

# Determinación de propiedades físicas y parámetros de transporte a colas auríferas de mina El Limón

J. Ramírez<sup>1\*</sup> y J. Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)  
PO Box 5595, Managua, Nicaragua  
e-mail: [jramirez@uni.edu.ni](mailto:jramirez@uni.edu.ni)

<sup>2</sup>Dept. of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology (KTH)  
S-100 44 Stockholm, Sweden  
e-mail: [jmc@ket.kth.se](mailto:jmc@ket.kth.se)

## RESUMEN

Los parámetros de transporte de colas mineras y otras propiedades físicas, tales como permeabilidad intrínseca, distribución de tamaño de partículas, porosidad y densidad fueron determinados experimentalmente. Se realizaron experimentos de infiltración en columnas de laboratorio con el fin de determinar; la conductividad hidráulica, las propiedades capilares y estudiar el comportamiento hidrodinámico de las colas auríferas. También se hizo uso de un modelo matemático para simular la infiltración isotérmica unidimensional y ajustar los perfiles experimentales, con el propósito de determinar los parámetros de transporte que describen el proceso de infiltración. Aunque los experimentos se realizaron con diferentes grados de compactación, se obtuvieron parámetros con una coherencia razonable para describir la conductividad hidráulica y las propiedades capilares de las colas por este método. Estos parámetros fueron usados en un modelo simple para simular el lavado con agua del cianuro contenido en las colas auríferas.

Palabras claves: capilaridad, compuestos cianurados, conductividad hidráulica, permeabilidad

## ABSTRACT

Transport parameters of gold ore tailings and other physical properties such as intrinsic permeability, particle size distribution, porosity and density were determined experimentally. Infiltration experiments in laboratory columns were performed, to study the hydrodynamic behaviour and to determine the hydraulic conductivity and capillary properties of the tailings. A mathematical model to simulate one-dimensional isothermal infiltration was applied to adjust experimental profiles in order to determine the transport parameters describing the infiltration process. In spite of different packing obtained in the experiments, parameters of reasonable consistency were obtained to describe hydraulic conductivity and capillary properties of the tailings by this method. These parameters were used in a simple model to simulate the washing of cyanide containing gold tailings with water.

Keywords: capillarity, cyanide compounds, hydraulic conductivity, permeability

---

\* Autor para la correspondencia

## INTRODUCCIÓN

Nicaragua es un país de gran tradición minera, la abundancia de sus recursos minerales la ha llevado a colocarse como el principal productor de oro y plata en Centro América. El desarrollo de la actividad minera además de poseer un atractivo potencial económico, implica también un costo en términos ambientales debido a la producción de altos volúmenes de desechos. En el pasado, la explotación de estos recursos tuvo poca incidencia sobre las comunidades donde se llevaba a cabo esta actividad; más bien repercutió negativamente sobre el medio ambiente y la salud de los pobladores. Hoy en día el nuevo auge de la actividad minera hace uso de tecnologías modernas que minimizan el impacto en el medio ambiente y proporcionen beneficios a la sociedad en su conjunto.

La lixiviación con cianuro es el método más comúnmente usado para la extracción de oro. Esta se realiza una vez que el material ha sido triturado y molido hasta alcanzar una granulometría adecuada. El contenido de oro en el material lixiviado es muy bajo, por lo que no resulta rentable someterlo a un tratamiento posterior y entonces es desechado. Este material es conocido con el nombre de colas y representan grandes cantidades de desechos del proceso (Calderón, 2001).

Las colas contienen metales no recuperados, cianuro libre, complejos cianurados de metales pesados y tiocianatos. Estos químicos son tóxicos para los seres humanos y los organismos acuáticos. Por tanto el manejo de este material se enfoca a evitar la contaminación de las fuentes de agua subterráneas ya que estas pueden ser usadas como fuentes de agua potable o emerger en fuentes de aguas superficiales.

En la actualidad la empresa minera TRITON S.A. posee la concesión de la mina El Limón, esta empresa tiene interés en darle un uso a las antiguas pilas de colas y de alguna forma regenerar el suelo. Las pilas viejas están siendo usadas para realizar ensayos de cultivos de distintas especies tanto para reforestación como para producción de alimentos. Al mismo tiempo la empresa ha construido una laguna artificial,

con nueva tecnología cuyo propósito es acumular las colas generadas desde 1999 y de esta forma evitar el contacto de las colas con las fuentes de agua.

Existen otros métodos para eliminar compuestos como el cianuro libre de las colas, uno de estos es lavarlas con agua o con una solución de lavado para remover el cianuro remanente y crear la disposición de desechos seguros. La implementación de este método en la práctica resulta costosa en términos de tiempo y dinero. Por tanto un modelo matemático constituye una útil herramienta para ayudar a diseñar dichos métodos de forma que sean eficientes, sin embargo su aplicación requiere primero la determinación de parámetros de transporte y propiedades macroscópicas de las colas.

En vista de la importancia de la actividad minera en este país y del escaso nivel de investigación científica que hay sobre las características hidrodinámicas de los residuos generados por esta actividad y específicamente sobre las colas, este trabajo resulta útil, al aportar una base para la investigación sobre el manejo adecuado de los desechos de esta industria, promoviendo su modernización y desarrollo, dentro de un contexto de protección ambiental.

## METODOLOGÍA

### *Identificación y muestreo*

El material de colas se encuentra depositado en pilas, de acuerdo al año en que fue procesado el material. Con la ayuda de la Superintendencia Ambiental de TRITON MINERA S.A. fue posible identificar el año correspondiente a las pilas y se tomaron muestras de los años: 1997, 1998, 1999.

El muestreo del material se realizó en distintos puntos ubicados en una misma pila para lograr una muestra representativa. Los puntos se seleccionaron al azar de forma aproximadamente equidistante procurando abarcar la mayor área posible de la pila. La capa superficial del material se removió y se tomaron las muestras a diferentes profundidades hasta un máximo de 1.5 m.

### *Desarrollo experimental*

Hultberg y Wahlund (1997) y Calderón (2001) realizaron experimentos para determinar las propiedades macroscópicas de las colas y estudiar la infiltración en estado no estacionario del agua en columnas empacadas con colas. La mayoría de estos experimentos se realizaron con material húmedo puesto que el material original presentaba estas características, pero en algunos casos el material se secó previo a los experimentos.

Las propiedades determinadas en estos experimentos son: densidad de conjunto y de partícula, permeabilidad, porosidad efectiva, distribución de tamaño de partícula.

#### a) Determinación de humedad inicial

La humedad inicial de las colas se determinó por triplicado para cada muestra. Estas se secaron en un horno a 105 °C durante 24 horas y la diferencia de pesos correspondió a la masa de agua. Se determinó la humedad en base seca y se calculó el promedio de los tres resultados de cada muestra para obtener un valor representativo de la humedad (Hultberg y Wahlund, 1997).

#### b) Determinación de porosidad total

La porosidad total se calculó a partir de la densidad de partícula y la densidad del conjunto. Las densidades fueron determinadas con tres repeticiones para cada muestra de cada año, calculando posteriormente el valor promedio (Hultberg y Wahlund, 1997).

La densidad de conjunto se determinó pesando en una balanza digital un volumen de 250 ml del material seco medido con una probeta.

En la densidad de partícula se usaron balanza analítica y picnómetros, los cuales fueron previamente calibrados antes de proceder con la determinación de la densidad de partícula. Los picnómetros se pesaron con muestra de colas seca, seguidamente se agregó agua y luego se agitaban. Se dejó transcurrir un tiempo para dejar sedimentar las muestras antes de terminar

de llenar los picnómetros y pesarlos. Una vez calculada la densidad de conjunto y la densidad de particular se procedió a calcular la porosidad total, haciendo uso de la ecuación (1):

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_P} \quad (1)$$

donde  $\rho_P$  es la densidad de partícula y  $\rho_B$  es la densidad aparente del lecho de partículas.

#### c) Porosidad efectiva

Se midieron diferentes volúmenes de colas secas en una probeta y se dejaron saturando con agua en exceso durante 12 horas. Una vez que el exceso de agua se removió, se hicieron mediciones de peso y de volumen a las muestras húmedas resultantes. Este procedimiento se realizó tres veces para cada muestra, una vez obtenidas las mediciones se procedió a determinar el promedio de las tres mediciones, siendo este el resultado de la porosidad efectiva para las colas seleccionadas (Hultberg y Wahlund, 1997).

#### d) Distribución del tamaño de partícula

La determinación del tamaño de partícula se hizo en un juego de tamices Tyler Standard. El tamizado se hizo por vía húmeda debido al alto contenido de arcilla en el material. Se pesó una muestra de colas secas de 500 g la que se pasó por el tamiz más fino (325 mesh) rociándola con agua para lavar la arcilla. Una vez lavada, la muestra fue secada y tamizada. La fracción retenida en cada tamiz fue pesada para obtener la fracción másica. La fracción menor a 325 mesh, que fue lavada al inicio, se obtuvo por diferencia restando la suma de las fracciones retenidas de la masa total.

#### e) Determinación de permeabilidad

La permeabilidad intrínseca,  $k$ , se determinó para flujo saturado, usando agua, a través del lecho poroso en las columnas de laboratorio. En todos los experimentos se usó un lecho de colas del mismo volumen, este se preparó colocando el material húmedo dentro de un molde

cilíndrico con las dimensiones siguientes: 0.084 m de diámetro y 0.05 m de altura. Las pastillas provenientes del molde se empacaron en las columnas.



Fig. 1 Equipo para determinar permeabilidad.

En los experimentos se usaron cinco columnas como se muestra en la Fig. 1. El lecho se dejó saturando durante doce horas, una vez que el flujo de agua a través de la sección transversal del lecho se estabilizaba llegando a ser constante, se iniciaban las mediciones. El flujo de salida se determinó haciendo mediciones de tiempo cada 10 ml de volumen de agua. La permeabilidad se calculó por medio de la ecuación (2):

$$k = \frac{\mu_w q_{out} h_B}{\rho_w g h_w} \quad (2)$$

donde  $q_{out}$  es flujo de salida,  $h_B$  es la altura del lecho,  $h_w$  es la carga de agua,  $\mu_w$  y  $\rho_w$  son la viscosidad y densidad del agua.

#### *Experimentos de infiltración*

Los experimentos de infiltración se realizaron en columnas de 0.5 m de altura y 0.008 m de diámetro, divididas en segmentos de 0.02 m de

altura, ver Fig. 2. Se diseñó una ducha la cual fue colocada sobre la columna para alimentar un flujo de agua uniforme al material contenido dentro de la columna. Las columnas se empacaron segmento por segmento, compactándose el material manualmente. Una bomba peristáltica y la ducha colocada sobre la columna proporcionan un flujo de agua a la columna. En los experimentos se usó material con distintas humedades iniciales, variando el flujo de agua y el tiempo de duración del experimento. Mediante ensayos preliminares se estimaron los tiempos máximos que podían durar los experimentos, sin que el agua se infiltrara hasta el fondo de la columna. Con esta información el experimento fue interrumpido y se tomaron los segmentos de dos en dos para determinar el contenido de humedad a lo largo de la altura de la columna. Durante la realización de los experimentos se mantuvieron la temperatura y el flujo constante (Hultberg y Wahlund, 1997).

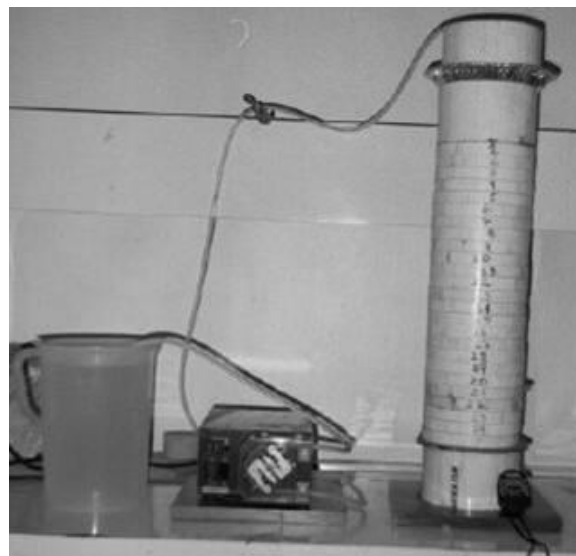


Fig. 2 Columna para experimentos de infiltración.

#### *Simulaciones de infiltración y lavado*

La simulación de los perfiles del contenido de agua en las columnas se realizó resolviendo un modelo de infiltración programado en código de MATLAB<sup>®</sup>, el modelo describe isoterma de

infiltración en estado no estacionario para un lecho poroso.

El propósito de estas simulaciones, es ajustar las curvas teóricas con los perfiles experimentales y obtener tanto los parámetros de transporte de agua, como las propiedades de retención del lecho, es decir la conductividad hidráulica, la difusividad líquida y la curva de saturación capilar. Estos fueron modelados con el método de van Genuchten (1980) como función de los parámetros  $\alpha$  y  $n$ . El contenido de agua irreducible es otra variable desconocida que tiene influencia en la retención del agua y en las propiedades de transporte del lecho.

a) Determinación de los parámetros de transporte

Las simulaciones se realizaron bajo las mismas condiciones que los experimentos para hacer una valoración inicial de los parámetros  $\alpha$ ,  $n$  y de la infiltración del contenido de agua irreducible, para esto se utilizaron los valores experimentales de velocidad de flujo, porosidad, humedad inicial y el tiempo total como datos de entrada el programa.

b) Lavado de cianuro contenido en el lecho

Los parámetros de transporte obtenidos en las simulaciones anteriores fueron usados para simular el lavado con agua, del cianuro contenido en las colas. El modelo usado calcula la infiltración del agua, la dilución y la transferencia del soluto en condiciones isotérmicas en estado no estacionario. Se asumió que todo el cianuro estaba disuelto en el agua contenida inicialmente en el lecho y que no se consumía cianuro en el proceso. Las variables usadas en la simulación son contenido inicial de humedad, concentración inicial de cianuro, caudal de alimentación, altura del lecho.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Descripción del material*

El material de colas es homogéneo, de gran fineza, una mezcla de material arcilloso y cuarzo, como puede apreciarse en la Fig. 3.

Presenta una humedad variable, aún dentro de una misma pila. La coloración varía entre gris y un tono ligeramente rojizo.

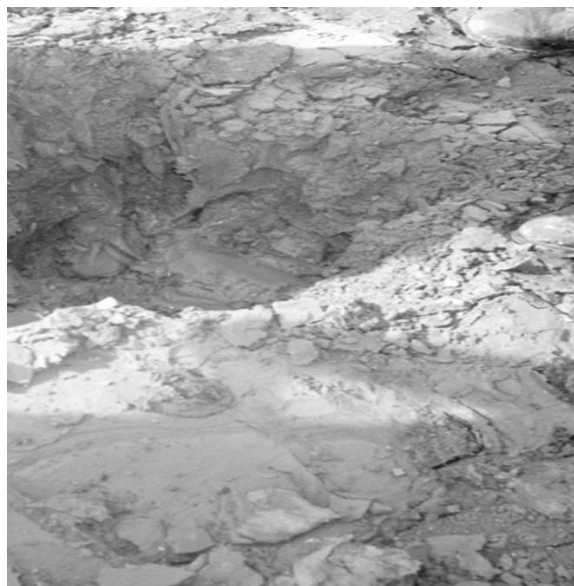


Fig. 3 Material de las pilas colectoras de cola.

La Tabla 1 presenta valores de densidad de partícula, densidad aparente y porosidad para las muestras tomadas en las pilas de colas generadas en 1997. El promedio de la densidad de partícula para todas las colas estudiadas fue de  $2.64 \text{ g/cm}^3$ , con una desviación estándar de 0.032. Mientras que la porosidad total osciló en el rango de 0.52-0.58, la cual es influenciada por el grado de compactación, aglomeración y la granulometría del material de cola.

Tabla 1 Densidad de conjunto y de partícula para 1997.

Muestra	$\rho_B$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$\rho_P$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$\epsilon_t$
1997-A	1.1700	2.6956	0.5660
1997-B	1.1400	2.6470	0.5693

### *Distribución del tamaño de partícula*

El 90 % del material tiene un tamaño menor que 0.0059 mm. En las colas de 1997, la fracción mayor que 0.0059 mm es relativamente mayor. La pequeña diferencia con los otros dos años puede atribuirse a diferentes condiciones de

operación en los molinos. En general se encontró que más del 70 % del material tiene un tamaño de partícula menor que 0.0059 mm (100 mesh).

*Permeabilidad y conductividad hidráulica saturada*

Los valores de permeabilidad oscilan entre  $8.5 \times 10^{-15}$  y  $8 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ . Los bajos valores de permeabilidad están relacionados con la distribución de partícula del material. Al ser el tamaño de partícula tan pequeño, el agua está en

contacto con un área superficial mayor, la que debido a la fricción opone resistencia al flujo. Mientras que los valores de la conductividad hidráulica oscilan entre  $4.8 \times 10^{-6}$  y  $8.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ .

*Experimentos y simulación de infiltración*

Los resultados de dos experimentos de infiltración realizados por Hultberg y Wahlund (1997) se muestran en la Fig. 4, así como el ajuste correspondiente de la simulación del modelo utilizado.

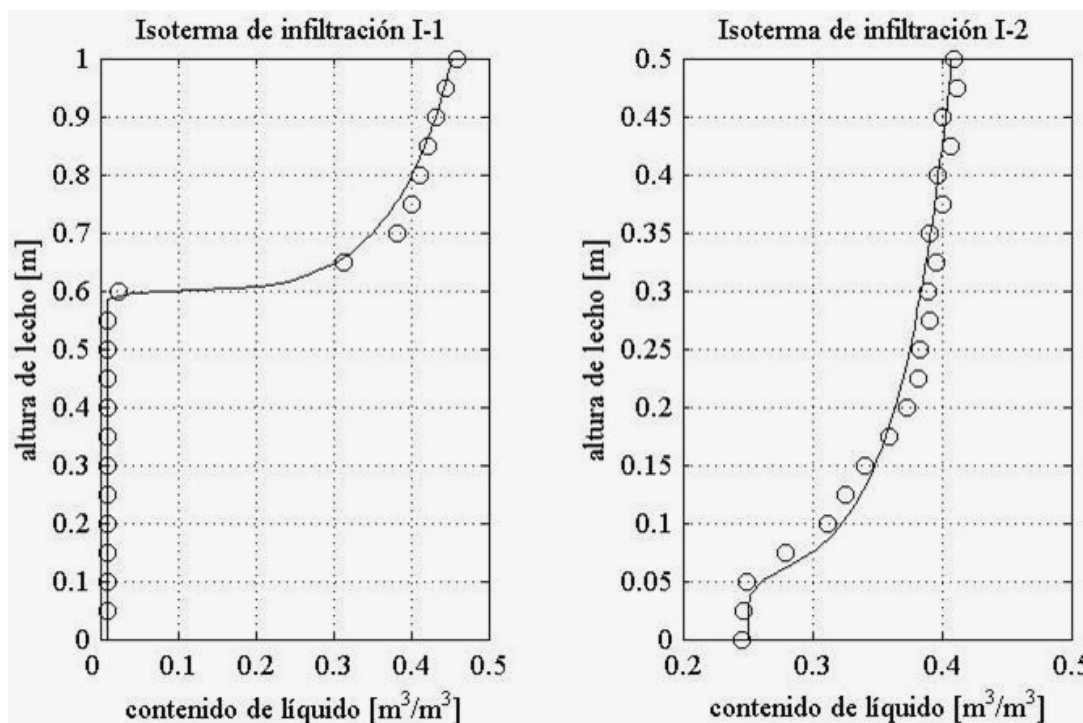


Fig. 4 Datos experimentales y simulaciones.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2, estos reflejan que los valores de  $\alpha$  y  $n$  son menores para la infiltración I-1 la cual se realizó con humedad inicial de 0.2, mientras que los valores para la infiltración I-2 (humedad

inicial aproximadamente cero) son mayores. Por otro lado la humedad irreducible es bien baja en ambos casos.

Tabla 2 Parámetros de transporte material de 1997.

Infiltración	$k \text{ (m}^2\text{)}$	$\alpha$	$n$	$S_{irr}$
I-1	$9.5 \times 10^{-13}$	$7.98 \times 10^{-2}$	1.3000	0.001
I-2	$4.5 \times 10^{-14}$	$1.00 \times 10^{-2}$	1.0997	0.001

*Lavado de cianuro libre contenido en un lecho de cola*

Los resultados obtenidos de la simulación del lavado de cola, usando el promedio de los parámetros de transporte y las propiedades determinadas brindaron los siguientes aportes: La concentración a la salida, depende en algunos casos del contenido de la humedad inicial. Cuando la altura del lecho en la columna se incrementa al doble, el volumen de agua necesario no se incrementa en esa proporción para alcanzar la misma concentración. Consecuentemente, columnas o apilados más grandes, podrían ahorrar líquido de lavado y tiempo en el punto donde la solución esta saturada.

**CONCLUSIONES**

La densidad de partícula del material tiene un promedio de 2.62 g/cm<sup>3</sup>. La porosidad de las colas determinadas, está en el rango de 0.47-0.58. Esta es influenciada por el grado de compactación, aglomeración y la distribución del tamaño de partícula. Los experimentos realizados con contenido de humedad de 0.35 no fue posible ajustarlos con el programa de simulación, por lo que se hace necesario realizar un estudio más exhaustivo bajo estas condiciones. Los valores de los parámetros de transporte y el contenido de líquido irreducible, tienen coherencia en la serie de experimentos de infiltración. Las simulaciones de lavado brindan como resultados que se requieren menos del doble del volumen de agua por volumen del lecho para reducir en un 95 % el contenido de cianuro presente en las colas. La dilución del cianuro es más eficiente cuando el contenido inicial del agua en el lecho es más alto.

**NOTACIÓN**

g	Constante de gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Altura	[m]
k	Permeabilidad intrínseca	[m <sup>2</sup> ]
q	Flujo	[m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> s]
S	Saturación	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]

*Letras griegas*

$\alpha$	Parámetro de transporte	[-]
$\varepsilon$	Porosidad	[-]
$\mu$	Viscosidad	[N s/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]

*Subíndices*

B	Lecho
out	Salida
P	Partícula
t	Cola
w	Agua
irr	Irreducible

**REFERENCIAS**

Calderón, H. (2001). *Estudio del Transporte Líquido en las Colas Procedentes del Proceso de Extracción de Oro de la mina El Limón*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua.

Hultberg, M. y B. Wahlund (1997). *Infiltration and Washing of Cyanide containing Gold Ore Tailings in Nicaragua*. Master's Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.

van Genuchten, M.T. (1980). *A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity in Unsaturated Soils*. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, No. 5, pp. 892–898.



**Javier Ramírez** se graduó de Ingeniero Químico en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) en 1994. Cursando el grado de LicEng en Ingeniería Química en el Real Instituto Tecnológico (KTH), Suecia. Su área de investigación es medio ambiente con énfasis en contaminación de suelos y aguas subterráneas. Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería.