

## ESTUDIO CINÉTICO DE FLOTACIÓN DE FLUORITA EN COLUMNA

Victor Ciribeni, Máximo Pérez, Ester Cano y Osvaldo Echenique

Instituto de Investigaciones Mineras - Departamento de Ingeniería de Minas  
Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador San Martín 11 09 (oeste)  
(5400) San Juan, Argentina

[ciribeni@unsj.edu.ar](mailto:ciribeni@unsj.edu.ar), [mperez@unsj.edu.ar](mailto:mperez@unsj.edu.ar), [estercano@unsj.edu.ar](mailto:estercano@unsj.edu.ar) y [oecheni@unsj.edu.ar](mailto:oecheni@unsj.edu.ar)

### RESUMEN

Durante el desarrollo del proyecto de planta móvil para asistencia a la pequeña minería, se hicieron ensayos piloto para el diseño de una columna de tamaño óptimo, que cumpla con las exigencias metalúrgicas y permita el montaje en el equipo móvil.

Se trabajó en la caracterización hidrodinámica de una columna de 82 mm de diámetro para obtener la distribución de tiempos de residencia (DTR) y los coeficientes de dispersión.

Posteriormente se hicieron ensayos de flotación con una mena de fluorita procedente de las Sierras de Valle Fértil, Pcia. de San Juan, Argentina. Se reprodujeron las mismas condiciones de operación de las determinaciones de las curvas DTR y se obtuvieron los índices cinéticos de la flotación de fluorita en columna y en forma paralela los mismos parámetros en celda de laboratorio.

Se presentan los resultados obtenidos. Se discuten los parámetros cinéticos hallados en la columna y se los compara con los obtenidos en celda de laboratorio.

**PALABRAS CLAVE:** Cinética de flotación, Columna de flotación, Flotación de fluorita

## 1. INTRODUCCIÓN

El mineral de fluorita procede de un yacimiento de Valle Fértil Peia. de San Juan, Argentina, que se comercializó en el pasado como grado metalúrgico luego de ser procesado mediante selección manual. El rechazo de este proceso y los trozos de granulometrías inferiores se acumularon como descarte, conteniendo en promedio aproximadamente 60 % de  $\text{CaF}_2$ .

Por la granulometría y baja ley en  $\text{CaF}_2$ , este mineral puede tratarse mediante flotación para obtener concentrados con grado químico, que presenta el más alto precio de mercado por su elevada exigencia en cuanto a pureza (97 % de  $\text{CaF}_2$ ) y menos de 1,0 % de  $\text{SiO}_2$ .

En nuestra planta, se cuenta con bancos de 2, 4 y 8 celdas de flotación mecánica tipo Denver SA, de 0,3 m<sup>3</sup>, suficientes para armar una planta para aproximadamente 30 t/día. Sin embargo, por las elevadas exigencias del mercado es necesario contar con una etapa de limpieza altamente efectiva, motivo por el que se decidió incluir en el proyecto una columna de flotación.

En el estudio, se obtienen las curvas de distribución de tiempos de residencia para estimar los parámetros característicos: tiempo de residencia media y el número de dispersión, variando la altura de un aireador de tela con respecto al fondo y se establece la relación con los índices cinéticos de flotación de fluorita, en idénticas condiciones.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales y equipo de laboratorio

El diagrama de la figura N° 1 muestra el equipo utilizado para las mediciones de las curvas DTR junto con la columna de pléxiglas de 82 mm. de diámetro.

El agua se alimenta desde un tanque de acero inoxidable de 100 lts. de capacidad con una bomba peristáltica, Masterflex WZIR051 con cabezal N° 7018, de velocidad variable y un caudalímetro electrónico marca Kobold modelo KFG 1008 mide el caudal.

El aire comprimido se controla mediante un regulador de presión, manómetro, caudalímetro electrónico marca Kobold modelo KFF 1000 y válvula, ingresando a la columna mediante un aireador de tela de filtro de 20 mm de diámetro por 200 mm de longitud.

Las colas se manejan con una bomba peristáltica Masterflex mod. WZIR051 con cabezal N° 7018 y variador de velocidad.

Para registrar los caudales: de agua en la cola de la columna y el de aire, se utiliza un sistema compuesto por una PC equipada con plaqueta de adquisición de datos ADQ12.

La conductividad se mide con un electrodo para caudales continuos, (Cte. = 1.0 rango óptimo 10 a 2000 Micro-siemens) conectado a un conductímetro Accumet model 50, con capacidad para almacenar hasta 60 registros.

### 2.2 Determinación de las curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR)

Se emplea el método de pulso-respuesta que consiste en inyectar, en forma idealmente instantánea, una dosis de sustancia de comportamiento similar al medio que circula en el recipiente y cuya concentración se puede medir a la salida. Según Xu y otros (1991), se supone que:

1. La inyección del trazador no provoca disturbios en la corriente del fluido.

2. El material en circulación es uniforme en todo el eje de la columna tal que la velocidad del trazador es constante para condiciones de operación fijas.
3. La concentración del trazador es una función de la posición en el eje y el tiempo.
4. El trazador se comporta igual que la fase con que circula (p.e. no hay segregación).
5. El coeficiente de dispersión axial, es constante para las condiciones de operación.

En el pulso se utilizan 5 ml conteniendo 1000 mg de una solución concentrada de 200 g/l. de KCl, calidad pro-análisis y se inyectan en el conducto de alimentación de la columna.

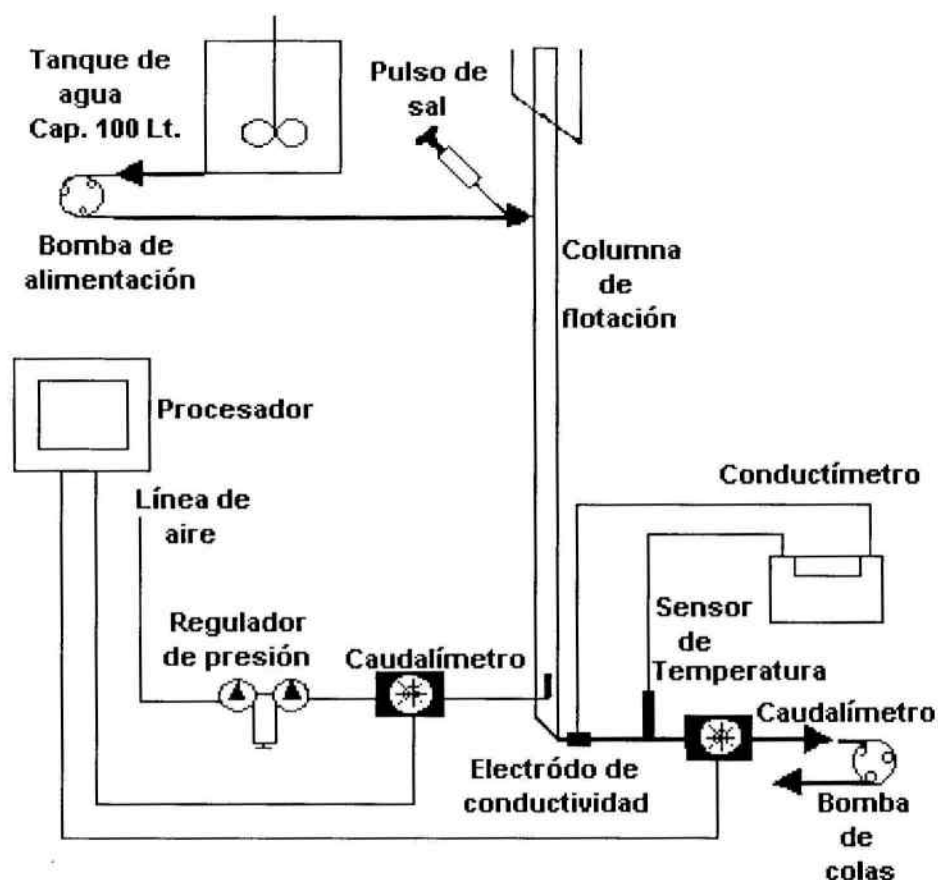


Figura 1. Diagrama de flujo e instrumental utilizado para la medición de las curvas de distribución de tiempos de residencia de la columna de 82 m m de diámetro.

### 2.3 Determinación de los índices cinéticos

Se sigue el procedimiento sugerido por Dobby (1986) y Finch (1990), para columnas cortas ( $H_c = 2$  a  $4$  m) que consiste en realizar ciclos de flotación. Durante el primer ciclo se utiliza la totalidad de la mena fresca, acondicionada para alimentar la columna. Cuando la operación está estabilizada, se extraen muestras simultaneas de concentrado y colas durante un minuto, continuando el ciclo hasta agotar el contenido del tanque de alimentación. Las colas se convierten en alimentación del ciclo siguiente, repitiéndose hasta escasez de mineral flotable. El diagrama del equipo empleado se muestra en la figura N° 3.

Con la recuperación acumulada (R) y una estimación de la recuperación en tiempo prolongado, denominada RI, se grafica la ecuación (1) con respecto al tiempo de flotación, esta operación se reitera cambiando el valor de RI hasta obtener una recta, cuya pendiente es k, la constante de velocidad específica de flotación.

$$\ln \frac{RI}{RI - R} \quad (1)$$

Finalmente, la ecuación (2) permite simular la recuperación. Instantánea.

$$R = RI * [1 - \exp(-k * t)] \quad (2)$$

## 2.4 Condiciones de operación de la columna

Las condiciones de operación se muestran en la tabla N° 1. Mediante el control del caudal de aire se ajusta la velocidad superficial de gas  $J_g$ , a 1,5 kg/cm<sup>2</sup> de presión. La velocidad superficial de agua se registra en la salida de colas de la columna, a continuación del electrodo de conductividad y el sensor de temperatura. No se utiliza agua de lavado. La concentración de espumante es de 15 ppm, para lograr un tamaño uniforme de burbujas entre 1 y 2 mm de diámetro.

## 2.5 Procesamiento de datos

Con la conductividad absoluta y el factor del electrodo (1,7665) se obtiene la concentración de KCl en mg/l y con la ecuación (3) se determina la cantidad de sal de la curva.

$$C = \sum_0^{\infty} c(t) * \Delta t, \text{ luego: } CS = C * Q \quad (3)$$

donde:

- C= Área bajo la curva de concentraciones
- c(t) = concentraciones de sal en el momento t. [mg/l]
- t = tiempo [m]
- CS = cantidad de sal calculada, [mg]
- Q = caudal del líquido, [l/m]

El tiempo medio de residencia ( $\tau$ ) se determina de las concentraciones y los tiempos mediante la ecuación (4).

$$\tau = \frac{\sum_0^{\infty} c(t) * t}{\sum_0^{\infty} c(t)} \quad (4)$$

Finalmente, con los valores experimentales se calcula la varianza con la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_0^{\infty} C(t) * t^2}{\sum_0^{\infty} C} - \left( \frac{\sum_0^{\infty} C(t) * t}{\sum_0^{\infty} C(t)} \right)^2 \quad (5)$$

que permite determinar  $N_d$ , número de dispersión, mediante la varianza relativa calculada con la ecuación (6).

$$\sigma_r^2 = \frac{\sigma^2}{\tau_m^2} \quad (6)$$

luego se procede a realizar cálculos iterativos, de acuerdo al recipiente considerado, con alguna de las siguientes ecuaciones:

**Extremos cerrados** 
$$\sigma_r^2 = 2N_d - 2N_d^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{N_d}\right) \right] \quad (7)$$

**Extremos abiertos** 
$$\sigma_r^2 = 2 * N_d + 8 * N_d^2 \quad (8)$$

**Extremos abierto-cerrado** 
$$\sigma_r^2 = 2 * N_d + 3 * N_d^2 \quad (9)$$

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

Determinada la función distribución de tiempos de residencia (DTR) con agua, se obtienen los parámetros: Tiempo medio de residencia ( $\tau_l$ ) y Número de dispersión ( $N_d$ ) del líquido que caracteriza a la columna.

Los ensayos de flotación de fluorita permiten obtener: la capacidad de transporte ( $C_t$ ) y la constante de velocidad de flotación ( $k$ ), que se utilizan para simular el funcionamiento bajo las diferentes configuraciones.

#### 3.1 Distribución de tiempos de residencia

Los tiempos de residencia y el número de dispersión se determinan con un programa realizado en lenguaje Matlab, que emplea la solución analítica desarrollada para extremos abiertos y ajusta las curvas a los valores experimentales mediante el método Simplex.

Dobby y otros (1986) encontraron que el coeficiente de dispersión axial de las partículas de sólido puede considerarse igual al del líquido y además, es linealmente dependiente del diámetro de la columna  $D_c$  y se puede estimar de la siguiente expresión:

$$E_l = E_p = 0,063 \cdot Dc \cdot \left( \frac{j_g}{1,6} \right)^{0,3} \left[ m^2 / s \right] \quad (10)$$

Tabla 1. Condiciones de operación de la columna de flotación.

Condición	$J_g$ [cm/s]	$J_l$ [cm/s]	$\epsilon_g$ [%]	$u_i$ [cm/s]
1	1,1	0,6	8,5	0,69
2	1,6	0,6	11,1	0,71
3	1,9	0,6	15,3	0,75
4	1,1	0,7	9,0	0,76
5	1,6	0,7	13,2	0,80
6	1,9	0,7	15,7	0,83

En la tabla N° 2, se muestran los números de dispersión determinados de los datos experimentales de las curvas DTR, para todos la columna estudiada.

De las estimaciones efectuadas con las ecuaciones: (7) recipiente de extremos abiertos (Ndea), (8) recipiente con extremos cerrados (Ndec) y (9) recipiente con extremos abierto y cerrado (Ndeab), solamente Ndec se aproxima a los valores hallados mediante el ajuste con el modelo de extremos abiertos para la columna piloto.

Tabla N° 2. Números de dispersión determinados para las diferentes configuraciones

Ensayo	Ndea (estimado abierto)	Ndec (estimado cerrado)	Ndeab (estimado ab-cerr)	Ndc (cc. 10)	Ndm (modelo abierto)
1	0.14083	0.31550	0.17448	0.26515	0.25940
2	0.14270	0.32473	0.17710	0.28024	0.27756
3	0.15325	0.38330	0.19195	0.27777	0.29301
4	0.14420	0.32240	0.17920	0.24274	0.24980
5	0.13745	0.29950	0.16977	0.25905	0.26437
6	0.12992	0.26710	0.15935	0.25073	0.25064

Aunque la ecuación (10) fue desarrollada para columnas industriales, es la que mejor simula los valores obtenidos usando el ajuste de la curva con el programa preparado en Matlab, se supone que la relación diámetro altura de la columna de laboratorio permite emplear esta con bastante aproximación.

### 3.2 Determinación de índices cinéticos. Flotación de fluorita.

Previamente se determinan las condiciones de operación para trabajar dentro del rango de valores utilizados en los ensayos DTR. El caudal de alimentación necesario para obtener la velocidad superficial de colas es de 0,4 kg/min de sólidos secos y 2,3 L/min de agua, para un caudal másico de 2,7 kg/min.

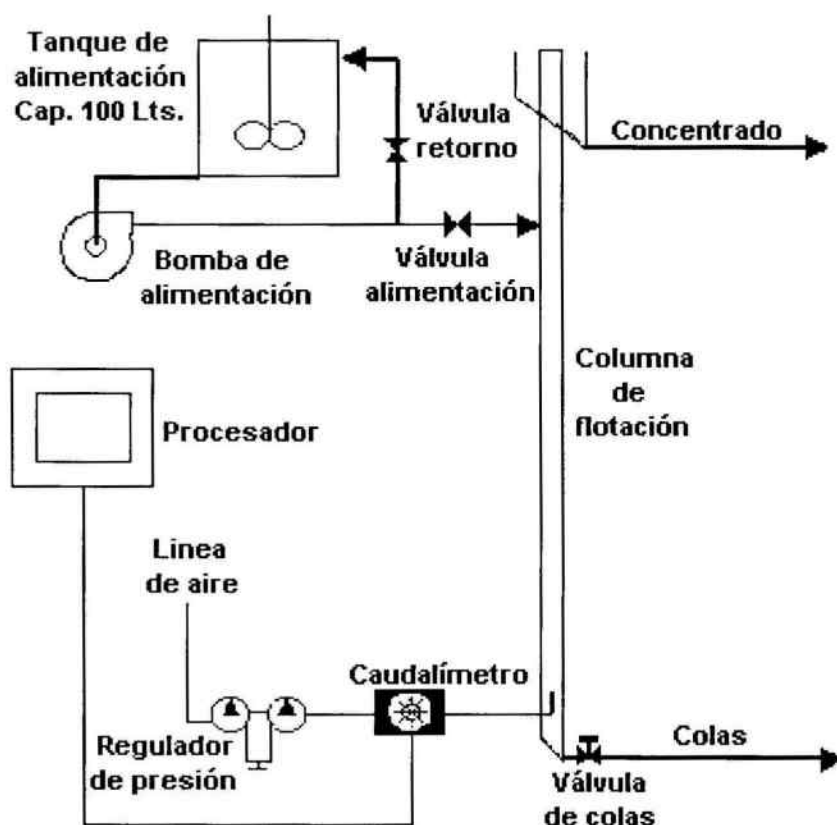


Figura 2. Diagrama de flujo e instrumental del equipo empleado para la determinación de los índices cinéticos  $k$  y  $R_i$ .

La mena de fluorita se reduce 100 % menor a 100 # (150 micr.) para lograr suficiente liberación, luego se divide en partes de 10 kg. para cada ensayo.

El mineral se diluye al 15 % de sólidos en peso con agua corriente en el agitador de 100 L. de capacidad, de donde se alimenta a la columna de flotación. Se ajusta el pH a 9,5 con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y se dosifican 300 g/t de  $\text{Na}_2\text{SiO}_2$  (depresor de silicatos), 30 g/t de extractos de quebracho (depresor de carbonatos) y 500 g/t de Oleato de sodio (colector), agitando durante 10 minutos.

Se inicia el ensayo con la columna vacía, alimentando la pulpa acondicionada, de esta forma se evita que la dilución incida en los subsiguientes ciclos de flotación, por el mismo motivo no se emplea agua de lavado. Las muestras de concentrado y cola se toman durante 1 minuto en forma simultánea, una vez transcurrido los 2/3 del tiempo total, cuando el sistema se encuentra estable.

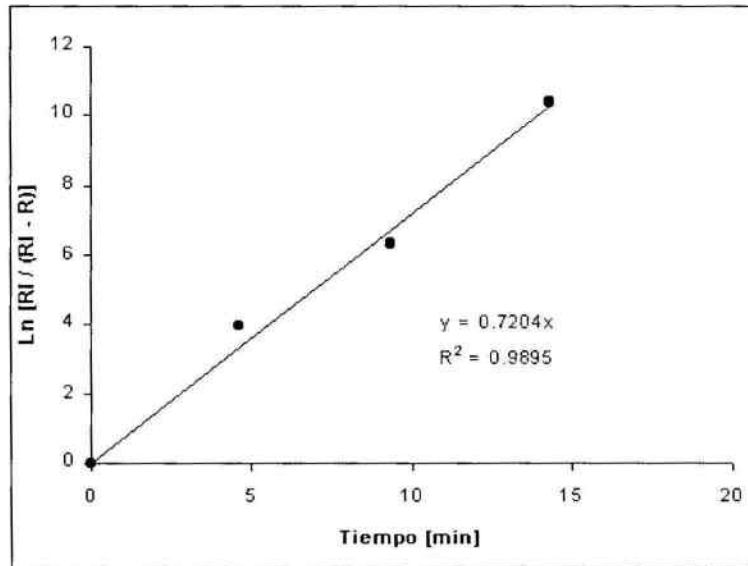
Las condiciones de operación registradas y los resultados obtenidos en los ensayos de flotación con las diferentes configuraciones se muestran en la tabla N° 3. Como se puede observar el mineral se agota prácticamente en el primer ciclo, continuándose dos ciclos más para asegurar mayor información.

**Tabla N° 3. Condiciones de operación y resultados del ensayo con la configuración I.**

Ciclo	Holdup [%]	Jl [cm/seg]	Ct [g/min/cm <sup>2</sup> ]	$\tau_l$ [min.]	$\tau_p$ [min.]	Ndp	Ley % CaF <sub>2</sub>	Recuperación %
1	16.5	0.73	9.59	4.75	4.64	0.23560	79.3	96.4
2	15.3	0.73	0.53	4.84	4.72	0.23985	34.9	1.7
3	13.6	0.71	0.05	5.08	4.94	0.25128	24.0	0.2

Se completan 3 ciclos, durante el primero se destaca una recuperación del 96,4 % quedando una cantidad escasa para los ciclos restantes.

Con los tiempos de residencia y las recuperaciones acumuladas se determinan los índices cinéticos utilizando regresión lineal, resultando: RI = 98.3 % y  $k = 0.7204$  1/s, como se puede ver en la gráfica de la figura 3.



**Figura 3. Gráfica de la regresión lineal para determinar los índices cinéticos  $k$  y RI, de fluorita en la columna de flotación.**

### 3.3 Determinación de los índices cinéticos en celda de laboratorio

A los efectos de comparar el comportamiento de este mineral en celdas de flotación mecánicas, se hizo un ensayo para determinar los parámetros cinéticos de fluorita, bajo el mismo acondicionamiento que el utilizado para realizar el ensayo cinético en la columna.

En la gráfica de la figura 4, se observa el resultado de la regresión lineal donde se aprecia el valor de  $k = 0.8659$  1/s., en esta determinación RI = 92,5 % y la ley del concentrado final 75,32 % de CaF<sub>2</sub>.



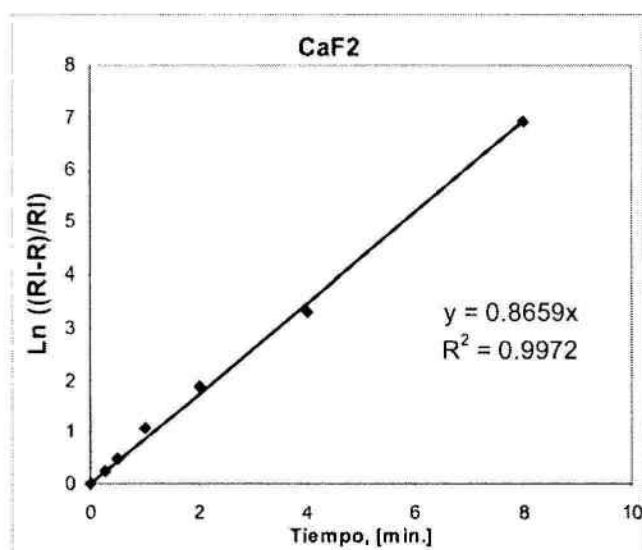


Figura 4. Determinación de los índices cinéticos  $k$  y  $RI$  en celda de flotación mecánica para fluorita

#### 4. CONCLUSIONES

De los ensayos realizados se obtuvo información hidrodinámica para el diseño de una columna de flotación para una micro-planta y que deberá dimensionarse para tratar el concentrado rougher de una planta de flotación de aproximadamente 30 t/día.

Los índices cinéticos de la columna resultaron ser  $RI = 98,3 \%$  y  $k = 0,7204$  1/s, siendo los de la celda de flotación mecánica  $92,5 \%$  y  $0,8659$  1/s, respectivamente.

La ley del concentrado en la columna de flotación alcanzó  $79,3 \%$  de  $CaF_2$ , mientras que para la celda de flotación mecánica resultó  $75,3 \%$  de  $CaF_2$ .

#### 5. REFERENCIAS

Finch, J.A and Dobby, G.S.. Column Flotation. Pergamon Press. 1990.

Dobby, G.S. and Finch J.A.. Flotation Column scale-up an modeling. CIM Bulletin, May 1986. pp 89-96. 1986.

M. Xu and J.A. Finch. The Axial Dispersion Model in Flotation Column Studies. Minerals Engineering, Vol. 4 N° 5/6, pp. 553 – 562, 1991.

Dobby, G.S. and Finch J.A.. Particle Collection in Columns– Gas Rate and Bubble Size Effects. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol 25, N° 1. pp. 9– 13 1986. Pergamon Journal Ltd. 1986.