ESTADO DE AIREACIÓN DE CELDAS Y COLUMNAS DE FLOTACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES METALÚRGICAS

Felipe López [1], Alejandro Uribe [1], Luis Magallanes[2], Roberto Pérez[1]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 841-847

ESTADO DE AIREACIÓN DE CELDAS Y COLUMNAS DE FLOTACIÓN Y SU RELACIÓN CON LAS VARIABLES METALÚRGICAS

Felipe López [1], Alejandro Uribe [1], Luis Magallanes[2], Roberto Pérez[1]*

1: CINVESTAV-IPN Unidad Saltillo, Carr. Saltillo-Monterrey km 13, Ramos Arizpe, Coah. México
2*:* Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico, SIPSA Peñoles, Torreón, Coah. México

** E-mail: felipe.lopez@cinvestav.edu.mx*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008
Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

En el presente trabajo se presentan los resultados de mediciones industriales realizadas en 6 plantas concentradoras del Grupo Peñoles (México), las cuales fueron efectuadas con el objetivo de caracterizar el estado de aireación de celdas y columnas de flotación (reflejado este por el valor de las variables J_g, ε_g, d_b y S_b), el cual se relacionó con el desempeño metalúrgico de las columnas, expresado en términos de las recuperaciones de valores en el concentrado y por su contenido de metal valor (comúnmente conocido como ley o grado). Los resultados obtenidos muestran que el estado de la aireación de las columnas expresado en términos de la relación que existe entre la velocidad superficial de aire (J_g) y la densidad de flujo de área superficial de burbuja (S_b), tiene una relación directa con las variables metalúrgicas ley y recuperación: a medida que se incrementa la velocidad superficial de aire, S_b se incrementa linealmente, lo cual se ve reflejado en un incremento aproximadamente lineal de la recuperación y una disminución también proporcional de la ley del concentrado.

Palabras Claves: *Densidad de flujo de área superficial de burbuja (S_b).*

Abstract

This paper presents results of experimental measurements performed in 6 mineral concentrators of Grupo Peñoles (México) with the main objective of characterizing the aeration status of mechanical and column cells, in terms of the superficial gas velocitiy (Jg), gas hold-up (εg), average bubble diameter (db) and bubble surface area flux (Sb), and to relate these variables with the metallurgical performance of the cells, expressed in terms of concentrate grade and recovery of the mineral species of interest. The results obtained show that both gas rate and bubble surface area flux affect grade and recovery: as the gas rate increases, the bubble surface area flux also increases reflecting in an approximately linear increase in recovery and an inversely decrease in concentrate grade.

Keywords*: Bubble surface area flux (S_b).*

1. INTRODUCCIÓN

La metodología para caracterizar el estado de aireación en celdas y columnas de flotación, tardo más de quince años, siendo desarrollada por el Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) de Australia, la Universidad Cape Town (UTC) de Sudáfrica y el Grupo de Procesamiento de Minerales de la Universidad McGill en Canadá. Estas instituciones han estudiado el desarrollo de la instrumentación requerida, basándose en principios físicos y químicos y en los avances de la tecnología. Los trabajos publicados por Gorian *et al*. [1], (JKMRC), Tucker *et al.* [2] (UTC), Tavera *et al.* [3] (McGill), muestran las principales técnicas de medición, así como los factores involucrados en la dispersión de gas, definidos por: la velocidad superficial de aire (J_g, cm/s), el tamaño de burbuja (d_b, mm) y el aire retenido (ε_g%). Estas variables están estrechamente relacionadas con el estado de aireación de una columna o celda de flotación, sin embargo, también es posible interpretar la dispersión de aire en términos de la densidad de flujo de área superficial de burbuja (S_b), que se define como la velocidad de flujo de área superficial de burbuja por unidad de área transversal de la celda, Finch *et al.* [4], expresada por la siguiente ecuación:

$$S_b = \frac{6J_g}{d_b} \qquad (1)$$

donde S_b es la densidad de flujo de área superficial de burbuja ($cm^2/s/cm^2$, o bien, s^{-1}); J_g es la velocidad superficial del aire (cm/s), d_b es el diámetro promedio de burbuja (cm).

Gorain *et al.* [5], llevaron a cabo un programa de experimentos en una celda de flotación escala piloto de 2.8 m^3 de capacidad, en el cual muestran el efecto que tiene el tipo de impulsor, la velocidad del mismo y el flujo de aire, sobre la relación que existe entre el rendimiento metalúrgico y la densidad de flujo de área superficial de burbuja, demostrando que existe una fuerte correlación entre S_b y la constante cinética de flotación (*k*). Los experimentos se realizaron de forma independiente para cada tipo de impulsor (Chile-X, Pipsa, Outokumpu, Dorr-Oliver), basados en un modelo estadístico 2^4, es decir, dos variables independientes, el flujo de aire (Qg, L/s) y la velocidad del impulsor (N, rpm) con cuatro niveles: para Qg; 16.5, 28.3, 42.5, 56.7 L/sec y para N; 235, 255, 275, 295 rpm, dando un total de 16 experimentos por cada tipo de impulsor. Para validar el trabajo, los autores realizaron una serie de experimentos independientes al programa inicial, utilizando la misma celda. Las pruebas se realizaron en la planta concentradora de la Mina Scuddles, ubicada al occidente de Australia. Para este caso, la celda fue situada en la etapa de limpia del circuito de Zn. Los experimentos consistieron en operar la celda a diferentes condiciones de velocidad del impulsor y flujo de aire, para tres diferentes tipos de impulsor: Batequip, Outokumpu y Dorr Oliver. Para cada condición de operación se colectaron muestras de tamaño de burbuja y velocidad superficial de aire para calcular S_b. Simultáneamente, se colectaron muestras metalúrgicas de alimentación, concentrado y colas para determinar la recuperación y posteriormente calcular la constante cinética de flotación *k*, mediante la ecuación cinética de una celda cuyo régimen hidrodinámico corresponde al mezclado perfecto:

$$k = \frac{R}{\tau(1-R)} \qquad (2)$$

donde *k*, es la constante cinética de flotación (min^{-1}), R es la recuperación fraccional de Zn y τ es el tiempo de residencia promedio en la celda (min).

Los resultados obtenidos demostraron claramente que existe una relación lineal entre S_b y *k*, observándose que esta relación es independiente del tipo de impulsor.

Por otro lado, Finch *et al.* [4] presentan algunos ejemplos sobre la aplicación de la densidad de flujo de área superficial de burbuja, como parámetro clave para caracterizar celdas y columnas de flotación. El trabajo consistió en estudiar el efecto de la recuperación de la tinta de papel reciclado, variando las condiciones de aireación, para dos columnas con diámetro diferente: columna de escala laboratorio de 10 cm de diámetro y columna de escala piloto de 50 cm diámetro. Para la columna de escala laboratorio se estudió el efecto que tiene el uso de dispersores estáticos de aire (Static Mixer Sparger) contra el uso de cuerpos porosos de acero inoxidable, sobre la relación Recuperación-S_b [6]. En el caso de la columna de escala piloto, se analizó el comportamiento de la recuperación de tinta en función de S_b, para tres tipos de dispersores internos: cuerpos porosos de acero inoxidable, tipo tobera (MinnovEx variable gap sparger) y filtros de tela [7]. Las observaciones del trabajo demuestran que para todas las comparaciones indicadas, el rendimiento de la flotación puede ser relacionado de forma directa con la densidad de flujo de área superficial de burbuja, independientemente del tipo de dispersor utilizado. La investigación propuesta por Hernández *et al*. [8] retoma el análisis realizado por Hardie [6] y Leichtle [7], respecto al efecto de la dispersión de gas sobre la recuperación de tinta de papel reciclado. En este caso, se analizaron de forma individual los cuatro parámetros involucrados (J_g, ε_g, d_b y S_b) para estudiar su efecto sobre la constante cinética de flotación. Entre sus observaciones destaca la relación ε_g vs. k_c, como una posible alternativa de sustituir la medición de S_b por la medición de aire retenido, que resulta ser relativamente más fácil de medir.

En la mayoría de los análisis realizados, se ha reportado que la densidad de flujo de área superficial de burbuja juega un papel importante en el proceso de separación, debido a su alta correlación con la constante cinética de flotación. Dada la importancia de esta variable, en el presente

documento se presentan resultados de mediciones industriales efectuadas en plantas concentradoras del Grupo Industrial Peñoles, con el objetivo principal de caracterizar el estado de aireación de columnas de flotación y relacionarlo con leyes y recuperaciones de los metales de interés (Pb, en el circuito de plomo y Zn en el circuito de zinc). Los parámetros que se midieron fueron la velocidad de aire, el aire retenido y el tamaño promedio de burbuja, los cuales se emplearon en la estimación de la densidad de flujo de área superficial de burbuja (S_b), la que se relacionó con la recuperación de las especies minerales de interés.

2. EXPERIMENTACIÓN.

La parte experimental se llevo a cabo en colaboración con el Departamento de Procesamiento de Minerales del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDT) del Grupo Peñoles. A la fecha se han visitado seis de las ocho plantas que se contemplaron para realizar la investigación, las cuales están ubicadas en los estados de Zacatecas, Durango, Estado de México y Chihuahua.

Las pruebas fueron realizadas utilizando el conjunto de sensores descritos a detalle por Nesset *et al*. [9]. La Tabla 1 presenta la planta y la función en el circuito de las columnas caracterizadas, la Tabla 2 presenta las principales características físicas de las columnas y la Tabla 3 presenta la información sobre el sistema de dispersión de aire de las columnas.

Para los experimentos donde se concentra la galena se reportan los valores de ley y recuperación de plomo. De igual forma, en los circuitos en donde se concentra la esfalerita se reportan los valores de ley y recuperación del zinc. Para el caso particular del circuito de Cobre de la Planta 3, se reportan los resultados de plomo.

Tabla 1. Columnas caracterizadas.

Planta	*Columna*
Planta 1	2ª limpia de Pb
Planta 1	3ª limpia de Zn
Planta 2	2ª limpia de Pb
Planta 3	2ª limpia de Cu
Planta 3	3ª limpia de Zn
Planta 4	3ª limpia de Pb
Planta 4	3ª limpia de Zn
Planta 5	1ª limpia de Zn
Planta 6	3ª limpia de Pb
Planta 6	3ª limpia de Zn

Tabla 2. Dimensiones de las columnas (diámetro x altura).

Planta	*Columna*	*Dimensiones, m*
Planta 1	2ª limpia de Pb	3.35 x 10.4
Planta 1	3ª limpia de Zn	2.75 x 10.4
Planta 2	2ª limpia de Pb	2.44 x 10.4
Planta 3	2ª limpia de Cu	----------
Planta 3	3ª limpia de Zn	----------
Planta 4	3ª limpia de Pb	1.52 x 7.92
Planta 4	3ª limpia de Zn	2.13 x 7.92
Planta 5	1ª limpia de Zn	2.13 x 9.75
Planta 6	3ª limpia de Pb	----------
Planta 6	3ª limpia de Zn	----------

Tabla 3. Dispersores de aire de las columnas caracterizadas.

Planta	*Columna*	*Dispersor*
Planta 1	2ª limpia de Pb	----------
Planta 1	3ª limpia de Zn	----------
Planta 2	2ª limpia de Pb	----------
Planta 3	2ª limpia de Cu	4 / tipo slamjet.
Planta 3	3ª limpia de Zn	4 / tipo slamjet.
Planta 4	3ª limpia de Pb	8 / tipo slamjet
Planta 4	3ª limpia de Zn	6 / tipo slamjet.
Planta 5	1ª limpia de Zn	----------
Planta 6	3ª limpia de Pb	16 / tipo casero.
Planta 6	3ª limpia de Zn	----------

2.1 Configuración del sistema de sensores.

La Figura 1 presenta de forma esquemática la configuración del sistema de sensores empleado, en la que se aprecia el plano de referencia, es decir, el plano en que se efectúan las mediciones (normalmente a 100 cm del derrame de la columna), así como los principales parámetros de instalación. La electrónica se ocupa del funcionamiento de dos de los tres sensores (J_g y ε_g), mientras que el sensor para medir tamaño de burbuja funciona de manera independiente, dado

que cuenta con una cámara fotográfica que debe de ser operada manualmente. El sensor de aire retenido y el sensor de velocidad superficial de aire se controlan mediante el software iFIX 4.0; sin embargo solamente la fracción de aire retenido puede ser calculada en línea debido a que no depende de otras variables, como es el caso del sensor de J_g, para el cual, el software solamente despliega en pantalla la variación de la presión en función del tiempo (P vs. t), la cual se registra en la memoria del ordenador.

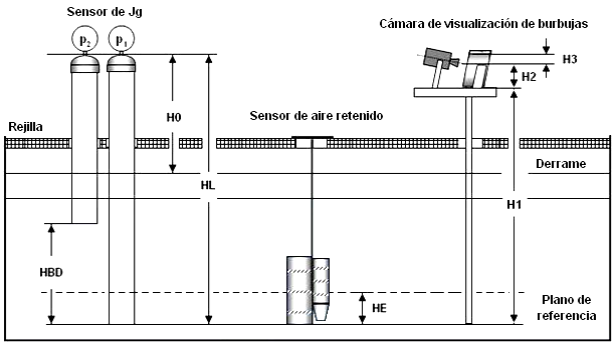


Figura 1. Ilustración esquemática del sistema de sensores empleado en la caracterización de dispersiones agua-aire-sólidos.

2.2 Metodología experimental.

La metodología consistió en variar la velocidad superficial del aire, dentro del rango de operación permitido, en esperar aproximadamente un periodo de tiempo de alrededor de 90 minutos para que la operación alcanzara condiciones de estado estable, y en proceder a realizar las mediciones de aire retenido, velocidad de aire, tamaño de burbuja, y, simultáneamente, en recolectar las muestras de pulpa de alimentación, concentrado y colas, como se esquematiza en la Figura 2. El periodo de mediciones y toma de muestras es de alrededor de 15 minutos. Una vez concluida la toma de muestras, la velocidad de aire es modificada a otro valor predeterminado y el procedimiento se repite.



Figura 2. Muestreo simultáneo, de la dispersión de aire y de las corrientes de pulpa mineral de celdas y columnas de flotación.

Las recuperaciones de los metales de interés se obtuvieron con los ensayes químicos realizados en las muestras de pulpa colectadas, previamente ajustados, y mediante el empleo de la ecuación proveniente de un balance de masa para el metal:

$$R_i = \frac{c_i\,(f_i - t_i)}{f_i\,(c_i - t_i)} \times 100 \qquad (3)$$

donde R_i es la recuperación porcentual del metal i, y c, f y t, son los ensayes químicos (% en peso o g/ton) del metal i en las corrientes de concentrado (c), alimentación (f) y colas (t). Los análisis químicos reportados por el laboratorio fueron ajustados empleando el programa de reconciliación de datos en exceso BilMat Versión 8.1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En primera instancia, la Figura 3 muestra que para las columnas de flotación existe una dependencia lineal entre el aire retenido (ε_g, %) y la velocidad superficial de aire, comportamiento considerado como típico, ya que está bien establecido que el aire retenido guarda una dependencia directamente proporcional respecto de la velocidad de aire. Se considera un rango optimo de aire retenido entre 10 y 20 %, sin embargo, para el caso de las columnas analizadas en las Plantas 4 y 5 se observaron velocidades de aire entre 1 y 1.8 cm/s, con aires retenidos entre 4 y 9%, que aunque son valores relativamente bajos, es posible decir que el sistema de dispersión de aire funciona adecuadamente.

Para describir el comportamiento metalúrgico de las columnas de plomo y zinc que fueron caracterizadas, se considera la relación Razón de enriquecimiento (c/f) vs. Recuperación (variante de la curva típica ley vs. recuperación), que se muestra en la Figura 4.

En la figura 3 las mediciones de aire retenido para las columnas de la Planta 6 no se muestran debido a que se vieron afectadas por la alta conductividad que presentó la pulpa de flotación (aprox. 8 mS/cm). En el caso de la columna de la 1ª limpia de Zinc de la Planta 5, se realizaron pruebas en dos días diferentes: para el encabezado *a* se reportan las pruebas del día 22 de Abril y para el encabezado *b*, se reportan los resultados del día 24 de Abril.

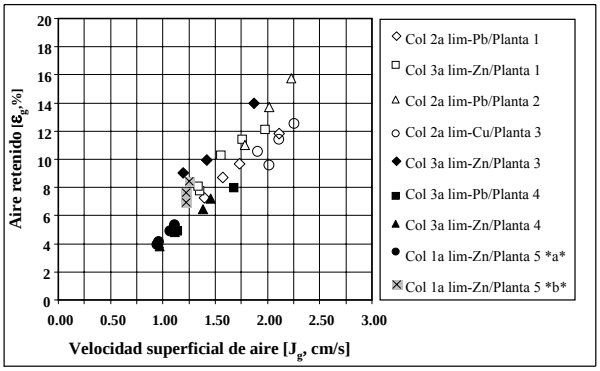


Figura 3. Comportamiento del aire retenido en función de la velocidad superficial de aire para las columnas caracterizadas.

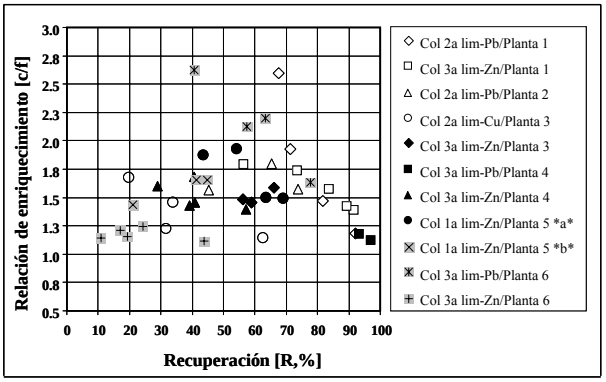


Figura 4. Comportamiento típico de la relación de Ley vs Recuperación para las columnas caracterizadas.

En la figura se observa que las columnas con mejor rendimiento son la 2ª limpia de Pb (Planta 1), 3ª limpia de Zn (Planta 1) y la 3ª limpia de Pb (Planta 6), las cuales presentan una mejor curva de separación, comparadas con el resto de las columnas, es decir, mayor c/f para la misma recuperación. Desafortunadamente, para definir una curva de separabilidad es necesario una cantidad considerable de análisis químicos; sin embargo, el comportamiento metalúrgico típico Ley vs. Recuperación existe en forma particular para todas las columnas, en algunos casos de forma más evidente. La Figura 5 muestra el efecto de la densidad de flujo de área superficial de burbuja (S_b, s^{-1}) sobre la recuperación del metal de interés (R, %). En la figura se observa que a medida que S_b se incrementa, la recuperación aumenta de forma proporcional; este comportamiento ha sido observado en columnas escala laboratorio y piloto por Finch *et al.*[4], quienes concluyen que esta relación existe independientemente del tipo de dispersor empleado en las columnas. Sin embargo, la conexión con los parámetros metalúrgicos es difícil de evidenciar, dada la dificultad de estimar S_b, bajo condiciones de operación como las que se manejan en la industria del procesamiento de minerales, así como la dificultad inherente de la operación industrial en estado estable.

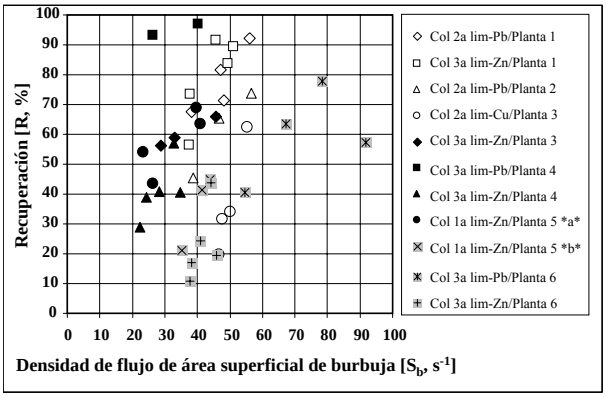


Figura 5. Comportamiento de la Recuperación en función de la densidad de flujo de área superficial de burbuja (Sb).

La medición de la densidad de flujo de área superficial de burbuja presenta varios problemas, dado que involucra el conocimiento del tamaño de burbuja, cuya técnica de medición y metodología de análisis adolece de las siguientes limitaciones:

- Burbujas grandes que se alejan de la esfericidad y que por dicha razón no son consideradas por el análisis de imágenes.
- Burbujas grandes que se traslapan con otras o que tocan las orillas de la fotografía y que por lo tanto no son tomadas en cuenta.
- Burbujas grandes que viajan muy rápidamente y que poseen menor probabilidad de ser muestreadas.

A este respecto el trabajo realizado por Nesset *et al.* [9] demostró que existe una relación aproximadamente lineal entre la densidad de flujo de área superficial de burbuja y la velocidad superficial de aire en celdas mecánicas de diferente

fabricante, que pudiera ser una alternativa para intercambiar la medición de S_b por la medición de J_g, la cual resulta ser más fácil de monitorear. La Figura 6 muestra que este comportamiento también se observa en columnas de flotación con valores de S_b entre 20 y 60 s^{-1}, que corresponde al rango típico de operación para velocidades superficiales de aire entre 0.9 y 2.4 cm/s. En relación con las pruebas realizadas en la columna 3ª limpia de Pb de la Planta 6, se observa que para un mismo valor de J_g se le asocia un valor de S_b mayor, con respecto al resto de las columnas (en un rango de 55 a 95 s^{-1}), debido a problemas de muestreo de tamaño de burbuja (como ya se mencionó), dado que, el dispositivo utilizado presenta limitaciones en la medición de burbujas relativamente grandes (mayores a 3 mm); esto provoca que se subestime el valor del diámetro promedio d_{32} (diámetro Sauter), dando como resultado final un flujo de área superficial de burbuja más grande que el real. Este efecto ha sido documentado en los trabajos realizados por Gorain *et al.* [5] y Heiskanen [10].

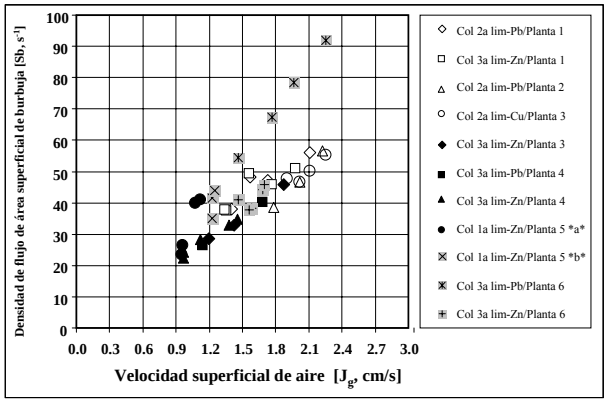


Figura 6. Comportamiento de la densidad de flujo de área superficial de burbuja (S_b, s^{-1}) en función de la velocidad superficial de aire (J_g, cm/s).

La Figura 7 presenta la Recuperación de plomo y zinc obtenidas en las distintas mediciones realizadas en las columnas, mostrando que efectivamente, las recuperaciones son función directa de J_g, dentro del rango típico de esta variable.

La Figura 8 muestra que la ley del concentrado es inversamente proporcional a la velocidad superficial de aire, donde se aprecia que para la mayoría de los casos, a medida que la velocidad superficial de aire se incrementa, el grado del concentrado disminuye. Este efecto contribuye de manera substancial a la validez de la relación recuperación vs. J_g, dado que también concuerda de manera correcta con el comportamiento inverso de las leyes del concentrado. En el caso especifico de las pruebas realizadas en la Planta 2, es probable que las leyes del concentrado se hayan visto afectadas debido a la variación de la ley de alimentación, la cual se incrementó coincidiendo con los incrementos de la velocidad de aire.

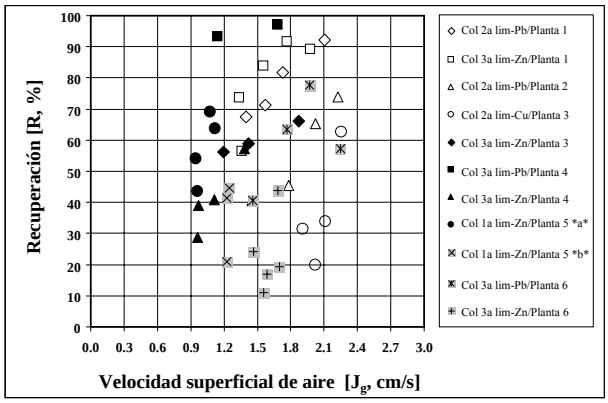


Figura 7. Comportamiento de la recuperación (%) en función de la velocidad superficial de aire (J_g, cm/s).

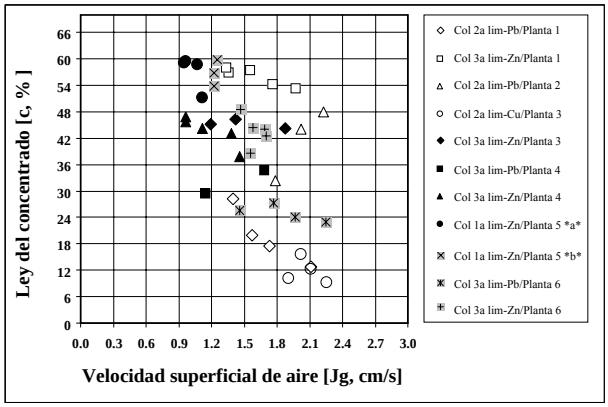


Figura 8. Comportamiento de la ley del concentrado en función de la velocidad superficial de aire (J_g, cm/s).

4. CONCLUSIONES.

- En base a los resultados experimentales a escala industrial obtenidos a la fecha, se observó que la relación Recuperación vs. Sb existe para las columnas de flotación, independientemente de su tamaño y sistema de dispersión de aire.

- Los resultados de ocho meses de investigación, indican que dada la relación lineal entre la recuperación y la velocidad superficial de aire, de igual forma es clara la relación inversamente

proporcional entre la ley del concentrado y la velocidad superficial de aire.

- No se ha podido identificar una relación evidente entre las variables metalúrgicas ley y recuperación con el aire retenido.

5. AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a SIPSA Peñoles su autorización para publicar algunos de los resultados obtenidos en las mediciones efectuadas.

6. REFERENCIAS.

[1] Gorain, B.K., Franzidis, J.-P., Manlapig, E.V., 1996. Studies on impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 3. Effect of superficial gas velocity. Miner. Eng. 9, pp. 639–654

[2] Tucker, J.P., Deglon, D.A., Franzidis, J.P., Harris, M.G., O'Connor, C.T., 1994. An evolution of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell: Miner. Eng. 7, pp. 667-680

[3] Tavera, F.J., Gomez, C.O., Finch, J.A., 1996. Novel gas hold-up probe and application in flotation columns: Trans. Inst. Min. Metall. (Sec. C: Miner. Process. Extr. Metall.) Vol. 105, pp. C99-C104.

[4] Finch, J., Gomez, C., Hardie, C., Leichtle, G., Filippone, R., Leroux, D., 1999. Bubble surface area flux: a parameter to characterize flotation cells. Proceedings 31st Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, Ottawa, Canada, pp. 199–210.

[5] Gorain, B.K., Franzidis, J.-P., Manlapig, E.V., 1997. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 4: Effect of bubble surface area flux on flotation performance. Miner. Eng. 10 (4), pp. 367–379.

[6] Hardie, C., 1998. In Plant comparison of internal and external spargers for column flotation de-inking. Master Thesis, McGill University.

[7] Leichtle, G.F., 1998. Analysis of bubbles generating devices in a de-inking column. Master Thesis, McGill University.

[8] Hernández, H., Gomez, C.O., Finch, J.A., 2003. Gas dispersion and de-inking in a flotation column. Miner. Eng. 16, pp. 739 – 744.

[9] Nesset, J.E., Hernandez-Aguilar, J.R., Acuna, C., Gomez, C.O., Finch, J.A., 2005. Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines. Miner. Eng. 19, pp. 807 - 815

[10] Heiskanen, K., 1999. On the relationship between flotation rate and bubble surface area flux. Miner. Eng. 13 (2), pp. 141-149.