

## Visión artificial aplicada para el monitoreo y control de reactivos en línea en una columna de flotación de laboratorio

R. H. Estrada-Ruiz, R. Pérez-Garibay, D. Martínez-Carrillo, R. Flores-Campos, J. A. Morales-Morales  
Instituto Tecnológico de Saltillo  
Saltillo, Coahuila. México  
rosahilda.estrada@gmail.com  
Teléfono: (52)-844-4389520

**Resumen**— En este trabajo se presenta el uso de visión artificial para monitorear el estado de operación del proceso de separación de minerales a nivel laboratorio, en donde la técnica de análisis de imágenes fue la correlación cruzada normalizada para estimar la velocidad de la espuma. Esta variable puede ser asociada con el índice de mineralización de la espuma que se recupera finalmente en el proceso como mineral valioso. Una vez inferido el estado de operación e identificado sus perturbaciones, se realizó un control automático de reactivos químicos para optimizar el proceso a través de una interfaz gráfica. Para la realización del circuito de control se utilizó la tarjeta Arduino Uno para la activación de bombas alimentadoras de sustancias químicas. El sistema de visión, análisis de imágenes, interfaz gráfica y control de reactivos fue llevado a cabo mediante el software Matlab®.

**Palabras clave:** Análisis de imágenes, correlación cruzada normalizada, máquinas de visión, control de reactivos, columna de flotación.

### I. INTRODUCCIÓN

Coahuila es una de las principales regiones carboníferas de nuestro país, por lo que el desarrollo de nuevas tecnologías resulta de gran importancia para la mejora de los procesos de tratamiento de carbón. La modernización tecnológica de esta industria permitirá ofrecer la mejor calidad de producto para su empleo en la industria termoeléctrica. Además, la automatización industrial a nivel mundial está en pleno desarrollo y la industria de procesamiento de minerales Mexicana debe mantenerse cerca de este desarrollo, si desea permanecer rentable.

En la última década se han desarrollado diferentes técnicas para el monitoreo y control de los sistemas de flotación de minerales, con el afán de mejorar la eficiencia del proceso. Una de estas técnicas ha sido el desarrollo de máquinas de visión artificial, las cuales han sido elaboradas para estandarizar, de forma cuantitativa, el monitoreo que realizan los operadores para controlar el proceso de flotación. Inclusive, en los últimos años se han enfocado esfuerzos en crear lazos de control que utilicen la información provista por estas máquinas y realizar control automático, Brown y col. (2001), Olst y col. (2000).

Hätönen y col. (1999) Moolman y col. (1996), Bonifazi y col. (1998 y 1999(b)) y Hargrave y Hall (1997), han reportado que una de las variables que monitorean los operadores para el control del proceso es el color de la espuma, ya que este se encuentra fuertemente relacionado al tipo de mineral y a su concentración. Por otra parte, Moolman y col. (1996), reportaron que la movilidad, estabilidad y el tamaño de burbuja son las características más significativas de la espuma,

ya que están relacionadas al grado de mineralización de ésta. Investigadores como Cillers y col. (1998), han utilizado estas características para evaluar la eficiencia del proceso y estimar la cantidad de mineral que se recupera. Una de las características más importantes, de las antes mencionadas, es la velocidad de la espuma, ya que este es el indicador más significativo de la cantidad de mineral que se recupera y por consecuencia del estado en el que opera el proceso.

El régimen de movilidad es caracterizado por espumas líquidas con flujo libre y el régimen de inmovilidad por una espuma seca y viscosa. De acuerdo a Moudgil (1993), la cantidad de mineral hidrofóbico establece la mineralización de la espuma la cual influye fuertemente en su viscosidad. Si la viscosidad es muy baja la espuma puede estar muy inestable y fluida para retener partículas valiosas, por otra parte una alta viscosidad puede retardar el drenado de partículas hidrofóbicas para el lavado. Esto puede ser el resultado de una espuma con un contenido de mineral que es muy alto y que da como resultado una disminución en el grado y recuperación del concentrado.

En este trabajo se emplea la técnica de correlación cruzada normalizada para estimar la velocidad de la espuma. Esta técnica ha sido sugerida por Barbian y col. (2006) y validada con análisis fuera de línea por Estrada-Ruiz y Pérez-Garibay (2009).

### II. ANTECEDENTES

#### 2.1. Generalidades de la técnica de correlación cruzada.

El principal uso de la correlación es para determinar qué tan similares son dos imágenes. En este proceso  $f(x,y)$  es una imagen que contiene objetos de interés. Si se quiere determinar si  $f$  contiene un objeto en particular, se genera una plantilla de ese objeto,  $w(x,y)$ . Por tanto, si existe una concordancia, la correlación de las dos funciones será máxima en la ubicación donde  $w$  encuentra similitud en  $f$ .

La Figura 1 muestra el procedimiento de correlación en donde la plantilla  $w(x,y)$  es de tamaño  $J \times K$  dentro de la imagen  $f(x,y)$ , la cual es de tamaño  $M \times N$ , asumiendo que  $J \leq M$  y  $K \leq N$ . El origen de  $f$  es en la parte superior izquierda y el origen de  $w$  es en su centro. Para un valor de  $(x,y)$ , digamos  $(x_0,y_0)$  dentro de  $f$ , se obtiene un valor de correlación. Al variar las coordenadas  $x$  y  $y$  la plantilla se mueve alrededor del área de la imagen dando una función de correlación. El máximo valor de la función de correlación indica la posición en la cual  $w$  tiene mejor igualdad (González y Wood, 2002).

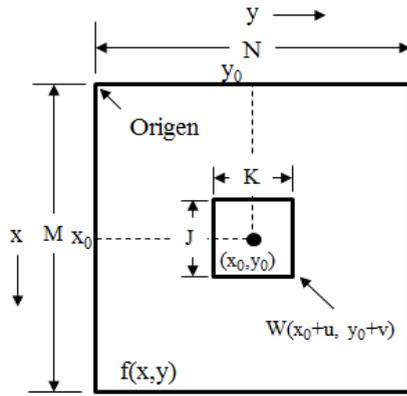


Figura 1. Arreglo para obtener la correlación de f y w en un punto  $(x_0, y_0)$ .

### 2.2. Correlación cruzada normalizada

Lewis (2003) señala que el uso de correlación cruzada para igualar una plantilla es estimada por la medición de distancia (distancia Euclidiana cuadrada)

$$d_{f,w}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f(x, y) - w(x + u, y + v)]^2 \quad (1)$$

Donde f es la imagen y la suma es sobre x,y bajo la ventana que contiene a la plantilla w colocada en u,v. En la expansión de  $d^2$

$$d_{f,w}(u, v) = \sum_{x,y} [f^2(x, y) - 2f(x, y)w(x + u, y + v) + w^2(x + u, y + v)] \quad (2)$$

El término  $\sum w^2(x + u, y + v)$  es constante. Si el término  $\sum f^2(x, y)$  es aproximadamente constante, entonces lo que permanece en el término de correlación cruzada es

$$c(u, v) = \sum_{x,y} f(x, y)w(x - u, y - v) \quad (3)$$

Esta es la medición de la similitud entre la imagen y la plantilla.

Existen varias desventajas en el uso de la ecuación anterior para la igualación de la plantilla:

- Si el brillo de la imagen  $\sum f^2(x, y)$  varía con la posición, la igualación con la Ecuación (3) puede fallar.
- El rango o valores de  $c(u, v)$  dependen del tamaño de la plantilla.
- El resultado de la Ecuación 3 puede modificarse debido a los cambios en la amplitud de intensidad de la imagen, tal como aquellos causados por el cambio de iluminación a través de la secuencia de imágenes.

El coeficiente de correlación supera estas dificultades mediante la normalización de los vectores de la imagen y la plantilla a una longitud de 1, arrojando un coeficiente de correlación que se determina por la siguiente ecuación:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x,y) - \overline{f_{u,v}}][w(x-u, y-v) - \overline{w}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x,y) - \overline{f_{u,v}}]^2 \sum_{x,y} [w(x-u, y-v) - \overline{w}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

donde  $\overline{w}$  es la intensidad luminosa media de la plantilla y  $\overline{f_{u,v}}$  es la intensidad media de  $f(x, y)$  en la región bajo la plantilla. La Ecuación 4 se presenta como la correlación cruzada normalizada (Lewis, 2003).

Cabe recordar que el grado de similitud entre las imágenes será representado por el valor del pico de correlación, en donde los valores cercanos a 1 muestran que las imágenes presentan grandes similitudes entre ellas, valores de correlación cercanos a 0 indican que las imágenes tienen grandes diferencias entre ellas y valores de -1 determinan correlaciones inversas.

### III. APARATO Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La etapa experimental fue realizada en una columna de flotación de laboratorio instrumentada de 10 cm de diámetro y 180 cm de alto, tal como se muestra en la Figura 2. Los dispositivos para realizar la flotación fue un tanque acondicionador de 100 L de capacidad, al cual se le instaló una salida a 10 cm del fondo para suministrar la pulpa a la columna y en la parte superior se ubicaron los soportes de las mangueras para la recepción del concentrado (mineral valioso) y el flujo de colas (ganga). Para el mezclado se utilizó un agitador con una propela impulsado por un motor trifásico. La temperatura de la pulpa se mantuvo constante mediante una resistencia eléctrica que fue controlada con un termopar enlazado a un controlador de temperatura que abre y cierra el circuito para mantenerla estable.

Para el manejo de los flujos de alimentación y colas se emplearon dos bombas. La bomba de alimentación fue utilizada para mantener estable la interfase entre la zona de espuma y de colección mediante un controlador de proceso tipo PID y un transductor de presión. El suministro de aire fue realizado mediante un compresor que fue conectado en serie a un regulador de aire con un rotámetro para ajustar el flujo de aire introducido a la columna.

La prueba de flotación fue llevada a cabo utilizando carbón mineral con un tamaño de partícula de 100  $\mu\text{m}$  en promedio, el cual representó el 8% en peso. Los reactivos empleados fueron Diesel como activador y Metil Isobutil Carbinol como espumante. El acondicionamiento del mineral fue llevado a cabo en un tanque al que se le depositó 80 L de agua, a la cual se elevó la temperatura manteniéndola constante en 30 °C. Habiendo alcanzado la temperatura se agregó el mineral y manteniendo la agitación se adicionó el activador mezclándose por otro periodo de tiempo de 15 min, posteriormente se añadió el espumante acondicionándose por el mismo periodo de tiempo.

La pulpa químicamente acondicionada se recirculó en la columna de flotación ubicando velocidades de los flujos en los valores óptimos para establecer el nivel de cama de espuma deseado. Para establecer una operación en estado estable del proceso se mantuvo en circulación la pulpa por un tiempo de 15 min.

Cabe mencionar que el nivel de cama de espuma se modificó en cinco ocasiones por periodos de tiempos definidos, esto para modificar el tiempo de residencia de las burbujas dentro de la cama de espuma y generar diferentes condiciones de operación.

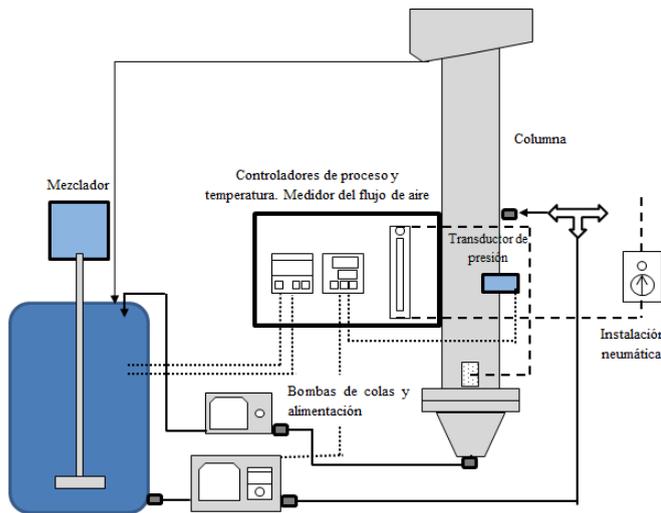


Figura 2. Sistema experimental.

### 3.2. Sistema de adquisición de imágenes

El sistema de adquisición de imágenes de la superficie de la espuma fue conformado por una cámara de alta velocidad ubicada a 120 cm del labio de rebose de la columna, la cual fue conectada a una tarjeta de adquisición de imágenes en una PC. Además, se instaló una cubierta que aísla la toma de las fotografías de la luz exterior y una lámpara de halógeno de 90 W que se colocó a 80 ° de la superficie de la columna, a una altura de 80 cm del labio de rebose.

La adquisición de las imágenes fue llevada a cabo haciendo uso del software Matlab® en donde se estableció un tiempo de captura entre fotografías de 0.04s

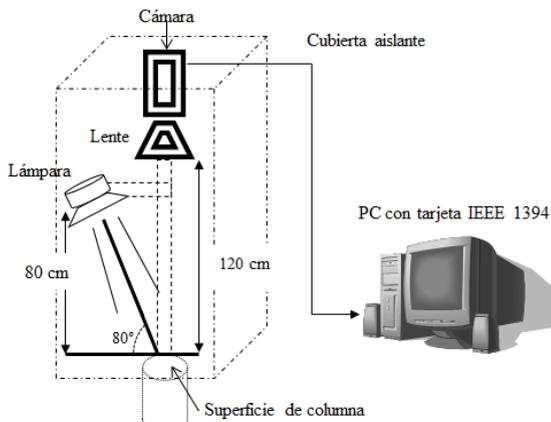


Figura 3. Sistema de adquisición de imágenes.

### 3.3. Sistema de dosificación de reactivos.

Para realizar la dosificación de reactivos se diseñó un sistema como el presentado en la Figura 4 y consta de un sistema programado en Matlab, una tarjeta Arduino Uno, un circuito eléctrico y un par de bombas de descarga de reactivos químicos.

Este sistema de dosificación se encuentra regido por una serie de reglas heurísticas Si – Entonces en donde se hace una comparación de la velocidad estimada y una de referencia. Cuando se encuentra debajo de la medición de referencia se activa una pantalla en donde se tiene la opción de elegir la cantidad de reactivos químicos basados en la calibración de los flujos de las bombas. De tal modo que es posible dosificar diferentes mililitros de colector y espumante de acuerdo al tiempo de la señal de salida del circuito de disparo.

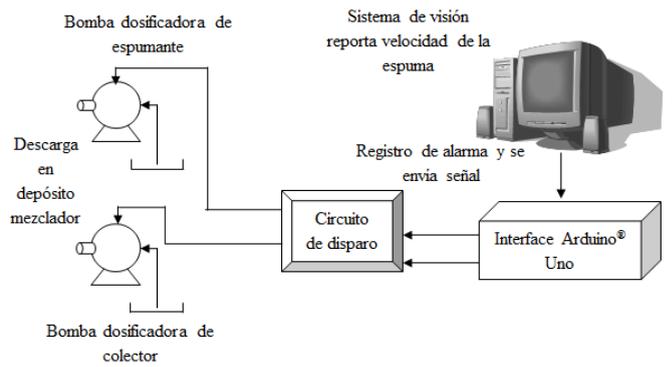


Figura 4. Sistema dosificador de reactivos.

## IV. RESULTADOS

Las imágenes de la superficie de la espuma fueron obtenidas de cuatro diferentes espesores de cama de espuma. Para cada espesor se seleccionaron cinco secuencias de fotografías de las 1000 que se tomaron de cada una. Estas fueron analizadas por dos métodos, el primero fue mediante medición manual de la velocidad de la espuma y el segundo utilizando la técnica de correlación cruzada normalizada.

La medición manual de velocidad de la espuma se realizó primeramente ubicando una sección en la imagen a analizar, esta se ubicó a la izquierda del área transversal de la columna en forma rectangular con el objetivo de considerar un desplazamiento horizontal de las burbujas y medir la velocidad con la que se desplazan al concentrado.

El cálculo de velocidad manual se realizó en el software Image Pro y consistió en elegir una burbuja en la primer imagen de la secuencia seleccionada, a la cual se le dio seguimiento hasta que rebosara o estallara, Figura 5. De tal modo que fue posible establecer el inicio y fin de recorrido de ésta logrando medir la distancia recorrida y conociendo el tiempo entre tomas fue posible calcular su velocidad.

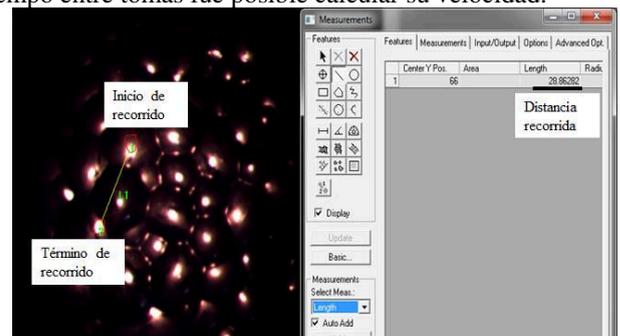


Figura 5. Medición manual de velocidad de la espuma.

Los resultados de la medición manual se presentan en la Figura 6, en donde se aprecia que para espesores de cama de espumas mayores la velocidad es baja, conforme este va disminuyendo el espesor la espuma es más fluida.

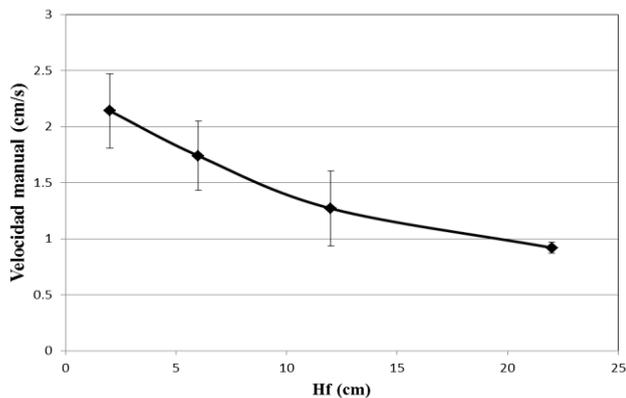


Figura 6. Correlación entre los diferentes espesores de cama de espuma y su velocidad promedio medida manualmente.

Para realizar los cálculos de velocidad de la espuma mediante correlación cruzada normalizada, se utilizó el programa Matlab. El algoritmo programado utiliza una instrucción que considera el siguiente procedimiento general (Lewis, 2003; Haralick y col. 1992).

- 1.- Calcula la correlación cruzada en el dominio del espacio dependiendo del tamaño de las imágenes.
- 2.- Calcula sumas locales mediante el pre cálculo de corridas de sumas.
- 3.- Utiliza sumas locales para normalizar la correlación cruzada y obtener los coeficientes de correlación.

La implementación de lo anterior se llevó a cabo analizando las secuencias de fotografías que se emplearon en la medición manual, así como la misma sección de análisis. El proceso para llevar a cabo la técnica se ilustra en la Figura 7. Primeramente se toman las secciones de análisis de una secuencia de imágenes, Figura 7(a). Estas secciones se digitalizan y normalizan a valores de 0 y 1, sección (b), luego se aplica la técnica de correlación cruzada en donde la primer imagen actuará como la plantilla que será sobre puesta en la siguiente para calcular el nivel de correlación entre las dos, Figura 7(c). Posteriormente se determina la traslación total entre las imágenes, la cual depende en la ubicación del pico de correlación en la matriz de correlación cruzada, conociendo el espaciamiento de píxel en unidades físicas, mm/píxel, se calcula la distancia Euclídeana correspondiente a la traslación y considerando el tiempo de adquisición entre imágenes se calcula la velocidad Figura 7(d).

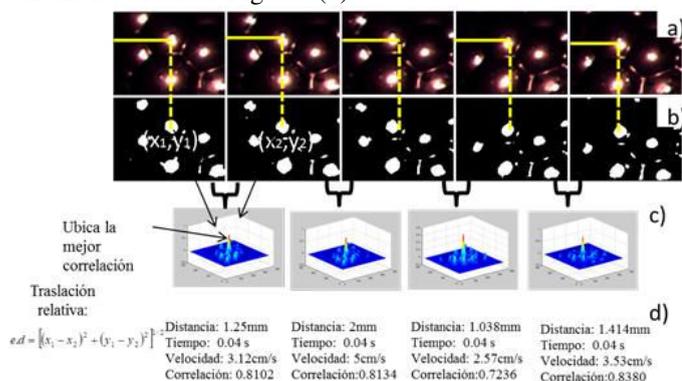


Figura 7. Secuencia de imágenes de la superficie de la espuma (a), imágenes normalizadas a 0 y 1 (b), gráficos de correlación de los pares de imágenes (c) y resultados de los cálculos de distancia y velocidad (d).

Como se mencionó anteriormente la técnica de correlación cruzada normalizada se aplicó a las secuencias de imágenes que se analizaron manualmente. La Figura 8 muestra los resultados en donde cabe mencionar que se utilizó la mediana para descartar los errores drásticos de medición ocasionados por explosión de burbujas y el fenómeno de coalescencia.

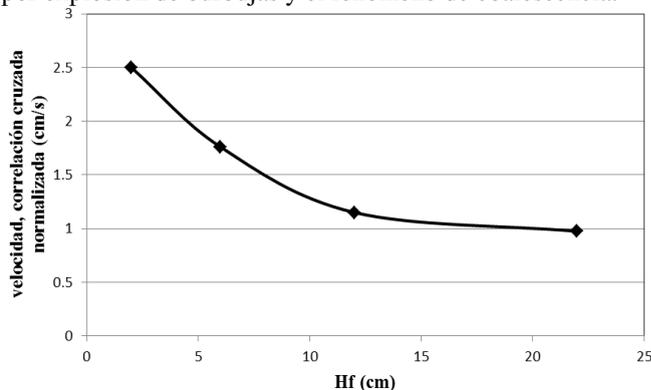


Figura 8. Relación entre el espesor de cama de espuma y su velocidad estimada con la correlación cruzada normalizada obtenida mediante la mediana.

Habiendo obtenido las mediciones de velocidad en forma manual y mediante la técnica de correlación cruzada se realizó una comparación entre ambas. En la Figura 9 se puede observar que existe una buena correlación ( $R^2=0.95$ ) entre los datos, aunque en la velocidad de 2 cm/s los valores estimados automáticamente son ligeramente mayores que las mediciones manuales.

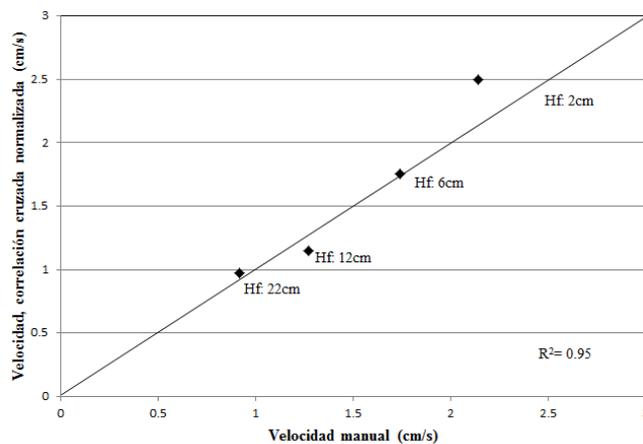


Figura 9. Correlación entre la velocidad medida manualmente y la calculada utilizando la técnica de correlación cruzada normalizada.

Una vez que se ha validado la técnica de correlación cruzada normalizada para medir la velocidad de la espuma se procedió a cumplir con el principal objetivo de este trabajo el cual es la medición en línea mediante interfaz gráfica y un sistema de alarma que indique condiciones bajas de recuperación de mineral asociadas a bajas velocidades de espuma, de modo que al identificar esos estados de operación se active el sistema dosificador de reactivos. En el diagrama de flujo de la Figura 10 se muestra el procedimiento que se utilizó para llevar a cabo lo anterior.

El funcionamiento del programa se basa en la interacción con el usuario, en la pantalla principal, mostrada en la Figura 11, se puede observar que la interfaz fue creada en base a los tres

elementos que forman el sistema de monitoreo y dosificación, los cuales son:

- El sistema de adquisición de imágenes.
- La técnica de correlación cruzada para la medición de la velocidad.
- Sistema de alarma.
- El sistema de dosificación de reactivos.

Al momento de abrir el programa fue necesario adquirir imágenes, con el aparato experimental en funcionamiento se pudo inicializar la adquisición de 1001 imágenes haciendo uso del botón “Adquirir”. Este botón se creó con una lógica de funcionamiento que permitiera enlazar el software con el dispositivo de captura de imágenes para guardar secuencias de 1001 imágenes en el disco duro de la computadora. Posteriormente se ejecutó el programa de análisis de las fotografías capturadas accionando el botón correspondiente.

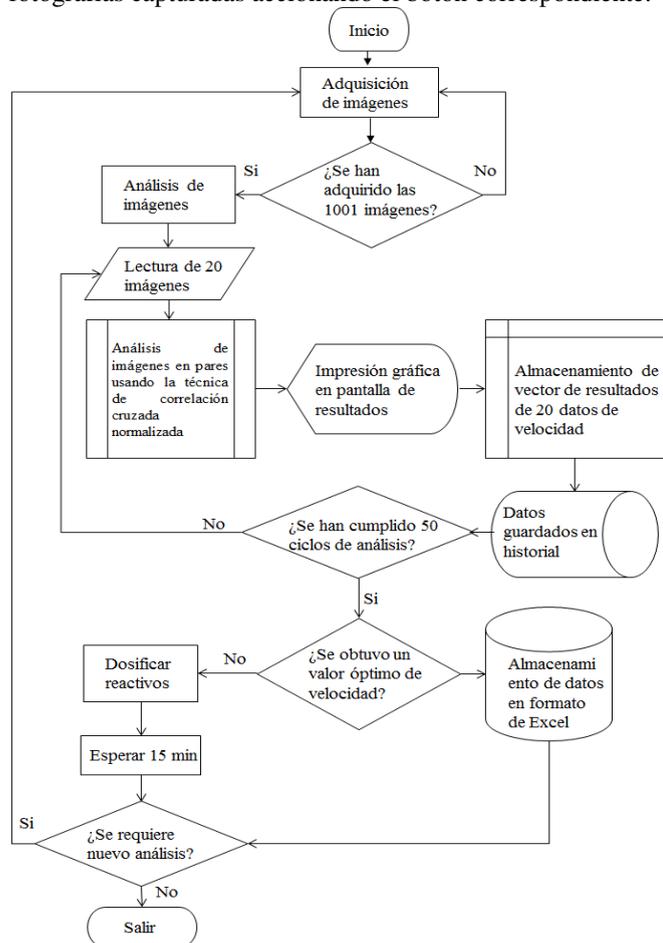


Figura 10. Diagrama de flujo representativo del proceso de medición automática de la velocidad de la espuma y dosificación de reactivos.

En cada ciclo de medición se procedió a la lectura de 20 pares de imágenes cuyos resultados se grafican en la pantalla (Figura 11), de igual modo se almacenaron en la tabla de historial de análisis en el archivo de Excel correspondiente para cada corrida.

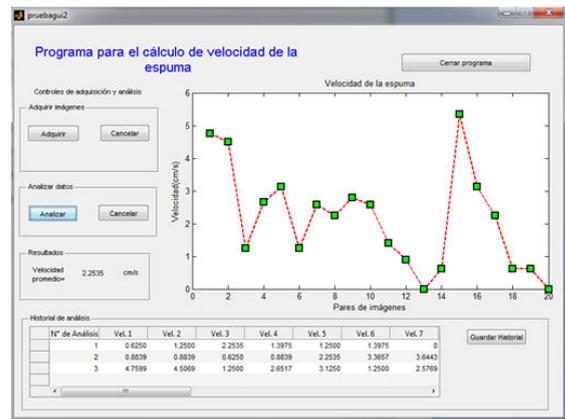


Figura 11. Interfaz gráfica de adquisición de imágenes, análisis de correlación cruzada y almacenamiento de datos.

Para establecer las velocidades óptimas de espuma con las que se recupera el mineral se realizaron pruebas preliminares, de tal modo que si al registrar estimaciones de velocidad por debajo de ese valor se activa un sistema de alarma. Este sistema es representado por una interfaz gráfica en donde es posible adicionar espumante o colector especificando la cantidad de volumen en mililitros que se desea agregar, Figura 12 (a), posteriormente se espera un tiempo para que se efectuó el acondicionamiento y se realiza el análisis nuevamente (b).

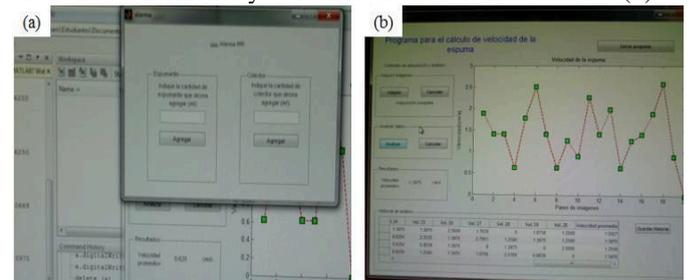


Figura 12. Sistema de alarma para dosificar reactivos (a) y estimación de velocidad de espuma posterior al acondicionamiento químico (b).

Como se ha mencionado anteriormente los resultados de la estimación de la velocidad de la espuma se encuentra relacionado con la recuperación de sólidos en el concentrado. En la Figura 13 se puede observar que cuando se presentan velocidades bajas se tiene baja recuperación de sólidos debido probablemente a que cuando entran burbujas con poca carga a la zona de espuma se presenta un alto grado de coalescencia entre ellas, provocando que un reducido número de burbujas cargadas avancen con baja velocidad en dirección al concentrado.

Adicionalmente, de acuerdo a Moolman y col. (1996), las espumas pueden ser caracterizadas como líquidas, ideales y viscosas, siendo asociadas directamente con la recuperación de sólidos en el concentrado. En la Figura 13 se presenta esta relación en referencia a las velocidades de espuma correspondientes a las diferentes alturas de cama de espuma. Además, se presenta también las recuperaciones de sólidos para cada espesor, en donde se puede apreciar que la espuma ideal (alta recuperación de sólidos) se encuentra en una altura de cama de espuma de 6 cm correspondiente a una velocidad de 1.7 cm/s.

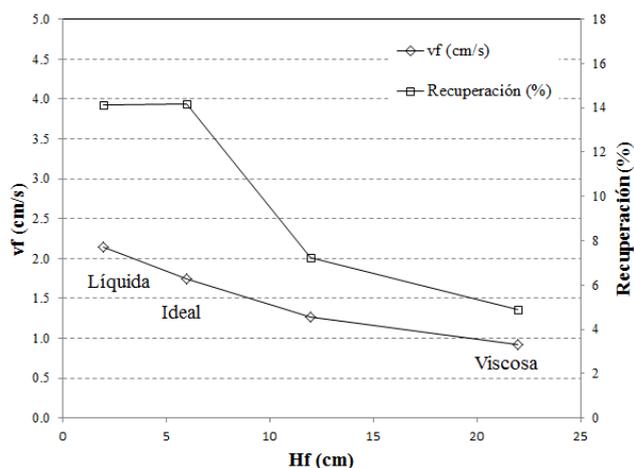


Figura 13. Relación entre el espesor de capa de espuma, velocidad de las burbujas en la superficie y recuperación de sólidos.

## V. CONCLUSIONES

La técnica de correlación cruzada estudiada en este trabajo mostró buenos resultados en la estimación de la velocidad de la espuma de flotación.

La contribución de técnicas novedosas para el monitoreo en línea de los procesos de flotación es de gran importancia para trasladar la apreciación cualitativa realizada por los operadores a una cuantitativa y estandarizada. La estimación de la velocidad de la espuma se asocia fuertemente a la recuperación de sólidos y por consecuencia al estado operacional del proceso. Estas mediciones permiten establecer condiciones de operación adversas cuando se presentan velocidades bajas y a su vez enviar alarmas a los operadores para modificar reactivos químicos a través de una interfaz gráfica.

En este trabajo fue posible realizar un monitoreo en línea a nivel laboratorio en el cual se identificaron perturbaciones en el proceso mediante la estimación de la velocidad de la espuma, una vez identificadas se enviaron alarmas a los operadores para realizar acciones correctivas mediante un sistema automático de adición de reactivos.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CINVESTAV Unidad Saltillo, departamento de metalurgia extractiva por su apoyo en infraestructura para realizar las pruebas experimentales de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Barbian N, Cilliers J. J., Morar S. H., Bradshaw D. J. (2007). Froth imaging, air recovery and bubble loading to describe flotation bank performance. *International Journal of Mineral Processing*. Vol. 84, pp. 81-88.
- Bonifazi G., Serranti S., Volpe F., Zuco R. (1998). Flotation froth characterization by closed domain (bubbles) color analysis. In: 4<sup>th</sup> Int. Conf. on quality control by artificial vision, November 10-12, Takamatsu, Japan, pp. 131-137.
- Bonifazi G., Serranti S., Volpe F., Zuco R. (1999b). Characterization of flotation froth color and structure by machine vision. In *GEOVISION 99*, may 6-7, Liege, Belgium.
- Brown N., Dioses J., Olst M. V. (2001). Advances in flotation process control at Cadia Hill gold mine using froth imaging technology. In *Proceedings of the SME annual meeting*, Denver, USA.

Estrada-Ruiz, R. H., Pérez-Garibay, R. (2009). Análisis de Imágenes de Espumas de Flotación: Cálculo de la velocidad de la Espuma Empleando la Técnica de Correlación Cruzada Normalizada. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales; S1 (2): pp. 811-817.

González R. C., Woods R. E. (2002). *Digital Image Processing Second Edition*. Prentice Hall, pp. 793.

Cilliers J. J., Asplin R. A., Woodburn E. T. (1998). Kinetic flotation modeling using froth imaging data. Chapter 10. *Frothing in flotation II*. Gordon and Breach Science Publishers, pp.336.

Estrada-Ruiz, R. H., Pérez-Garibay, R. Análisis de imágenes de espumas de flotación: cálculo de la velocidad. (2009). *Rev. LatinAm. Metal. Mater.*; S1 (2): 811-817.

Hätönen J., Hyötiniemi H. Y., Miettunen J., Carlsson L. E. (1999). Using image information and partial least squares method to estimate mineral concentrations in mineral flotation. *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on intelligent processing and manufacturing of material*, July 10-15. Vol. 1, pp. 459-464.

Hargrave J. M., Hall S. T. (1997). Diagnosis of concentrate grade and mass flowrate in tin flotation from color and surface texture analysis. *Minerals Engineering*. Vol. 10, pp. 613-621.

Haralick J. M. Shapiro L. G. (1992). *Computer and Robot Vision*, Addison-Wesley. Vol. II, pp. 316-317.

Lewis J. P. (2003). Fast normalized crosscorrelation. Available from: ([www.idiom.com/~zilla/index.html#Publications](http://www.idiom.com/~zilla/index.html#Publications)).

Moolman D. W., Eksteen J. J., Aldrich C., van Deventer J. S. J. (1996). The significance of flotation froth appearance for machine vision control. *International Journal Mineral Processing*. Vol. 48, pp. 135-158.

Olst M. V., Brown M., Bourke P., Ronkainen, S. (2000). Improving flotation plant performance at Cadia by controlling and optimizing the rate of froth recovery using outokumpu Frothmaster. In *Proceedings of the AusIMM seventh mill operators' conference*, Melbourne, Australia.