.12	0.077	0.028	0	0	0	0	0	0
DENA	0.482	0.482	0.494	0.401	0.314	0.246	0.192	0.151	0.118
OUTA	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0
EXTR	0.388	0.429	0.475	0.598	0.686	0.754	0.807	0.849	0.882

>

altura de pila=1200 cm

>

SEMS	0	0.069	0.139	0.208	0.278	0.347	0.521	0.694	0.868	1.042
UNRA	1	0.81	0.62	0.53	0.454	0.367	0.279	0.187	0.123	0.096
DENA	0	0.129	0.256	0.303	0.343	0.403	0.437	0.478	0.499	0.492
OUTA	0	0.065	0.011	0.012	0.018	0.019	0.012	0.007	0.005	0.007
EXTR	0	0	0.124	0.141	0.168	0.204	0.29	0.34	0.368	0.396

>

SEMS	1.389	1.736	2.083	3.472	4.861	6.25	7.639
UNRA	0.028	0.01	0	0	0	0	0
DENA	0.501	0.466	0.432	0.298	0.207	0.143	0.099
OUTA	0.007	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
EXTR	0.465	0.522	0.565	0.7	0.792	0.856	0.9

>

Apéndice E-3

Parámetros adimensionales y de transporte

Se presenta a continuación los valores de los parámetros de transporte y grupos adimensionales para las diferentes corridas del programa. En primer lugar aparecen los valores para la corrida típica o de referencia generada a partir del conjunto de datos de la Tabla 1 de la sección de resultados. A continuación, vienen los valores que resultaron en las demás corridas, cada una definida por la o las variables que se modifican en relación a la referencia. Para mayor claridad se registran solo los valores que se modifican en relación a la referencia.

Corrida de referencia

	$f_w k_g \frac{cm}{s}$	$D_{app} \frac{cm^2}{s}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	0.32×10^{-4}	0.45×10^{-8}	0.10×10^3	0.71×10^4	0.80×10^4
O ₂	0.37×10^{-4}	0.56×10^{-8}	0.93×10^2	0.66×10^4	0.63×10^4
OH ⁻	0.42×10^{-4}	0.69×10^{-8}	0.83×10^2	0.61×10^4	0.52×10^4
Au(CN) ₂ ⁻	0.17×10^{-4}	0.18×10^{-8}	0.16×10^3	0.96×10^4	0.20×10^5

$$r_p = 1.5 \text{ cm}$$

	$f_w k_g \frac{cm}{s}$	$D_{app} \frac{cm^2}{s}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	0.47×10^{-4}	0.57×10^{-8}	0.14×10^3	0.12×10^5	0.27×10^5
O ₂	0.54×10^{-4}	0.71×10^{-8}	0.12×10^3	0.11×10^5	0.22×10^5
OH ⁻	0.62×10^{-4}	0.87×10^{-8}	0.11×10^3	0.11×10^5	0.18×10^5
Au(CN) ₂ ⁻	0.25×10^{-4}	0.23×10^{-8}	0.12×10^3	0.17×10^5	0.68×10^5

$$r_p = 0.5 \text{ cm}$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	0.28×10^{-4}	0.30×10^{-8}	0.63×10^2	0.45×10^4	0.19×10^4
O ₂	0.32×10^{-4}	0.38×10^{-8}	0.56×10^2	0.42×10^4	0.15×10^4
OH ⁻	0.37×10^{-4}	0.47×10^{-8}	0.50×10^2	0.39×10^4	0.12×10^4
Au(CN) ₂ ⁻	0.15×10^{-4}	0.12×10^{-8}	0.99×10^2	0.61×10^4	0.48×10^4

$$\varepsilon_o = 0.05$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	0.70×10^{-8}	0.83×10^2	0.45×10^4	0.51×10^4
O ₂	"	0.88×10^{-8}	0.74×10^2	0.42×10^4	0.41×10^4
OH ⁻	"	0.11×10^{-7}	0.66×10^2	0.39×10^4	0.33×10^4
Au(CN) ₂ ⁻	"	0.28×10^{-8}	0.13×10^3	0.62×10^4	0.13×10^5

$$\varepsilon_o = 0.03$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	0.25×10^{-8}	0.14×10^3	0.13×10^5	0.14×10^5
O ₂	"	0.32×10^{-8}	0.12×10^3	0.12×10^5	0.11×10^5
OH ⁻	"	0.39×10^{-8}	0.11×10^3	0.11×10^5	0.92×10^4
Au(CN) ₂ ⁻	"	0.10×10^{-8}	0.22×10^3	0.17×10^5	0.35×10^5

$$u_s = 12 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^2.\text{s}$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	0.53×10^{-4}	0.70×10^{-8}	0.83×10^2	0.75×10^4	0.10×10^5
O ₂	0.61×10^{-4}	0.88×10^{-8}	0.74×10^2	0.70×10^4	0.80×10^4
OH ⁻	0.70×10^{-4}	0.11×10^{-7}	0.66×10^2	0.65×10^4	0.65×10^4
Au(CN) ₂ ⁻	0.29×10^{-4}	0.28×10^{-8}	0.13×10^3	0.10×10^5	0.25×10^5

$L = 400 \text{ cm}$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	0.16×10^5
O ₂	"	"	"	"	0.13×10^5
OH ⁻	"	"	"	"	0.10×10^5
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	"	"	0.40×10^5

$L = 1200 \text{ cm}$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	0.53×10^4
O ₂	"	"	"	"	0.42×10^4
OH ⁻	"	"	"	"	0.34×10^4
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	"	"	0.13×10^5

$$S_g = 10 \text{ cm}^2/\text{gr oro}$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	0.23 x 10 ²	Ref.	Ref.
O ₂	"	"	0.21 x 10 ²	"	"
OH ⁻	"	"	0.19 x 10 ²	"	"
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	0.37 x 10 ²	"	"

$$S_g = 2 \text{ cm}^2/\text{gr oro}$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	0.10 x 10 ²	Ref.	Ref.
O ₂	"	"	0.93 x 10 ¹	"	"
OH ⁻	"	"	0.83 x 10 ¹	"	"
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	0.16 x 10 ²	"	"

$$C_{O_2}^f = 1.23 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	0.47 x 10 ²	Ref.	Ref.
O ₂	"	"	0.19 x 10 ³	"	"
OH ⁻	"	"	0.38 x 10 ²	"	"
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	0.74 x 10 ²	"	"

$$C_{CN}^f = 1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^3$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	0.23 x 10 ³	Ref.	Ref.
O ₂	"	"	0.46 x 10 ²	"	"
OH ⁻	"	"	0.41 x 10 ²	"	"
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	0.80 x 10 ²	"	"

$$C_{CN}^f = 1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/cm}^3$$

$$C_{O_2}^f = 1.23 \times 10^{-8} \text{ mol/cm}^3$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.	Ref.
O ₂	"	"	Ref.	"	"
OH ⁻	"	"	0.19 x 10 ²	"	"
Au(CN) ₂ ⁻	"	"	0.37 x 10 ²	"	"

$$u_s = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$$

	$f_w k_g \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	$D_{app} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	Thiele	Biot I	Biot II
CN ⁻	0.19 x 10 ⁻⁴	0.30 x 10 ⁻⁸	0.13 x 10 ³	0.62 x 10 ⁴	0.59 x 10 ⁴
O ₂	0.22 x 10 ⁻⁴	0.38 x 10 ⁻⁸	0.11 x 10 ³	0.58 x 10 ⁴	0.47 x 10 ⁴
OH ⁻	0.25 x 10 ⁻⁴	0.47 x 10 ⁻⁸	0.10 x 10 ³	0.54 x 10 ⁴	0.39 x 10 ⁴
Au(CN) ₂ ⁻	0.10 x 10 ⁻⁴	0.12 x 10 ⁻⁸	0.20 x 10 ³	0.85 x 10 ⁴	0.15 x 10 ⁵