

13
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"TRANSFERENCIA DE MASA Y MOJADO
EN TERREROS SIMULADOS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA QUIMICA

P R E S E N T A :

NORMA BUSTAMANTE MARTINEZ



MEXICO, D. F.



EXAMENES PROFESIONALES 1999
FAC. DE QUIMICA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Prof. Rodolfo Mora Vallejo

VOCAL: Prof. Enrique Saldivar Guerra

SECRETARIO: Prof. Gretchen T. Lapidus Lavine

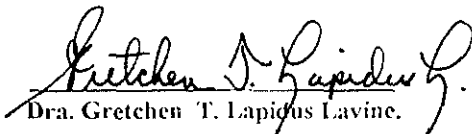
1er. SUPLENTE: Prof. Josefina Elizalde Torres

2do. SUPLENTE: Prof. Mariano Pérez Camacho

LUGAR DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

**Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica
Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa.
Apdo. Postal 55-532, México, D.F. 09340, México.**

Asesor


Dra. Gretchen T. Lapidus Lavine.

Sustentante


Norma Bustamante Martínez

Agradecimientos

Esta tesis esta dedicada a todas las personas que directa o indirectamente me han formado y han estado presentes en el transcurso de mi vida. Son muchos, y aunque no recuerdo sus nombres me han dejado un gran sabor de boca

Comenzare agradeciendo a mi familia, y en especial a mi **MADRE** que es un gran ejemplo de fortaleza y tenacidad, y a quien le dedico con mucho cariño y admiración esta tesis que es el fruto de su esfuerzo por educarme.

A mis hermanos por soportarme y ayudarme cuando es necesario y a mi Tía Lupe por conocer gracias a sus palabras a mi padre.

A la Dra Gretchen T. Lapidus por su guía, confianza y estimación que me profesó, así como por otorgarme las facilidades para el desarrollo experimental de la tesis

A Juve, Plinio, Lore, Perla, José Antonio, Roberto, Héctor y Enrique que me han otorgado su amistad incondicional y han colaborado en mi desarrollo personal e integral como ser humano, al mismo tiempo a mis compañeros de generación y especialmente a los integrantes del grupo 8.

A la Universidad Nacional Autónoma de México integrada por un gran equipo académico y administrativo que se esfuerza diariamente por compartir sus conocimientos a las nuevas generaciones de profesionistas del país

INDICE

<i>CAPITULO</i>	<i>página</i>
1.0 Introducción	1
2.0 Antecedentes	5
2.1 Lixiviación en terreros	6
2.1.1 Localización y consideraciones climáticas	9
2.1.2 Preparación del mineral: Aplastamiento y Aglomeración.....	9
2.1.3 Aplicación de la solución.....	11
2.1.4 Velocidad de lixiviación.....	13
2.2 Reactores de Escurrimiento ("Trickle Bed").....	18
2.2.1 Características	18
2.2.2 Distribución del Flujo	21
2.2.3 Causas de canalización.....	23
2.2.4 Modelo de Filtración	23
2.2.5 Transferencia de Masa	24
3.0 Sistema y Metodología Experimental	27
3.1 Sistema Experimental.....	28
3.2 Metodología.....	30
4.0 Resultados y Discusión	34
4.1 Escurrimiento en la pared.....	36
4.2 Canalización y distribución Radial.....	39
4.3 Cobertura de Mojado	41
4.4 Transferencia de Masa.....	44
4.5 Cobertura y Difusión interna de la partícula sólida.....	46
5.0 Conclusiones	51
6.0 Bibliografía	53

CAPÍTULO UNO

Introducción

La lixiviación de metales, como oro, plata y cobre, a partir de sus minerales y concentrados constituye una de las operaciones unitarias más importantes dentro de la industria minera. El método consiste en contactar el mineral (fase sólida) con una solución lixivante (fase líquida), la cual contiene reactivos oxidantes y/o complejantes que fomentan la disolución del metal. Particularmente, los procesos actuales de extracción de dichos metales, cianuración o biolixiviación, requieren además la presencia de aire u oxígeno para efectuar la reacción principal

Los procesos previamente mencionados nacieron y continúan llevándose a cabo en reactores de tipo tanque agitado por lotes, lo cual implica una etapa previa de molienda, más o menos fina, y la utilización de cantidades elevadas de agua

Recientemente se ha estado implementando la lixiviación en pilas ó terreros, particularmente para minerales de baja ley (bajo contenido del metal de interés) para los cuales no es costeable el método tradicional. Aunque la lixiviación en terreros elimina los requerimientos de molienda y produce soluciones más concentradas, los tiempos de procesamiento aumentan en uno o dos órdenes de magnitud, debido a las diferencias en los tiempos de transporte de los reactivos y productos inter e intrapartícula. Mientras en el tanque agitado las partículas minerales están totalmente rodeadas por la solución lixivante, el flujo en un terrero es parecido a aquel presente en un reactor de escurrimiento ("trickle bed") en donde la superficie externa de la partícula está parcialmente cubierta por el líquido y el resto está en contacto con aire (flujo no saturado)

Aunque se sabe que la velocidad de lixiviación en estos sistemas está controlado por difusión de los reactivos y productos que fluyen dentro de la partícula, debido al mayor tamaño de las partículas, existe un efecto muy marcado del área de mojado o

cobertura sobre el fenómeno de difusión dentro de la partícula y la canalización del líquido. Una distribución inadecuada del flujo líquido hasta puede “cegar” una parte del terrero [1].

Tomando en cuenta los problemas que causa la falta de conocimiento sobre las consecuencias del efecto de área y cobertura de mojado en un proceso de lixiviación de terreros, se presenta el actual trabajo, el cual tiene como objetivos implementar una técnica adecuada de estudio, que permita determinar y caracterizar los patrones de flujo y transferencia de masa que ocurren en un proceso de lixiviación de terreros. Para tal propósito se simuló el proceso que ocurre en una lixiviación evaluando los parámetros de canalización, distribución radial del líquido, difusión dentro de la partícula y cobertura de mojado del líquido en el sólido.

El terrero consistió en un lecho empacado de alúmina activada con una altura de 15 cm, el empaque tiene un diámetro de 0.33 – 0.47 cm (la alúmina simula al mineral aglomerado en el terrero) y la solución lixivante se sustituye por una solución de sulfato cúprico, la cual se utilizó como el medio trazador debido a sus propiedades ópticas.

Se estudiaron los parámetros bajo la técnica de visualización con ayuda de una cámara digital (Kodak DC25), que captó el comportamiento de distribución radial y canalización dentro del lecho, así como la cobertura de mojado de las partículas. Para el parámetro de cobertura de mojado, la técnica de visualización no fue suficiente, ya que la partícula cuenta con tres dimensiones y solo fue posible captar visualmente dos de ellas. Por esta razón, se utilizó un medio estadístico, el cual consistió en digitalizar cuatro imágenes de un mismo grupo de partículas variando la posición de estas, a las cuales, se les calculó la superficie cubierta del sólido por el líquido utilizando el programa “MATLAB-Imagen Processing” que contabilizó los píxeles de color azul (color característico del

sulfato cúprico) presentes en la partícula sólida, agrupándolas dentro de las tres secciones que constituyen al terrero.

Finalmente, se estudiaron las características de flujo en función del tiempo y el caudal del líquido, evaluando la influencia que tiene estos en los parámetros anteriormente mencionado y determinando la transferencia de masa con respecto a las mismas variables. Con las técnicas empleadas se espera ampliar el conocimiento del comportamiento de flujo en un terrero y del proceso de lixiviación entre la partícula sólida y la solución lixivante, para que en un futuro se mejoren las técnicas de recuperación de metales considerando el resultado de éste estudio, lo cual permitirá aumentar la tasa de recuperación de los metales a través del proceso de lixiviación en terreros de mineral, y tomando en cuenta las ventajas menor costo de producción, reducción de los problemas ambientales y ser útil para menas con baja grado (baja ley) de oro

CAPÍTULO DOS

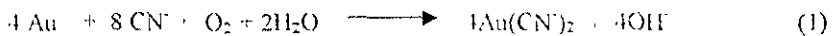
Antecedentes

La tecnología de lixiviación en terreros minerales ha tenido un gran desarrollo desde la pasada década. Desde ese tiempo se han implementado métodos efectivos de tratamiento de minerales oxidados de oro y de plata cuando estos se encuentran en pequeños depósitos superficiales de metales preciosos. La lixiviación de terreros tiene varias ventajas con respecto al método tradicional (quebrado, molienda y lixiviación agitada). En general, estas ventajas incluyen simplicidad, bajo capital y costos de operación, corto tiempo de arranque y menos regulaciones concernientes al medio ambiente.

Debido a que el tamaño de partícula utilizado es más grande (un promedio de 2.0 cm de diámetro), los procesos que emplean la lixiviación en terreros no requieren etapas de molienda ni de filtración. Se procesan actualmente depósitos de oro con ley tan baja como 0.02 oz/ton (0.65 g/ton). En las Figuras 1 y 2 se presenta un proceso de lixiviación en terrero.

Originalmente muchos de los depósitos descubiertos no podían ser procesados por una técnica tradicional de lixiviación en terreros, porque la arcilla o finos generados durante el quebrado impiden la filtración uniforme de la solución a través de los terreros de mineral. Sin embargo, a mitad de los años 70, la tecnología de lixiviación en terreros se perfeccionó para minerales de baja ley y depósitos arcillosos, con el método de aglomeración, siendo alentados por un incremento en el precio del oro [2].

El principio básico para el proceso de lixiviación con cianuro ó cianuración es la formación de complejos muy estables con el oro, plata y otros metales en una solución alcalina diluida de cianuro. La reacción iónica que ha sido tradicionalmente aceptada para la disolución del oro en el mineral por cianuro es la siguiente (ecuación de Elsner):



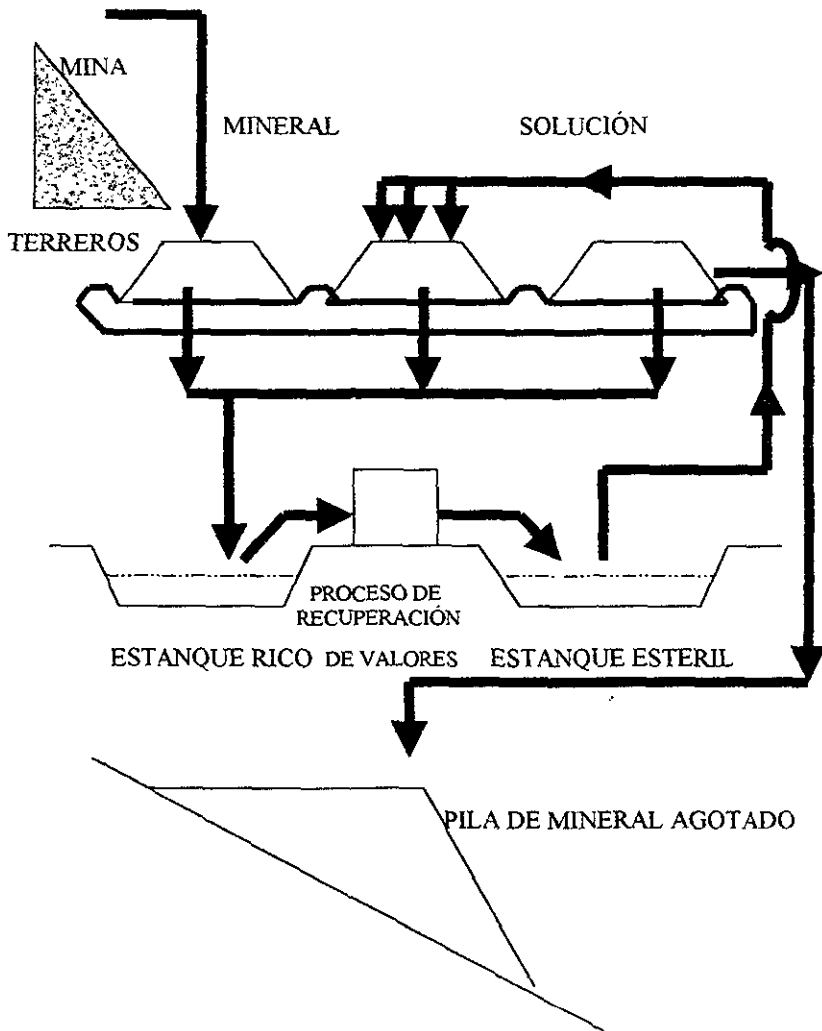


Figura 1
PROCESO DE LIXIVIACIÓN EN TERREROS



Figura 2. Muestra del proceso de lixiviación en terrero

La velocidad de la reacción de oro, depende de la concentración de cianuro de sodio (NaCN) y la alcalinidad de la solución. El pH óptimo de la solución lixivante que evita que el cianuro (CN^-) se convierta en ácido cianhídrico y que también aumente el área de estabilidad del complejo dicianurato de oro, es de 10,3.

Se requiere que el mineral cumpla las siguientes características, si se dispondrá para una lixiviación en terreros

- El contenido de metales preciosos en el mineral sea bajo,
- El mineral tenga partículas pequeñas o quebradas (aproximadamente 2 cm de diámetro).
- El mineral contenga poros y la roca sea permeable.
- El mineral este libre de carbonatos o material orgánico que pueda secuestrar los complejos de cianuro

- Mineral relativamente libre de finos y arcilla que impidan la filtración uniforme de la solución (el pretratamiento de aglomeración es necesario si la cantidad de finos o arcilla es alta en la alimentación)

2.1.1 LOCALIZACIÓN Y CONSIDERACIONES CLIMATICAS [2].

Para tener una ubicación adecuada, es necesario considerar diversos factores. Primero, que el depósito sea de baja ley y esté disponible para lixivarse. El segundo factor importante es la topografía y un adecuado clima para el diseño de la lixiviación en terreros. La operación de lixiviación en terreros, se encuentra frecuentemente restringida en un rango de climas moderados a temperaturas bajas.

El mantenimiento químicamente constante de la solución lixivante depende de la hidrología de la zona que está relacionado con su precipitación. Los climas áridos con alta velocidad de evaporación pueden causar un requerimiento muy alto de agua, para mantener el volumen necesario de solución dentro del circuito de lixiviación. Al contrario, en las áreas de alta precipitación el circuito presenta un continuo incremento en el volumen de la solución, en este caso, puede ser necesario la neutralización y descargar de la solución en el circuito.

2.1.2 PREPARACION DEL MINERAL QUEBRADO Y AGLOMERACIÓN [2].

La preparación del mineral también influye sobre la operación y construcción del terrero. Generalmente, los mejores minerales para lixivarse son de óxidos naturales, por lo que se requiere que el mineral sea de un tamaño pequeño de partícula para permitir mayor contacto entre la solución y la partícula. El mineral preparado puede alcanzar el tamaño adecuado mediante algunos tratamientos como son el quebrado, el quebrado-aglomeración o aglomeración solamente (para granos finos o desechos).

El principal objetivo de la preparación del mineral para la lixiviación en terreros es, producir un mineral lo suficientemente fino que permita un buen contacto entre la solución y los metales y, tener un mineral permeable lo bastante estable para permitir una velocidad adecuada de filtración a través del terrero. Estos requisitos pueden ser contradictorios en algunos casos, donde el tamaño óptimo del lixiviado resulta con una permeabilidad baja.

El mineral de oro y plata puede contener una cantidad excesiva de arcilla y finos generados por el quebrado. La presencia excesiva de limo (generalmente menor que 50 micron ó 270 Tyler mesh, medida de la partícula tamizada), provoca una filtración lenta de la solución lixivante causando canalización, producción baja ó áreas sin lixivarse dentro del terrero (cegamiento). Esto podría dar como resultado, largos periodos de lixiviación y extracciones pobres. En casos extremos, la arcilla o el limo pueden tapar completamente el terrero, causando que la solución lixivante corra por los costados y que no penetre en el mineral

El problema de la lixiviación en terreros minerales que contienen finos puede agravarse durante el apilamiento y preparación del terrero, concentrando los finos en el centro de la pila y los fragmentos grandes de la roca en las inclinaciones bajas y bases de esta. La segregación en áreas o zonas marcadas con diferente permeabilidad, provoca que la solución lixivante siga el camino de menor resistencia, por lo que la solución desciende por los gránulos del mineral evitando pasar o humedeciendo escasamente aquellas áreas que están en contacto con una gran cantidad de finos o limo. Se presenta algunos resultados de diferentes tipos de aglomeración en la Figura 3, [2]

2 1.3 APLICACIÓN DE LA SOLUCIÓN [2]

La solución lixivante se transporta desde el tanque de la solución al terrero por un sistema de bombeo (Figura 1) para dar la presión suficiente al sistema de rociado. En la práctica, la aplicación de la solución puede realizarse por diferentes métodos (por ejemplo, por inundación o estancamiento, utilizando “wobblers” o “wiggers”, por sistemas de rociado regular y de irrigación por goteo). El método de inundación, aun cuando tiene pérdidas por evaporación se usa solamente si la permeabilidad del terrero es baja. Las velocidades típicas de aplicación son desde 0.003 a 0.0005 gpm/ft^2 ($1.75\text{E}-5$ a $2.9\text{E}-6$ $\text{l/s}/\text{m}^2$). Las velocidades normales de aplicación de la solución lixivante a través del terrero requieren una permeabilidad mínima de 10^{-4} cm/seg de mineral dentro del terrero.

La reacción química en la cual los metales se disuelven en la solución de cianuro, requiere una oxigenación proveniente del aire, el tiempo de rociado también aumenta la cantidad de oxígeno presente gracias al arrastre de este por la solución lixivante.

El sistema de administración de la solución lixivante, se compone de una red de tuberías enterradas o que se encuentra encima del terrero. Cuando se lixivía un terrero, el patrón de flujo desarrollado por la solución es, en algunas partes, expuesto a una menor pérdida de solución de cianuro que en otras. La elección correcta de un sistema de aplicación, junto con una velocidad adecuada de flujo, puede minimizar los circuitos y promover que la humedad del terrero no sea desigual e inadecuada.

ANTES DE AGLOMERAR

DESPUÉS DE AGLOMERADO



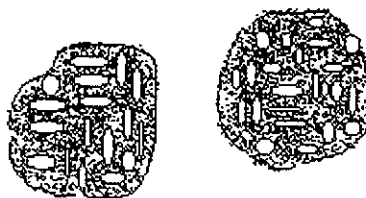
a) Material granular con gran porcentaje de finos.



a) Los finos son aglomerado dentro de las partículas granulares, usando cemento portland como aglutinante.



b) Material de finos, por ejemplo, desechos los cuales no tienen arcilla.



b) Los aglomerados se forman comprimiendo los finos con un aglutinante, (cemento portland).



c) El material arcilloso con metal en un medio de baja permeabilidad



c) aglomeración formada por aglutinación de finos. Después se modificaron las propiedades de la arcilla usando cal y cemento portland

Figura 3
EFECTOS DE LA AGLOMERACION

La aplicación óptima de la solución puede variar de acuerdo con la selección de tipos y patrones de rociado, junto con la selección apropiada de presiones y espaciado. La elección del rociado puede dar una velocidad de aplicación uniforme dentro de los radios de operación. La Figura 4 muestra los conceptos básicos necesarios para conseguir el diseño de patrón de flujo adecuado, combinando lo anterior.

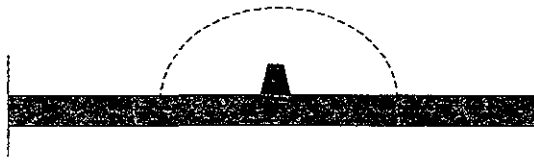
2.1.4 VELOCIDAD DE LIXIVIACIÓN[2].

Como se mencionó anteriormente, la optimización de los tiempos de lixiviación requiere conocimientos de los fenómenos que controlan la velocidad de extracción de los metales. Esta información se plasma en modelos matemáticos que permiten predecir la operación del terrero bajo diferentes condiciones. En el desarrollo del estudio de terreros surgieron varios modelos que se enfocan en los tiempos de lixiviación y difusión de la solución lixivante a través de la partícula, entre los cuales encontramos los siguientes.

Roman [3] modeló el proceso de lixiviación en pilas de óxido de cobre. Este modelo fue usado para escalar con datos de laboratorio las operaciones de lixiviación en pilas, siendo aplicable en procesos donde la velocidad de lixiviación es controlada por una deficiencia en las reacciones o de difusión del reactivo a través de la roca lixiviada. La difusión de los productos de reacción fuera de la partícula es más rápida que la difusión (interna) de un reactivo dentro de esta.

Comparo los efectos de las variables controladas (concentración del ácido, altura de la pila, tamaño de la partícula y tiempo de lixiviación) en la recuperación del mineral. En este estudio no se considera la canalización como un efecto que afecte la recuperación.

Posteriormente, Roman [4] señaló las características determinantes que influyen sobre la operación del terrero, dividiendo este en dos modelos: de flujo y fisicoquímico.



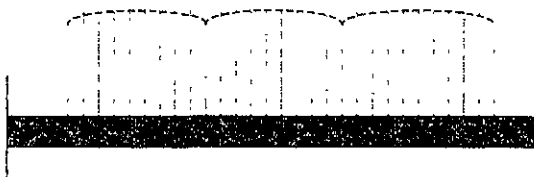
a) Aplicación Uniforme De Rociado



B) Rociado No Superpuesto



C) Rociado Superpuesto



D) Aplicación De La Solución De Forma Sobrepuesta

Figura 4
APLICACIÓN DE ROCIADO

En el modelo fisicoquímico se determinaron cuatro pasos que podrían limitar la producción de un terrero.

Pasos determinantes de la velocidad

- 1 La difusión de un reactivo a través de una película estancada alrededor de una partícula individual
- 2 La difusión de un reactivo dentro de la partícula (concepto de núcleo decreciente).
- 3 La reacción química en la interface mineral-solución
- 4 Difusión de un producto de la reacción (complejo del metal) desde el sitio de reacción al seno de la solución

Tomando en cuenta los anteriores pasos, se procedió a la comparación de tres diferentes modelos de difusión, que aplican los términos de concentración del reactivo y de cobre lixiviado en función de la difusión interna de la partícula. El modelo desarrollado por Bartlett [5] (Figura 5a) supone una velocidad de reacción relativamente lenta. El resultado es una zona de reacción donde los granos de mineral se encuentran en varios estados de lixiviación. El modelo de Braun, Lewis y Wadsworth [6]. (Figura 5b) supone que todas las partículas dentro de la zona de reacción se encuentran en el mismo estado de lixiviación, por lo tanto, es aplicable cuando la zona de reacción es pequeña, por lo que la velocidad de reacción es rápida comparada con el modelo de Bartlett. Por último, en el modelo desarrollado por Roman y Bennner [7], (Figura 5c) se da un paso más, se supone una velocidad de reacción química instantánea, la cual se aplica a minerales que contienen óxidos.

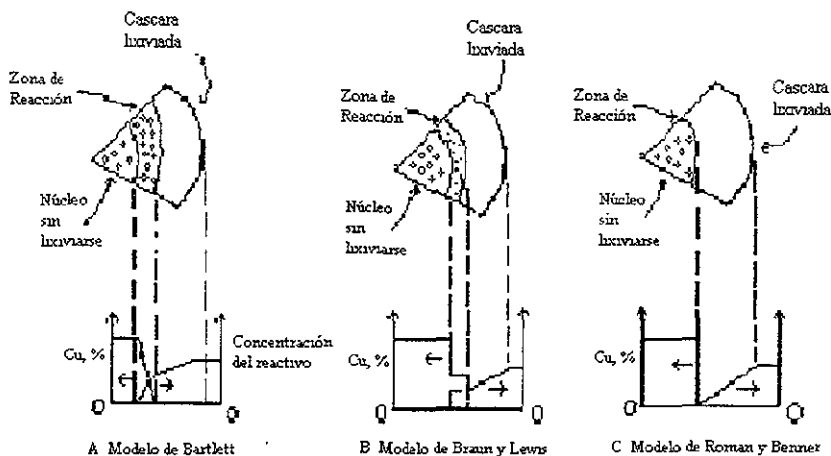


Figura 5. Modelos Físicoquímicos de una partícula individual lixiviada.

Estos modelos sólo describen la partícula simple lixiviada y su mecanismo de difusión interna. Aunque se puede considerar que los modelos que mejor se acercan a la realidad de un proceso de lixiviación de terreros son los de Bartlett y Braun, porque toman en cuenta los coeficientes de transferencia de masa en el mecanismo de difusión interna de la partícula, aunque consideran una cobertura total de esta, determinando de cierta forma una velocidad de lixiviación, la cual nunca es instantánea y depende de la configuración de la partícula, así como del flujo y la altura del terrero.

Otros trabajos realizados por Benner y Roman [8], describen la difusión en un mineral de cobre considerando el modelo de difusión de "núcleo decreciente". Desarrollaron un modelo de lixiviación en terrero utilizable a nivel laboratorio y que simula los efectos causados por cambios en las variables de operación en el terrero.

Sánchez-Chacon [1], modeló la lixiviación en terreros por cianuración para la extracción de oro. Consideró las condiciones de flujo, difusividad aparente y transferencia de masa bajo el régimen de un reactor de escurrimiento (trickle bed reactor).

En el modelo se incorporaron las siguientes suposiciones.

1. El terrero es operado en condiciones isotérmicas.
2. La solución lixivante fluye en forma descendente por el terrero con una velocidad uniforme y determinada por la velocidad de flujo de la solución y la retención externa del líquido
3. Considera las partículas porosas de mineral en completo contacto a través de su área externa con la solución lixivante.
4. Se consideran partículas esféricas porosas de tamaño uniforme
5. Dentro de las partículas de mineral, la difusión y la reacción se lleva a cabo simultáneamente en un estado transitorio

Los resultados obtenidos mostraron que la velocidad de extracción de oro depende de la difusión del complejo formado, por lo que el área de mojado, el tamaño y la porosidad de partícula tienen un papel importante en el proceso.

En resumen, los parámetros de patrón de flujo, transferencia de masa, canalización, distribución radial, difusión y cobertura de mojado de la partícula han sido poco estudiados en forma general como variables que influyen en la recuperación del mineral en un proceso de lixiviación en terreros, por lo que el presente trabajo plantea estudiar bajo la técnica de visualización los anteriores parámetros como factores que afectan el fenómeno de contacto entre la solución y el mineral. Se propone un estudio macroscópico y visual de un terrero de mineral, simulado por una columna de partículas que se asemejan a las características

(porosidad, tamaño, arreglo y forma del empaque) de un terrero y el comportamiento de la columna, similar a la de un reactor de tipo escurrimiento que se describen a continuación

2.2 REACTORES DE ESCURRIMIENTO (“Trickle Bed”) [9]

En este tipo de reactores, la velocidad del líquido en el rango 1 a 8 l/m²/s es aún baja, pero suficiente para garantizar un mojado satisfactorio externo de las partículas catalíticas. La Tabla 1 presenta los parámetros característicos de los reactores de escurrimiento comparado con otros dos importantes reactores: reactor de lecho dispersado y reactor de lecho fijo inundado.

Tabla 1[10].

Valores de los Parámetros Característicos en Reactores de tres Fases			
	Dispersión	Reactor de Escurrimiento	Lecho Fijo Inundado
Carga de catalizador (% vol.)	~0.01	~0.5	~0.5
Líquido retenido	0.8	0.05-0.2	0.4
Gas retenido	0.2	0.45-0.3	0.1
Tamaño de la partícula (mm)	0.1	1-5	1-5
Área externa del catalizador (m ²)	500	1000	1000
Factor de eficiencia del catalizador	1	<1	<1
Área interfacial gas-líquido (m ²)	400	200-600	200
Presión máxima (atm)	80	Posibles altas presiones	
Volumen máximo del reactor (m ³)	50	200	200
Consumo de energía (W/m ³)	1000	100-1000	100-1000

El sistema se caracteriza por tener una serie de pasos de transferencia de calor y masa. En la Figura 6 se ilustra el fenómeno de transferencia de masa y se muestran los perfiles de concentración de productos y reactivos, así como la reacción entre la partícula sólida y los componentes *A* y *B* alimentados en el gas y en el líquido, respectivamente.

Primero se absorbe el reactivo *A* dentro de la fase líquida y éste, reacciona en la superficie del catalizador con el reactivo *B* presente en el líquido. Cuando el catalizador es poroso, ambos reactivos disueltos se difunden dentro de los poros, hacia el centro de la partícula catalítica para llegar a los sitios activos internos del sólido. Los productos de la

reacción se difunden en la dirección opuesta. En el caso de la lixiviación en terreros, los sitios activos del sólido son el metal por extraer. En los reactores de escurrimiento, cuando el mojado externo del catalizador es incompleto, el reactivo A puede ser directamente absorbido en el líquido que rellena los poros del catalizador por el fenómeno de capilaridad. En este caso se supone una menor resistencia a la transferencia de masa externa porque la película de líquido está ausente.

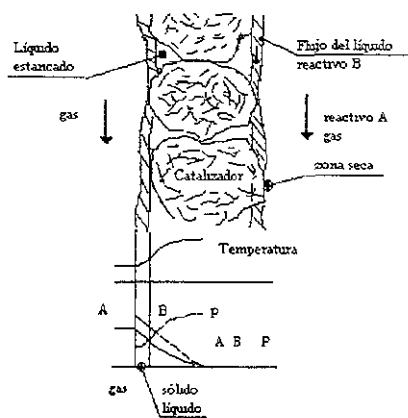


Figura 6 Flujo de goteo en un lecho catalítico. perfiles de concentración y temperaturas

El mojado incompleto del catalizador causa una concentración no uniforme del reactivo en su superficie. A veces la partícula sólida es mojada parcialmente, como un resultado de la distribución insatisfactoria del líquido.

En cuanto al funcionamiento de un reactor químico, la relación entre la salida y la entrada afectan las propiedades del sistema de reacción (cinética, termodinámica, etc.) y por lo tanto el patrón de contacto, y la descripción del patrón de flujo es muy difícil conocer, debido al alto número de mecanismos intrínsecos que controlan este patrón.

La situación es compleja, y en muchos casos, no se pueden conocer los parámetros esenciales de la hidrodinámica que afectan el funcionamiento de este tipo de reactor

Herskowitz [11], Satterfield [12] han propuesto procedimientos de diagnóstico para determinar si el contacto de la fase líquida y el catalizador mojado podrían afectar la velocidad aparente de la reacción.

Mears [13], sugirió un modelo semiempírico denominado “eficiencia de mojado” para usarse como escalamiento. Usó una aproximación física que supone la velocidad de reacción proporcional a la fracción efectiva de mojado de la superficie exterior del sólido, realizada a partir de correlaciones de Puranik y Vogelpohl [14].

Otros trabajos han interpretado η_c (eficiencia de contacto) como una función de otros parámetros. Henry y Gilbert [15] consideraron η_c dependiente del tiempo de retención del líquido, y proponen un modelo llamado “retención externo de líquido”

Whener y Wilhelm [16] consideran como factor importante a la dispersión axial del líquido para explicar la hidrodinámica.

Físicamente el modelo de eficiencia de mojado de Mear parece ser el más realista, especialmente cuando el mojado es incompleto, aunque para simplificar el problema es necesario introducir modelos adecuados

El tipo de mojado de interés en este trabajo, es.

La eficiencia de mojado externa, que se define como la cantidad de área externa en contacto efectivo entre el sólido y el líquido que fluye, ya que casi toda la transferencia de masa entre el líquido interno y el líquido que fluye ocurre en esta área. La eficiencia de mojado externa es diferente del mojado interno, puesto que las zonas del mojado debido al líquido semiestancado contribuyen muy poco a la velocidad de transferencia de masa

Con lo anterior, si se supone un modelo de mojado externo total de la partícula sólida, entonces, no se considera la existencia de una eficiencia de mojado parcial, lo cual da como resultado una menor difusión interna [17]

Como una consecuencia, las mediciones de la difusividad interna de la partícula sólida en empaques parcialmente mojados de reactores de escurrimiento, resultan en una relación D_{app}/D_{eff} menor que uno (D_{app} es la difusión aparente en el interior de la partícula en un reactor de escurrimiento, determinado por medio de una técnica de trazado, y D_{eff} es la difusión efectiva del trazador dentro de la partícula medida cuando está completamente mojada por el líquido)

2.2.2 DISTRIBUCIÓN DEL FLUJO

El goteo de líquido a través de la cama empacada se divide en diferentes canales o arroyos, que moja la superficie del empaque. El número, el tamaño y dirección de los canales que salen de los puntos de contacto entre las partículas depende de las propiedades del empaque (geometría, propiedades de la superficie, etc.), gobernado por la accesibilidad local del empaque. El agrupamiento de todos estos canales elementales, generados por el patrón de flujo, son característicos de un flujo del líquido mal distribuido

La importancia de una buena distribución del flujo de líquido en un reactor de lecho fijo fue planteada primeramente por Ross [18], donde cuantifico la distribución del flujo en reactores comerciales por medio de trazadores

Otra forma de medir la distribución del líquido es a partir de la eficiencia de mojado, definida como la fracción de superficie externa de la partícula sólida que es cubierta por el líquido. La importancia de la eficiencia de mojado se observa en el caso de

un sistema con un líquido no volátil, donde el líquido penetra en la partícula sólida parcialmente húmeda y solamente a través de la parte mojada

El problema de goteo se representa si se considera un proceso de filtración. El modelo de filtración propuesto por Hammersley [19], define el paso de un fluido a través de una red de interconexiones de conductos, encontrando algunos bloqueados al azar. La accesibilidad del lecho empacado por el líquido está determinada por el estado local de los poros de irrigación y por la conexión entre los dos puntos próximos

Algunos patrones de distribución pueden cuantificarse por ciertos parámetros característicos, comenzando con la fracción de conexiones entre las estructuras del modelo de filtración. Esta fracción corresponde también a la fracción del empaque irrigado conocido como la eficiencia de mojado f_w . Ninguno de los estudios disponibles en la literatura están relacionados directamente con la efectividad de dispersión en la partícula sólida. Bases conservadoras de diseño pueden suponerse en zonas donde la distribución es uniforme y estable, obteniendo una eficiencia de contacto del sólido sólo parcial.

El escurrimiento en la pared también ha sido objeto de estudio. Herskowitz [20] estableció una serie de diámetros de partícula, los cuales contribuyen a evitar un incremento en este parámetro.

2.2.3 CAUSAS DE LA CANALIZACIÓN

La canalización es un problema hidrodinámico, que causa el mal funcionamiento en el reactor

Las principales causas de la canalización se deben a un empaque no uniforme del sólido, a la velocidad de masa baja, a la escasa o la defectuosa distribución del líquido, y a un catalizador sucio. Algunas consecuencias son las siguientes

- Las fracciones vacías no uniformes pueden provocar canalizaciones y escaso o variable contacto, debido al empaque no uniforme.
- El escaso contacto del catalizador con el líquido se explica por tener velocidades de masa menores de $1.4 \text{ kg/m}^2\text{seg}$ (0.2 cm/seg), causando la canalización.

2.2.4 MODELO DE FILTRACIÓN

La descripción del comportamiento de fluido se puede basar en el modelo de filtración. Este modelo aplica correlaciones obtenidas a partir de la eficiencia de mojado, la dinámica del líquido estancado y finalmente del coeficiente axial de dispersión.

Estructuras de Filtración

La teoría de filtración ha sido desarrollada inicialmente dentro del contexto de retículos regulares. Se considera una geometría desordenada del medio de dispersión (lecho empacado), la cual está representada por una asignación azarosa de enlaces (enlace de filtración) del retículo. La accesibilidad del lecho empacado por el líquido, está determinado por la geometría y arreglo de los poros de irrigación. La diferencia entre un enlace y un retículo se ilustra en la Figura 7. Los retículos corresponden a los puntos de contacto entre las partículas, mientras que el enlace corresponde a la unión de los poros o elemento de volumen de dos puntos próximos de contacto.

En cuanto a la existencia de arroyos y películas, estas se debe a un carácter fenomenológico, debido principalmente al comportamiento del patrón de flujo y al arreglo del empaque, así como a la velocidad del líquido

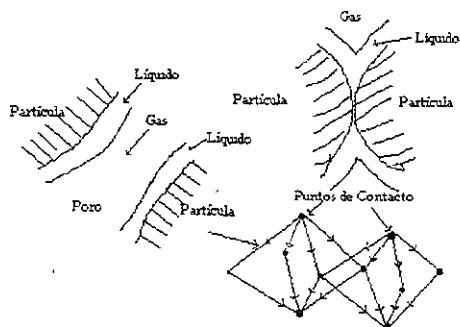


Figura 7. Analogía entre el empaque y retículos

2 2 5 TRANSFERENCIA DE MASA

Las correlaciones de transferencia de masa del líquido en la partícula, se basan en un área total interfacial del sólido, por lo tanto, en las correlaciones incluyen un efecto de mojado parcial. Como en la siguiente correlación,

$$\varepsilon_b Sh Sc^{-1/3} = f(Re_L, Re_g) \quad (3)$$

donde ε_b es la fracción de lecho vacío; Sh , el número de Sherwood ($= K_s dp/D$); Sc , el número de Schmidt (γ/D) y Re_L , Re_g , el número de Reynolds del líquido y el gas ($=Vd/\gamma$); V , la velocidad del fluido, γ , la viscosidad cinemática, D_{ef} , la difusividad efectiva y dp , el diámetro de la partícula

Hay una variedad de modelos escalables de reactores de escurrimiento, que son presentados en la literatura. Todos los modelos suponen una distribución uniforme del fluido sobre la superficie inicial del lecho catalítico, realizada por un distribuidor

adecuado Sin embargo, cada modelo predice diferencias en la dinámica del fluido y en la transferencia de masa

Los modelos pueden clasificarse conforme a las bases hidrodinámicas y premisas fundamentales del modelo. El “modelo de retención de líquido” adopta que el contacto líquido-sólido es proporcional a la cantidad de líquido suministrado por el distribuidor en el lecho El “modelo de mojado” supone que el factor clave que controla la utilización del sólido es el grado de mojado de las partículas por el líquido. El modelo de “transferencia parcial efectiva catalítica de humedad y masa” determina que el contacto puede ser descrito por un modelo de transferencia de masa convencional, tomando en cuenta la fracción del sólido que está mojado El modelo “de efecto estancado del catalizador” indica que el parámetro clave que controla la eficiencia de contacto, es la cantidad de líquido retenido y por lo tanto la transferencia de masa Estudios realizados con trazados por Colombo [16], muestran que la difusividad efectiva de los poros de la partícula a una velocidad baja, en un reactor de escurrimiento es considerada menor que en aquellas partículas previamente mojadas y con velocidades altas de fluido. Ellos observaron que la difusividad efectiva de las partículas, incrementa con respecto a la velocidad del líquido hasta un punto donde esto ya no sólo depende de la velocidad, sino también del contacto de la partícula, esto los lleva a suponer, que la baja difusividad efectiva se debe a que las partículas se encuentran parcialmente mojadas o se localizan junto a una zona de líquido estancado Lo anterior se muestra en la Figura 8, donde se esquematiza el flujo de líquido que desciende por el lecho a altas velocidades en forma de arroyos, los cuales penetran entre las partículas que son bañadas completamente aumentando de esta forma la eficiencia de contacto

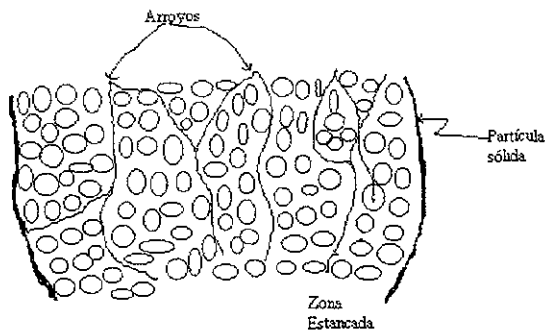


Figura 8. Modelo de estancamiento para la eficiencia de contacto en un reactor de escurrimiento

En resumen, los modelos suministran medios para estudiar el comportamiento y solo pueden ser utilizados en plantas piloto, ya que no hay uno que explique satisfactoriamente el comportamiento de transferencia de masa en un reactor de escurrimiento. Sólo algunos de estos trabajos han dado un paso importante en la definición de las causas por las cuales se presentan los parámetros mencionados anteriormente.

Para finalizar, el proceso de lixiviación en terreros no tiene antecedente de ser estudiado como un reactor de escurrimiento, y tampoco correlaciones que describen o estudian los parámetros de distribución radial del líquido, las canalizaciones, la eficiencia de mojado y la transferencia de masa globalmente.

Con los antecedentes definidos, el presente trabajo desea involucrar y observar la relación entre cada una de las variables que provocan una disminución o aumento en la recuperación de mineral en los procesos de lixiviación en terreros, así como estudiar la naturaleza de los patrones de flujo, e incorporando la técnica de visualización que ofrece la ventaja de observar el desarrollo de estos parámetros sin intervención de alguna reacción química, y también la cualidad de poder estudiar varios parámetros a la vez.

CAPÍTULO TRES

Sistema y

Metodología

Experimental

3.1 SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental, usado en el desarrollo de esta investigación para la simulación del terrero se muestra en la Figura 9. La columna es de acrílico, con una altura de 23 cm y un diámetro externo e interno de 15.5 cm y 14.3 cm respectivamente. La altura del empaque es de 15 cm. Se equipó la columna con un sistema de bombeo y reflujó de la solución, mediante una bomba peristáltica y un tanque de recolección hecho de acrílico. Los flujos de la solución se controlaron con el regulador de revoluciones por minuto (rpm) de la bomba. La temperatura y la presión en el sistema se mantuvieron durante todas las corridas a condiciones ambientales.

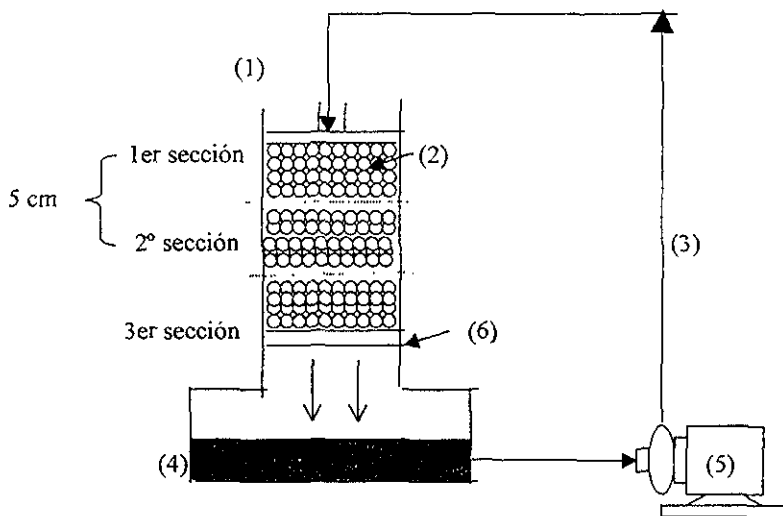


Figura 9. Aparato Experimental

- | | |
|------------------------------|--------------------------------------------|
| (1) Distribuidor del líquido | (4) Tanque de recirculación de la solución |
| (2) Sección empacada | (5) Bomba peristáltica |
| (3) Alimentación | (6) Base de acrílico (desague) |

El material de empaque utilizado fue alúmina activada de 0.33 – 0.47 cm de diámetro, cuyas características físicas se reportan en la Tabla 2. El empaque estuvo soportado por una base de acrílico colocada a 5 cm de la parte inferior de la columna. Esta base contó con una serie de orificios que permitieron un drenaje continuo de la solución por la parte inferior de la columna. El empaque de la columna fue continuo, al final de la experimentación éste se dividió en tres secciones cada una de 5 cm de altura.

Tabla 2. Características del empaque

Material del empaque	Alúmina activada
Forma del empaque	Esférica
Tamaño promedio (cm)	-4+6 (0.33-0.47cm)
Superficie interna (m ² /g)	362 08
Volumen del poro (m ³ /g)	1 168E-02
Espacios del lecho	

La columna se equipó con un distribuidor de flujo, (Figura 10) el cual contiene 9 orificios con un arreglo triangular. Entre la parte superior del lecho y el empaque se tiene una diferencia de 3 cm lo cual permite el manejo y colocación del distribuidor.

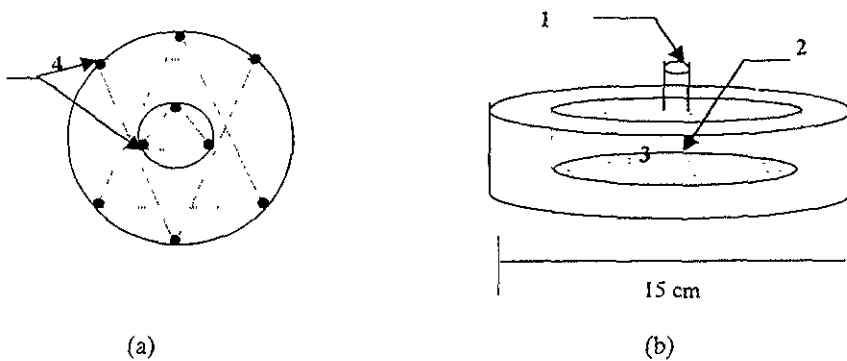


Figura 10. Distribuidor de líquido
 (a) Arreglo triangular, (b) Diseño del distribuidor
 1, Entrada del líquido, 2, Deposito de líquido,
 3, Lugar de los orificios, 4, Salida del flujo líquido

3.2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las variables controladas fueron la velocidad de flujo con la cual se alimenta a la solución y el tiempo. Se fijó el valor de la velocidad del líquido en 0.046, 0.0785 y 0.109 ($l/s/m^2$). Se utilizó solución de sulfato de cobre 0.5M $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (grado técnico) como indicador o trazador visual. Debido a sus características ópticas esta solución permite observar la distribución y mojado de las partículas que componen el lecho.

Las concentraciones de cobre se midieron por el método de Absorción Atómica (AA) de flama. La cobertura superficial de la alúmina y la distribución de la solución en la columna se obtuvieron por medios digitales, utilizando una cámara digital (Kodak DC25). Con las imágenes se procedió a digitalizar y obtener el número de píxeles azules que las conformaban, mediante el programa (MATLAB- Imagen Processing). A la vez, la distribución radial de la solución en la columna se captó digitalmente.

La preparación de la columna comprendió los siguientes pasos:

1. Colocar la alúmina con un arreglo aleatorio en toda la columna, hasta alcanzar una altura de 15 cm (volumen constante).
2. Mojar y drenar previamente la alúmina en su totalidad con agua destilada, para evitar fenómenos de adsorción de cobre por capilaridad.
3. Conexión de las mangueras de alimentación y succión de líquido a la bomba.
4. Una vez preparada la solución, se agregar ésta al receptor de líquido.
5. Colocación del distribuidor en la parte superior del lecho, comunicándolo con el circuito de alimentación.

6. Puesta en marcha del circuito, se verifica que el distribuidor de liquido este completamente lleno de liquido. En caso contrario, se retiran las burbujas de aire que se encuentren dentro del distribuidor.
7. El tiempo se especifica, así como, el flujo a manejar.

A continuación se muestran en la Tabla 3 las condiciones de operación de la columna

Tabla 3. Condiciones de operación de la columna

Temperatura (°C)	20-24
Presión inicial (atm)	0.71
Concentración de la solución (M)	0.5
Velocidad del líquido ($l/s/m^2$)	$\left. \begin{array}{l} 0.046 \\ 0.078 \\ 0.109 \end{array} \right\}$
Superficie de la columna (cm^2)	160.61

Transcurrido el tiempo de dosificado del líquido, se apaga el circuito. Se deja secar el empaque para posteriormente tomar fotografías laterales de la columna, y de distribución de la solución en los costados de la columna, así como, en las tres secciones de la columna.

Las Figuras 11 y 12 muestran un ejemplo de las fotografías tomadas en estas secciones



Figura 11. Imagen transversal de la columna después de aplicada la solución (dos días con un flujo de $0.0785 l/s/m^2$)



Primera sección Segunda sección Tercera sección
Figura 12 Muestra de las fotografías tomadas a las secciones
después de 4 días de aplicación del líquido

Se separa el empaque de cada una de las secciones y se digitaliza las imágenes de la alúmina, por medio de la cámara digital y del programa MATLAB, el cual proporciona la cobertura de mojado de las partículas sólidas en cada una de las secciones.

Metodología para la toma de imágenes de las secciones de la columna

1. Se separa la alúmina correspondiente a cada sección.
2. Una porción de la alúmina se coloca en una caja de acrílico la cual cuenta con un fondo rojo (Figura 13)
3. Se toman cuatro fotos digitales de la alúmina, moviendo la alúmina contenida en la caja previamente para captar los diferentes caras de la partícula sólida
4. Las imágenes se digitalizan y procesan en el programa de MATLAB- Imagen, el cual cuenta la cantidad de píxeles de color azul contenidos en las imágenes. Todas las imágenes pertenecientes a una sección se promedian.

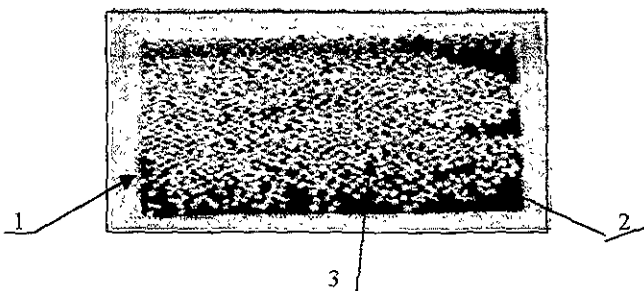


Figura 13. Alúmina activada en el momento de tomar las fotografías para su digitalización. 1, Caja de acrílico de 15x20 cm (medidas internas), 2, Fondo rojo; 3, alúmina cubierta por el trazador (solución de sulfato cúprico)

Terminado lo anterior, la alúmina se lixivia con una solución de ácido sulfúrico al 10% en peso. Este proceso se hace para extraer el cobre que se impregnó en las partículas. Se repite hasta que la partícula este casi blanca o sin muestras de tonalidad azul. Las soluciones lixiviadas con cobre se analizaron por absorción atómica (VARIAN SpectrAA 20).

CAPÍTULO CUATRO

Resultados

La técnica de visualización empleada, permite realizar el estudio y la evaluación del patrón de flujo con base en los efectos provocados por los parámetros de canalización, distribución radial del líquido y eficiencia de mojado de las partículas que componen un terrero. Se simuló el proceso de lixiviación en terreros a partir de un lecho empacado de alúmina activada, y solución de sulfato cúprico, observando las anteriores variables y variando el caudal y tiempo de aplicación del líquido en el proceso.

El sistema experimental puede utilizarse para estudiar exhaustivamente la hidrodinámica del proceso en terreros con un comportamiento similar a un reactor de escurrimiento. Su mayor mérito es la simplicidad de los resultados obtenidos con un balance global de cobre recuperado en la lixiviación de hasta 97%.

Las corridas de experimentación se analizaron por dos diferentes técnicas. Ópticamente, la cual consistió en la cuantificación de la cobertura de las partículas, observación del escurrimiento en las paredes de la columna, canalización y distribución radial de la solución de sulfato cúprico en el lecho. El proceso de cuantificar la cobertura de mojado de las partículas, se hizo utilizando un programa realizado en "MATLAB-Imagen Processing", el cual contabilizó los píxeles de color azul que se encontraban en la imagen, siendo la intensidad del color un factor importante en los resultados.

La segunda técnica utilizada fue analítica, por esta se determinó la transferencia de masa, la cantidad de cobre lixiviado y la difusión de sulfato cúprico dentro de la partícula.

En conjunto las dos técnicas contribuyeron a obtener los resultados que a continuación se presentan.

4.1 ESCURRIMIENTO EN LA PARED

El efecto del parámetro de escurrimiento en la pared de la columna empacada, esta representado por los canales de color azul (característico del sulfato cúprico) que se forman al recorrer el lecho, éste se debe a las características del empaque, como son el arreglo, el premojado de las partículas y al caudal del líquido aplicado. Imágenes típicas de este fenómeno son las que a continuación se presentan.

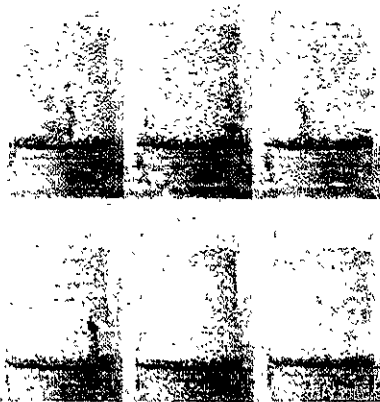


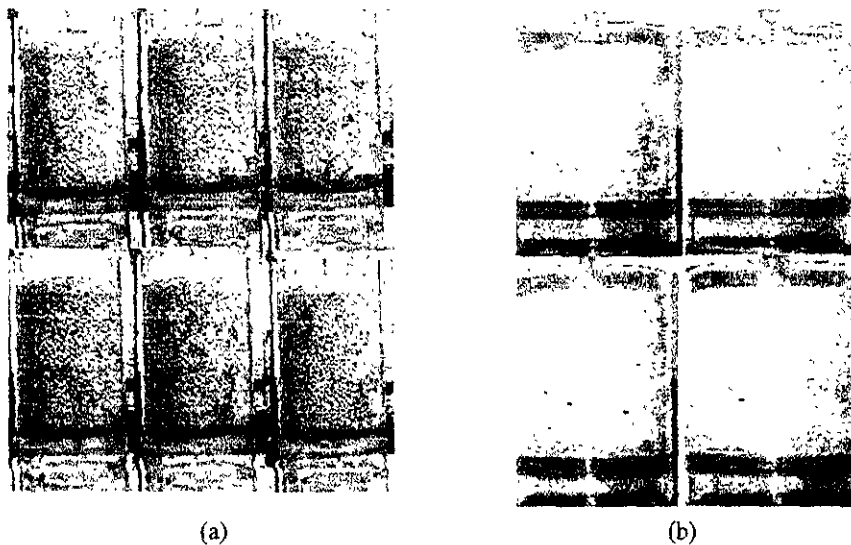
Figura 14. Imágenes laterales de la columna después de un día de duración con un caudal del líquido de 0.046 l/s/m^2

Para simular un terrero en una columna empacada, es necesario asegurar que el efecto de escurrimiento de la solución de cobre por la pared sea mínimo. En la Figura 14 esta condición se cumple, como se observa el escurrimiento es pequeño, y éste se localiza comúnmente en la parte baja de la columna, lugar donde se encuentra el drenaje de la solución y se observa un fenómeno de estancamiento de esta

El fenómeno de escurrimiento se debe a que la solución recorre el lecho azarosamente, en algunas ocasiones la tendencia de la solución es hacia la pared de la

columna debido al arreglo del empaque, el cual dicta el camino que ha de seguir la solución. Por lo tanto, este fenómeno ocasiona una mala distribución del líquido en el empaque. También el premojado de la columna (antes de comenzar el proceso) influye sobre la distribución del líquido, ya que en las zonas mojadas previamente es más fácil que el líquido cubra esas partículas que en el caso de las partículas secas.

Durante la experimentación hubo columnas que mostraron un efecto menor y otras mayor, esto no depende del caudal de líquido. Para diferenciar y esclarecer dicha conjetura se presentan otras imágenes (Figura 15 a y b) de la columna variando el caudal y manteniendo constante el tiempo de residencia del líquido



(a) (b)
Figura 15 Imágenes de la columna transversal con un tiempo de aplicación del líquido de 4 días para ambas corridas y un caudal del líquido de (a) 0.0785 l/s/m^2 y (b) 0.046 l/s/m^2

De las imágenes se deduce que el fenómeno de escurrimiento en la pared no es función del tiempo de aplicación y tampoco del caudal de líquido por el hecho de que la cantidad de canales no es mayor en alguna de las dos corridas y el efecto de inundación es reducido. La independencia del fenómeno de escurrimiento con respecto al caudal y tiempo de distribución se explica si consideramos la gran influencia que tienen los parámetros de canalización, distribución radial y difusión de la partícula sólida sobre éste

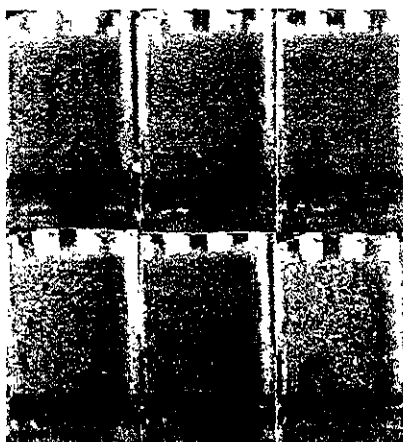


Figura 16. Imágenes laterales de la columna después de 14 días de duración con un caudal del líquido de 0.046 l/s/m^2

En la Figura 16 se presentan las imágenes de una corrida donde el escurrimiento por la pared no es mayor que las anteriores, aunque en este experimento el tiempo de aplicación de líquido es mayor, sin embargo, se observa que la película se expande más que en otros casos. Lo anterior, se explica si se considera que el efecto de la difusión partícula-partícula de la película provoca que el escurrimiento en la pared aumente. Otra observación de la Figura 16 muestra que la inundación en la parte baja de la columna incita que el fenómeno se incremente

4.2 CANALIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN RADIAL

Estudios anteriores, deducieron que las principales causas de canalización se deben a un bajo flujo másico, a la escasa o defectuosa distribución del líquido y a un empaque no uniforme. Se determinó la distribución radial y canalización del líquido en el empaque, en función del tiempo y caudal de líquido mediante la visualización de la coloración azul del sulfato cúprico.

Se muestran imágenes (Figuras 17 y 18) obtenidas después del proceso y digitalización de éstas, las cuales muestran el comportamiento hidrodinámico que presenta la solución a través del empaque. Dichas figuras exhiben las tres secciones a un mismo tiempo de aplicación (2 días) para dos diferentes caudales (0.046 l/s/m^2 y 0.0785 l/s/m^2). Es importante notar que existen diferencias mínimas entre secciones iguales.

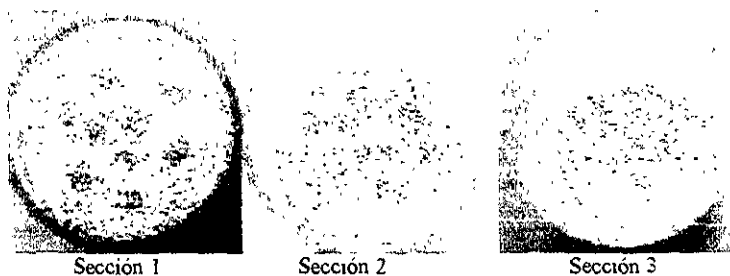


Figura 17 Vista superior de las secciones que componen el lecho con un tiempo de residencia del líquido de dos días y un caudal de solución de 0.046 l/s/m^2

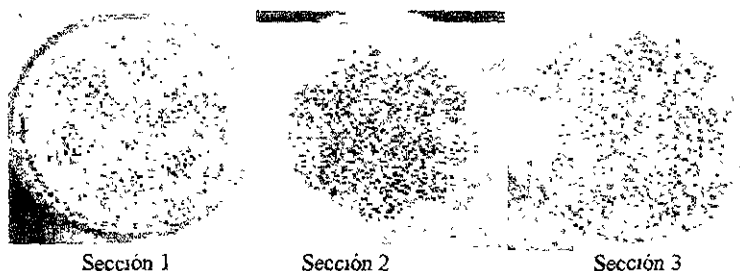


Figura 18. Vista superior de las secciones que componen el lecho con un tiempo de residencia del líquido de dos días y un caudal de solución de 0.0785 l/s/m^2 .

Esto no es el caso cuando se comparan las Figuras 17 y 19 para diferentes tiempos de aplicación de la solución, donde se muestra una mayor distribución radial a mayores tiempos, con un caudal constante

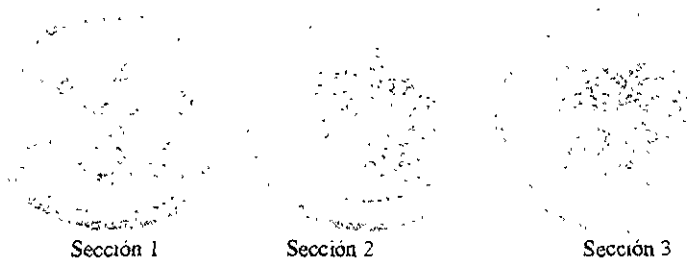


Figura 19. Vista superior de las secciones que componen el lecho con un tiempo de residencia del líquido de 14 días y un caudal de solución de 0.046 l/s/m^2 .

Entonces, el principal factor para obtener una mayor distribución radial del líquido en el lecho es el tiempo de aplicación del líquido y no el caudal

El tiempo permite que la interacción entre la solución y la partícula sólida sea más efectiva, y por consecuencia que el proceso de canalización y distribución radial dependan del tiempo.

4.3 COBERTURA DE MOJADO

Como se definió anteriormente la “eficiencia de mojado externa” es la cantidad de área externa de contacto efectivo entre el sólido y el líquido que fluye. En este análisis se define la “cobertura de mojado”, como la fracción de superficie externa de la partícula que es cubierta por el líquido.

Las imágenes digitalizadas y procesadas de la alúmina cubierta por la solución aportaron un valor de cobertura externa parcial, el cual se dividió por el valor obtenido para una cobertura total de la partícula por la solución (valor del 100%), de esta forma se obtiene una fracción de superficie externa cubierta igual a la “cobertura de mojado” de las partículas de las diferentes secciones que constituyen a la columna.

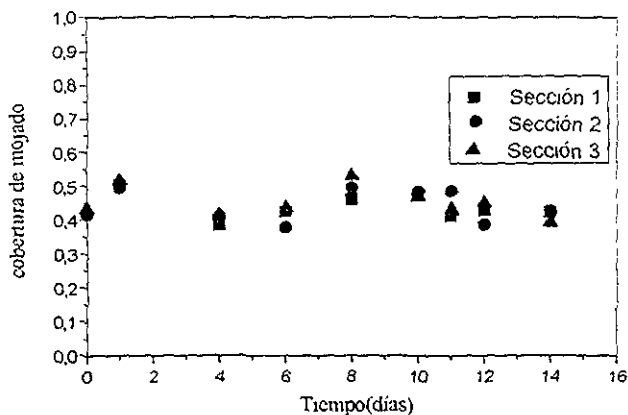


Figura 20 Cobertura de mojado de las partículas sólidas a lo largo de la columna con un caudal de líquido de 0.046 l/s/m^2 en función del tiempo de residencia del líquido

En la Figura 20 se muestra la “cobertura de mojado” en las tres secciones del lecho con respecto al tiempo. Como se observa, en las tres secciones se observa una “cobertura de mojado” similar e independientemente del tiempo de aplicación de la solución en el lecho.

La tendencia de la cobertura medida por los pixeles azules a través del tiempo es constante en las secciones de la columna, el cual no sobrepasa el valor de 0.6. Por lo anterior, la “cobertura de mojado” no depende del tiempo y tampoco de la sección en la cual se encuentre el sólido en este sistema.

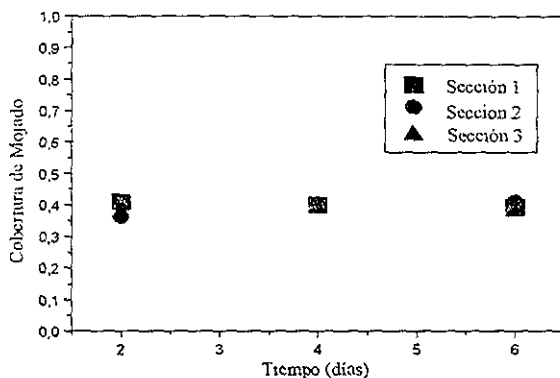


Figura 21. Cobertura de mojado de la partícula sólida a lo largo del lecho en función del tiempo de residencia del líquido a un caudal del líquido de 0.0785 l/s/m^2

En la Figura 21 se muestra la “cobertura de mojado” a diferentes valores de caudal comparado con el sistema de la Figura 20. La “cobertura de mojado” presenta una constancia con respecto al tiempo y al lugar en que la partícula sólida se encuentra en el

lecho. En este sistema se observan menos puntos en la gráfica debido a que su comportamiento es similar al anterior experimento y donde el caudal es dos veces menor.

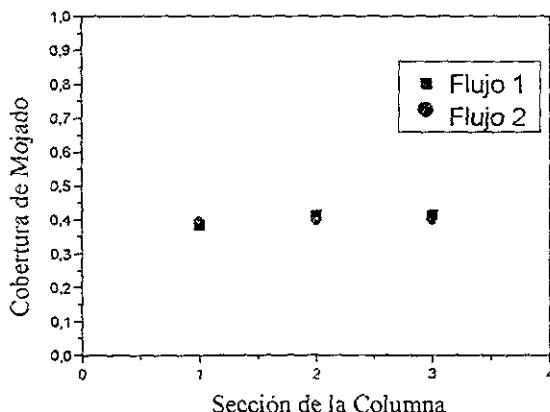


Figura 22. Comparación de la cobertura de mojado de la partícula sólida, teniendo como variables el caudal de líquido y sección de la columna Flujo 1 (0.046 l/s/m^2), Flujo 2 (0.0785 l/s/m^2)

Comparando ambos sistemas (Figura 22) se observa que la “cobertura de mojado” en el lecho empacado es de tipo parcial, o sea, la solución no hace contacto con toda la superficie de la partícula sólida, mostrando un comportamiento similar en toda la columna. Es de pensarse que la partícula que se encuentra en la sección tres (localizada en la parte inferior de la columna) tiene un mayor contacto con el líquido causado por el fenómeno de inundación de la solución y por la existencia de un drenaje inadecuado

La distribución radial y canalización aumentan el grado de contacto del sólido con el líquido a mayor profundidad del lecho, pero, a pesar de esto la “cobertura de mojado” no muestra efecto alguno por la variación del caudal o el tiempo de residencia del líquido. Esto probablemente es debido al efecto de la dispersión, lo que significa que, la misma

concentración de ión cúprico (píxeles azules) se distribuye en un área mas extensa a mayor profundidad del lecho.

4.4 TRANSFERENCIA DE MASA

Los siguientes resultados muestran la transferencia de masa como función del caudal de líquido y tiempo de aplicación de éste.

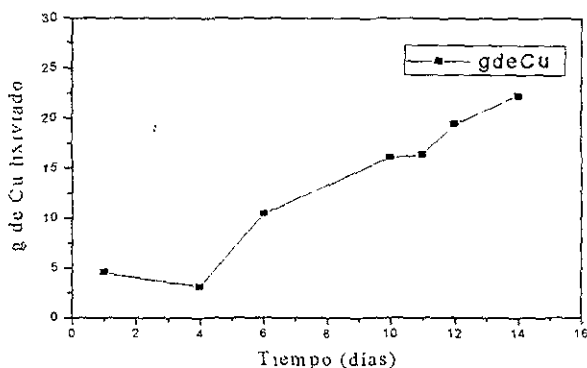


Figura 23. Gramos de cobre recuperados por lixiviación ácida en función del tiempo de aplicación de líquido en la columna a un caudal de 0.046 l/s/m^2 .

La transferencia de masa en las partículas con el caudal más bajo (0.046 l/s/m^2) se muestra mostrado en la Figura 23 como función del tiempo. La cantidad de cobre adsorbido (y posteriormente lixiviado) en la partícula sólida aumenta conforme al tiempo de aplicación del líquido. Se observan fluctuaciones, pero la tendencia es básicamente proporcional al tiempo en un período de 14 días.

Mientras mayor sea el tiempo de contacto del líquido con la partícula, habrá un aumento en la difusión y por lo tanto, el líquido penetra cada vez más al sólido. De los

anterior se deduce que a mayor tiempo, mayor transferencia de masa de la solución a la partícula sólida

Al comparar los dos caudales de líquido (Figura 24), se observa que la cantidad de cobre adsorbido es mayor para un tiempo determinado. El comportamiento en los dos caudales es similar, su tendencia a ser lineal y proporcional, es clara.

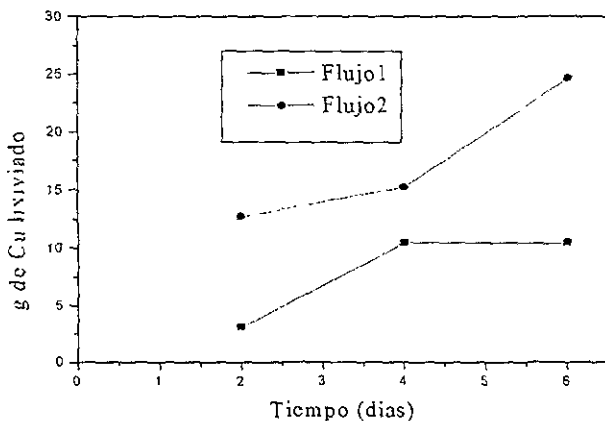


Figura 24 Comparación de la cantidad de cobre recuperado por lixiviación de dos caudales de líquido en función del tiempo de aplicación de la solución. Flujo 1 (0.046 l/s/m^2), Flujo 2 (0.0785 l/s/m^2).

En resumen, en la Figura 24 se observa una mayor difusión del cobre en la partícula, cuando el tiempo y el caudal es dos veces mayor (Flujo 2), por lo tanto, a mayor tiempo de aplicación de líquido mayor es la transferencia de masa del cobre en la partícula sólida

4.5 COBERTURA DE MOJADO Y DIFUSIÓN INTERNA DE LA PARTÍCULA SÓLIDA

En el desarrollo de la experimentación se observó la cobertura externa de la partícula sólida por el líquido que fluye, por lo que se analizaron imágenes de la partícula sólida con un grado de cobertura externa y rastros del efecto del mecanismo de difusión interna, a partir de dos técnicas diferentes (visual y estadísticamente).

La transferencia de masa se debe a dos mecanismos en paralelo: transferencia del cobre desde el líquido al interior de la partícula sólida debido al gradiente de concentración y a la difusión de una partícula a otra a causa del líquido estancado y al contacto entre estas partículas. Relativo al primer mecanismo, Gianetto y Specchia [10] encontraron que cuando alguna partícula se encuentra en mayor contacto con la solución, esta partícula presentará una difusión interna mayor. Esto quiere decir que la difusión interna o lo que ellos llaman "difusión aparente" depende indirectamente del número de Reynolds. También sería el caso si el contacto no es solo con el líquido sino con partículas sólidas que se encuentran igualmente irrigadas por la solución (segundo mecanismo). Esto es posible debido al tiempo de aplicación del líquido tan elevado en estos sistemas.

Se puede emplear el concepto de tiempo característico o escala de tiempo del estado transitorio, definido como [21].

$$t = \frac{L^2}{D_{ef}} \quad \text{donde}$$

t : tiempo característico,
 D_{ef} : coeficiente de difusión
 L : longitud o radio de la partícula sólida

Se define la difusión efectiva como.

$$D_{ef} = \frac{\varepsilon}{\tau} D \approx \varepsilon^2 D_i \quad \text{donde}$$

ε es la porosidad de la partícula sólida e igual a 0.41
 D_i es el coeficiente de difusividad libre del orden de 10^{-5}
 τ tortuosidad $\cong 1/\varepsilon$

Si se realizan cálculos considerando en este caso una difusividad efectiva (D_{ef}) del orden de 10^{-6} y un diámetro promedio de la partícula sólida de 0.4 cm, se obtiene un tiempo característico de $1.6E+5$ segundos (44 horas), el cual es aceptable, ya que la difusión interparticular es posible considerando los tiempos de las lixiviaciones en terreros (varias semanas)

Las imágenes que a continuación se presentan, muestran los dos fenómenos antes citados

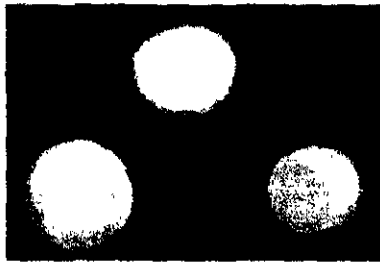


Figura 25. Partícula sólida de alúmina que presenta una cobertura externa total y una difusión interna de la solución de sulfato cúprico

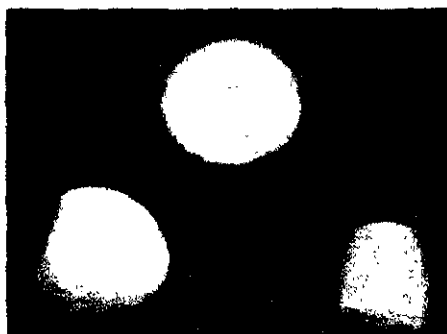


Figura 26. Partícula sólida de alúmina que presenta una cobertura externa total y una difusión interna de la solución de sulfato cúprico. La partícula se impregno totalmente de la solución. No se realizó el proceso de premojado y se realizaron limaduras transversales.

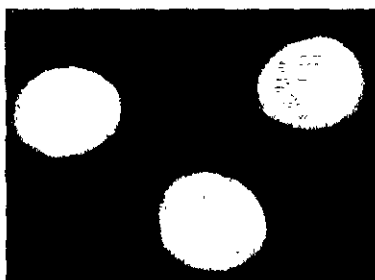


Figura 27. Partícula sólida de alúmina que presenta una cobertura externa y una difusión interna de la solución de sulfato cúprico. Duración de 0.2 días con un flujo de $1.26E-03$ l/s



Figura 28. Partícula sólida de alúmina que presenta una cobertura externa y una difusión interna de la solución de sulfato cúprico. Duración de seis días y un flujo de $1.26E-03$ l/s. Sección uno

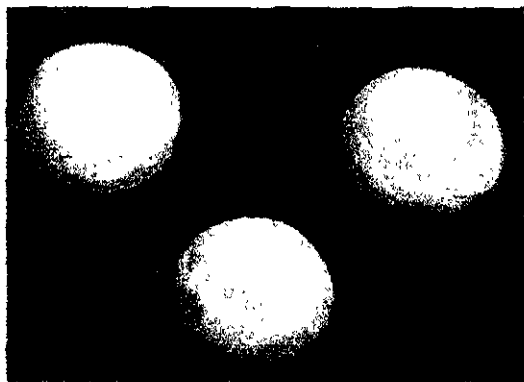


Figura 29 Partícula sólida de alúmina que presenta una cobertura externa y una difusión interna de la solución de sulfato cúprico. Duración de seis días y un flujo de $1.26E-03$ l/s. Sección dos

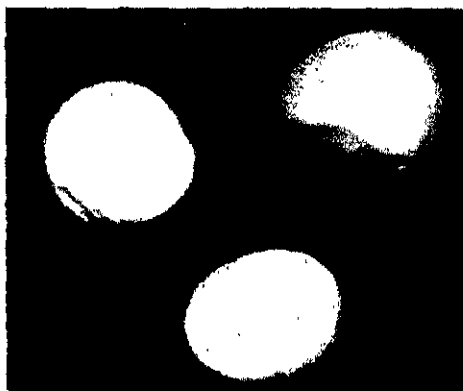


Figura 30 Partícula sólida de alúmina que presenta una cobertura externa y una difusión interna de la solución de sulfato cúprico. Duración de seis días y un flujo de $1.26E-03$ l/s. Sección dos.

Las partículas que componen estas imágenes (Figuras 25,26,27,28,29 y 30) fueron elegidas por la cobertura externa parcial que mostraron a diferentes tiempos y caudales.

Como se ve la difusión interna que presentan las partículas depende de otros parámetros estudiados anteriormente, como la cobertura de mojado la distribución radial, canalización y tiempo.

Las observaciones hechas en este estudio permiten confirmar la validez de ciertas prácticas que se utilizan en operaciones de terreros [2]. La construcción de terreros altos aprovecha la mayor cobertura externa que produce la dispersión radial del líquido. Más importante aún es la práctica de mover periódica y sistemáticamente los goteros (distribuidor) para abarcar todo el mineral. El alto grado de canalización que se ha visto en el presente estudio a causa del bajo caudal del líquido, se puede contrarrestar con la medida anterior.

CAPÍTULO CINCO

Conclusiones

El trabajo anterior se basó en el estudio de los fenómenos que ocurren y controlan a un proceso de lixiviación de terreros. Se construyó e implantó un equipo que permitió simular y a la vez evaluar los parámetros de escurrimiento de la pared, canalización, dispersión radial, cobertura de mojado y transferencia de masa que ocurren dentro de un terrero a nivel de una columna de partículas. Se minimizó el escurrimiento de pared, aunque este será menor en operaciones reales donde no hay inundaciones.

La técnica de visualización permite observar con más detalle los parámetros mencionados anteriormente. Son variadas sus ventajas: el escurrimiento en la pared, la distribución radial y la canalización se apreciaron claramente, determinando de esta forma el grado y la naturaleza de los fenómenos. En cuanto a la difusión interna, la extracción de cobre por lixiviación ofrece un acercamiento real de lo que sucede en el proceso en terreros

De los resultados se puede concluir que:

- A esos niveles bajos de flujo (caudal), que se emplean en operaciones reales de terreros, existen serias limitaciones a la transferencia de masa, debido a la canalización del flujo
- El bajo grado de contacto líquido-sólido es la causa de rendimientos inadecuados en el terrero. Se puede compensar en la práctica moviendo la posición del distribuidor de solución.

Con respecto a la relación entre la cobertura de mojado y el flujo, se requiere un estudio más detallado para establecer correlaciones. Sin embargo, las técnicas propuestas en este estudio son adecuadas para tal propósito

- [1] Sánchez-Chacón, A.E and Lapidus, G. T.
"Model for Heap Leaching of Gold Ores by Cyanidation"
Hydrometallurgy, (1997), vol. 44, pp. 1-20
- [2] Van, Z. and Hutchison, K
"Introduction to Evaluation Design and Operating of Precious Metal Heap Leaching Projects".
Society of Mining Engineers Inc. (1988), Colorado.
- [3] Roman, R. J. et al
"Diffusion Model for Heap Leaching Its Application to Scale-up"
AIME Trans. (1974), vol 256, pp 247-506.
- [4] Roman, R. J.
"Heap Design with the Aids of Computer Simulation"
Presented at the 78th National Meeting of AIChE.
Saltlake City, 1974.
- [5] Bartlett, R. W.
"Proc. International Symp. on Hydrometallurgy"
p. 331 (1973).
- [6] Braun, R. L., Lewis, A E, and Wadsworth, M E
"Proc. Solution Mining Symp"
p. 295 (1974)
- [7] Roman, R. J, Benner, B. R., and Becker, G. W.
Accepted for publication in AIME Transactions (1974)
- [8] Benner, B R. and Roman, R. J.
"Determination of the Effective Diffusivity of H^+ ions in a Copper Ore"
AIME. Trans. (1974) vol. 256, pp103-105
- [9] De Lasa, H. I.
"Chemical Reactor Design and Technology"
NATO Advanced Study Institut, 1985, London, Ont.
- [10] Gianetto, A and Specchia.
"Trickle-Bed Reactors: State of Art and Perspectives"
Chem Eng. Sci (1992), vol 47 N° 13/14, pp 3197-3213.

- [11] Herskowitz, M and Smith, J. M
"Liquid Distribution in Trickle Bed reactors. Part II: Tracer Studies"
AIChE J. (1978), vol 25, pp 272-278.
- [12] Satterfield, C. N. and Ozel, F
"Direct Solid-Catalyzed Reaction of a Vapor in an Apparently Completely Wetted Trickle Bed Reactors"
AIChE J. A. (1973), vol. 19, pp 1259-1261
- [13] Mears D. E.
"The Role of Axial Dispersion in Trickle Flow Laboratory Reactors"
Chem. Eng. Sci. (1971), vol 26, pp 1361-1366.
- [14] Puranik, S. S. and Vogelpohl, A.
"Effective Interfacial Areas in Irrigated Columns"
Chem. Eng. Sci. (1974), vol. 29, pp. 501-506..
- [15] Henry, H. C. and Gilbert, J. B
"Scale-up of Pilot Plant Data for Catalytic Hydroprocessing"
IEC Proc. Des. Dev. (1973), vol. 12, pp 328-331
- [16] Whener, J. E. and Wilhelm, R. W.
"Boundary Conditions of Flow Reactor"
Chem. Eng. Sci. (1975), vol. 6, pp 89-92.
- [17] Colombo, A. J. and Baldi, G
"Solid-Liquid Contacting Effectiveness in Trickle Bed Reactors"
Chem. Eng. Sci. (1976), vol. 91, pp. 1101-1108.
- [18] Ross, L. D.
"Performance of Trickle Bed Reactors"
Chem. Eng. Prog. (1965), vol. 61, pp 77-82.
- [19] Broadbent, S. R. and Hammersley, J. M.
Proc. Cam. Phil. Soc., 1957, vol. 53, pag 629
- [20] Herskowitz, M., Carbonell, R. G. and Smith, J. M.
"Effectiveness Factors and Mass Transfer in Trickle-Bed Reactors"
AIChE J. (1979), vol. 2, pp 272-282.
- [21] Lobo, R
"Principios de Transferencia de Masa"
Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa (1997)