

Evaluación de un modelo de polidispersión para la caracterización granulométrica de la pulpa laterítica y el cieno carbonatado

Gabriel Hernández-Ramírez
Arístides A. Legrá-Lobaina
Leonel Garcell-Puyans
Rodney Martínez-Rojas

Resumen

Se evaluó la capacidad descriptiva del modelo matemático propuesto por Pérez (2010) para describir la polidispersión en hidromezclas para diversos casos de distribución de frecuencias granulométricas. Se estudió la eficacia del modelo cuando se investigan las materias primas principales del proceso de lixiviación ácida a presión para producir sulfuro de níquel: pulpas lateríticas y cieno carbonatado. Los análisis granulométricos experimentales se realizaron mediante dos técnicas: tamizado convencional y analizador de tamaños de partículas (HORIBA). Los resultados obtenidos, a través de una aplicación informática desarrollada para obtener los modelos matemáticos, demuestran que el modelo es capaz de describir la polidispersión de las hidromezclas estudiadas y se concluye que el cieno carbonatado tiene mayor polidispersión que la pulpa laterítica.

Palabras clave: coeficiente de polidispersión; granulometría; pulpa laterítica; cieno carbonatado; modelos matemáticos.

Evaluation of poly-dispersion models for granulometric characterization of laterite slurries and calcium carbonate mud

Abstract

The capability of the mathematical model proposed by Pérez (2010) to describe poly-dispersion in hydro-mixtures for diverse cases of granulometric frequency distributions was evaluated. The efficacy of the model was assessed when investigating the raw materials required by the acid leach process to produce nickel sulphides: laterite slurries and calcium carbonate mud. The experimental granulometric analysis was conducted by implementing two techniques: conventional screening and particle size analyzer (HORIBA). The results obtained from the application of computer-based techniques to generate mathematical models show that the model is capable to describe poly-dispersion in hydro-mixtures. It was concluded that poly-dispersion in calcium carbonate mud is higher than in laterite slurries.

Keywords: poly-dispersion coefficient; grain sizing; laterite slurries; calcium carbonate mud; mathematical models.

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de lixiviación ácida a presión (LAP), que utiliza la industria hidrometalúrgica cubana para la producción de sulfuro de níquel, manipula y transporta gran variedad de suspensiones de variada naturaleza: laterita, cieno carbonato, yeso y sulfuro de Ni+Co, entre otras; siendo la primera, con un típico color amarillo-parduzco, la materia prima fundamental que se extrae de los yacimientos ferroniquelíferos de Moa.

En la Planta de Preparación de Pulpa se garantiza la distribución de tamaño de partículas minerales, beneficiando el material mediante un proceso de preparación mecánica, hasta obtener la máxima recuperación de las partículas de limonita de un tamaño menor a 0,84 mm. La pulpa, que es enviada a la Planta de Espesadores para su posterior procesamiento, contiene un 25-30 % de sólido.

El cieno carbonatado (coral), procedente de los yacimientos situados en la bahía de Moa, es de color gris claro, con restos de conchas de organismos marinos que son eliminados en un proceso de beneficio, donde se convierte en una pulpa cruda y espesa, con 15-25 % de sólido. Se utiliza para neutralizar el licor crudo (pH=2) que llega de la Planta de Lavaderos y de esta forma garantizar la eficiencia de precipitación, ya que el ácido libre en el licor tiene un efecto negativo en la precipitación de los sulfuros. Las pulpas elaboradas con el cieno se componen de partículas menores de 0,85 mm.

El tamaño de partículas es un factor muy importante en el comportamiento reológico de las suspensiones, probablemente por su contribución a las fuerzas de Van der Waals (Cerpa *et al.* 1996) y esenciales en el diseño y operación de los sistemas de bombeo. Debido a la composición granulométrica de las suspensiones de mineral laterítico, estas deben analizarse como sistemas coloidales que exhiben características reológicas específicas. El desconocimiento que existe en este sentido en los escenarios tecnológicos conlleva a que se tomen decisiones que provocan la inadecuada elección de tuberías y bombas (Madigan, Leong & Ong 2009).

Generalmente las suspensiones de partículas finas exhiben mayores viscosidades que las de partículas gruesas, con excepción de aquellas suspensiones que poseen propiedades magnéticas con las cuales ocurre lo contrario; tal es el caso de las pulpas de maghemita, según lo que reportan Garcell y demás colaboradores (1998). En las suspensiones acuosas de minerales la viscosidad está determinada por el tamaño y la distribución

de las partículas en suspensión (Cerpa *et al.* 1999; Cerpa *et al.* 2001; Pérez 2004; Rivas y Colás 2005).

Existen varios modelos para describir la distribución granulométrica de partículas sólidas en procesos de reducción y de clasificación de tamaño; entre ellos se encuentran los modelos de Gaudin- Schuhmann, de Rosin-Rammler-Sperling, de Gaudin-Meloy y de otros autores como Falcón (2006), pero se ha comprobado que ninguno consigue describir la granulometría de las materias primas de la LAP (Pérez, Cardero & Garcell 2009).

Pérez (2010) en su tesis de doctorado desarrolla un modelo matemático capaz de describir la distribución granulométrica de estas suspensiones y de analizar la polidispersión, aspecto no abordado hasta la fecha. Este modelo, que en lo adelante se denominará Modelo de Garcell-Pérez (MGP) ha sido el elegido para el presente estudio y se expresa por la ecuación:

$$Y_N = \left(\frac{D_N}{(1 - B_N) \cdot D_N + B_N} \right)^s \quad (1)$$

Donde: s es el coeficiente de polidispersión y B_N es un coeficiente de ajuste, ambos adimensionales.

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar, mediante una aplicación informática, la eficacia del MGP en el cálculo de la polidispersión en la pulpa laterítica y el cieno carbonatado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Procedimiento para determinar coeficiente de polidispersión

Pérez (2010) propone para el cálculo del coeficiente de polidispersión el siguiente procedimiento:

1. Realizar el análisis granulométrico experimental del material bajo estudio, mediante un juego de n tamices o mediante un analizador de partículas equivalente. Escribir los resultados en forma de datos ($DP_i; YP_i$).

Donde:

$$i=1, \dots, n$$

DP_i : es la medida en mm de cada abertura de malla;

YP_i : es la frecuencia porcentual de partículas para el valor DP_i .

2. Calcular para cada DP_i la frecuencia acumulada que se denominan YB_i ,

3. Determinar los valores D_{med} y Y_{med} donde el segundo es el valor de YB_i que supera por primer vez al 50 %. D_{med} es el valor de DP_i correspondiente.
4. Obtener un nuevo juego de datos denominado $(DN_i; YN_i)$ donde:

$$DN_i = \frac{DP_i}{D_{med}} \text{ y } YN_i = \frac{YB_i}{Y_{med}}$$
5. Ajustar estos últimos datos al modelo: (Ecuación 1).

En este caso es imposible realizar un Ajuste Mínimo Cuadrado clásico, debido a que ese modelo no se puede transformar en un modelo lineal respecto a s y a B_N . Según Hyams (1997), un método de elección es el de Levenberg-Marquardt.

Este método (de compleja implementación computacional) necesita de asistencia humana permanente para garantizar su convergencia en cada caso; además, es un método muy sensible a los cambios en sus parámetros de aplicación (Hyams 1997).

6. Calcular el valor de $k = s \times B_n$. Según la autora citada el valor de s refleja cuantitativamente la polidispersión del material, es decir, en la medida que todas las partículas sean del mismo tamaño, el valor de s decrecerá, de manera que para los sistemas monodispersos $s=0$.

Se estudia el comportamiento de s , B_N y k para diversas distribuciones granulométricas del material que se investiga con el fin de evaluar en disímiles escenarios la capacidad descriptiva del modelo matemático. Ese es un objetivo preliminar de este trabajo y para cumplirlo se analizarán los resultados de los valores de s , B_N y k , el coeficiente de correlación r (CC) y el error estándar e (ES) (Miller, Freund & Johnson 2005), cuando se ajusta el Modelo de Garcell-Pérez a ciertos datos que muestran variaciones prefijadas.

Para ello se ha desarrollado una aplicación informática cuyo fundamento algorítmico es la discretización de los espacios de soluciones de los parámetros s y B_N y luego la búsqueda exhaustiva de sus valores, tal que maximicen el valor del coeficiente de correlación.

El usuario debe cargar el archivo con los datos $(DN_i; YN_i)$ y definir los parámetros de trabajo:

- sI : Valor inicial de s para la búsqueda exhaustiva
- sF : Valor final de s para la búsqueda
- $sPasoI$: Valor del paso de s para la búsqueda normal

- sPasoF: Valor del paso de s para la búsqueda refinada
- CriCC: Valor del coeficiente de correlación a partir del cual la búsqueda se realiza con sPasoF.
- MsMax: Valor máximo de s hasta el cual la búsqueda puede extenderse en una cadena de búsquedas.
- BnMax: Valor máximo de B_N . El valor mínimo de B_N es 0.
- BnPaso: Valor del paso de B_N para cualquier búsqueda.

La eficacia del ajuste dependerá de una adecuada selección de los parámetros de trabajo.

Los materiales que se utilizarán son:

- Para el objetivo preliminar:

Considerando la abertura de juegos de tamices se supone que los 7 valores posibles de D_N son: $D_{N1}=0,045$; $D_{N2}=0,1792$; $D_{N3}=0,3133$; $D_{N4}=0,4475$; $D_{N5}=0,5817$; $D_{N6}=0,7158$ y $D_{N7}=0,8487$. Para cada uno de ellos se supone que se puede obtener experimentalmente una frecuencia Y_{Ni} ($i=1,\dots,7$). Estos valores se simularán en tres ocasiones de la siguiente manera:

Para los valores Y_{N1} ($i=1$), Y_{N4} ($i=4$) y Y_{N7} ($i=7$). Se toman los 21 valores Y_{Nij} ($j=1,2,\dots,21$), tal que $Y_{Ni1}=0$; $Y_{Ni1}=5$;...; $Y_{Ni21}=100$. El resto de los valores Y_{N1j} , Y_{N2j},\dots,Y_{N7j} se toman iguales a $\frac{100-Y_{Nij}}{6}$. Para cada juego de 7 datos

$(D_{Ni}; Y_{Nij})$ se obtienen los correspondientes valores de s , B_N , k y r . Los resultados aparecen en las columnas 3 a 6, 7 a 10 y 11 a 14 de la Tabla 1.

Estas simulaciones tienen como propósito evaluar si el modelo de Garcell-Pérez es capaz de modelar adecuadamente (según el coeficiente de correlación) la polidispersión de hidromezclas cuando se producen variaciones de granulometría entre las partículas más finas, de diámetro medio y más gruesas. Este aspecto no ha sido tratado hasta el momento.

- Para el objetivo principal:

Las muestras de hidromezclas de pulpas lateríticas y de cieno carbonatado fueron tomadas directamente del proceso tecnológico, en condiciones normales de operación en los puntos de toma muestras.

Estas mediciones de granulometría se realizaron de dos formas:

1. Análisis del tamizado convencional, para determinar la granulometría mayor de 0,045 mm; por tamizado vía húmeda, empleando un juego

de tamices de la serie ASTM con las siguientes aberturas: 0,85; 0,3; 0,15; 0,06; 0,09; 0,075 y 0,045 mm.

2. La determinación del contenido de las partículas menores de 0,045 mm, empleando un analizador de tamaños HORIBA LA-910.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de la simulación del modelo

Al procesar los juegos de datos que simulan diversos comportamientos granulométricos similares a los que pudieran presentar las hidromezclas se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 1. Resultados de la modelación para la variación de las frecuencias para diferentes diámetros

| Y _{Nij} | i | D _N =0,038 (i=1) | | | | D _N =0,150 (i=4) | | | | D _N =0,8487 (i=7) | | | |
|-------------------|-----|-----------------------------|----------------|--------|----------|-----------------------------|----------------|--------|----------|------------------------------|----------------|----------|----------|
| | | S | B _N | k | r | s | B _N | k | R | s | B _N | k | r |
| Y _{Nj1} | 0 | 2,673 | 0,2540 | 0,6791 | 0,996823 | 0,7878 | 0,6954 | 0,5478 | 0,993847 | 2,1837 | 0,297 | 0,6486 | 0,998582 |
| Y _{Nj2} | 5 | 2,007 | 0,3062 | 0,6145 | 0,997806 | 1,0282 | 0,5395 | 0,5547 | 0,996761 | 1,9836 | 0,333 | 0,6605 | 0,999041 |
| Y _{Nj3} | 10 | 1,707 | 0,3913 | 0,6679 | 0,998305 | 1,707 | 0,3913 | 0,6679 | 0,998305 | 1,7085 | 0,391 | 0,6680 | 0,998305 |
| Y _{Nj4} | 15 | 1,233 | 0,4762 | 0,5876 | 0,998725 | 2,0501 | 0,3156 | 0,647 | 0,997130 | 1,2549 | 0,456 | 0,5722 | 0,996830 |
| Y _{Nj5} | 20 | 0,944 | 0,5479 | 0,5176 | 0,999042 | 12,7899 | 0,0514 | 0,6574 | 0,995642 | 1,0966 | 0,538 | 0,5900 | 0,994019 |
| Y _{Nj6} | 25 | 0,741 | 0,6808 | 0,5049 | 0,998951 | 12,1065 | 0,0515 | 0,6235 | 0,989451 | 0,951 | 0,635 | 0,6039 | 0,989975 |
| Y _{Nj7} | 30 | 0,601 | 0,7291 | 0,4383 | 0,999227 | 11,5207 | 0,0516 | 0,5945 | 0,978733 | 0,6952 | 0,842 | 0,5854 | 0,987692 |
| Y _{Nj8} | 35 | 0,494 | 0,7698 | 0,3805 | 0,999442 | 10,9952 | 0,0518 | 0,5696 | 0,963916 | 0,6132 | 0,986 | 0,6046 | 0,984005 |
| Y _{Nj9} | 40 | 0,386 | 0,8765 | 0,3386 | 0,999649 | 10,56 | 0,0519 | 0,5481 | 0,945424 | 0,4593 | 1,467 | 0,6738 | 0,985799 |
| Y _{Nj10} | 45 | 0,332 | 0,9225 | 0,3065 | 0,999850 | 10,18 | 0,052 | 0,5294 | 0,923634 | 0,3238 | 2,865 | 0,927687 | 0,981350 |
| Y _{Nj11} | 50 | 0,2962 | 0,9432 | 0,2794 | 0,999847 | 9,85 | 0,0521 | 0,5132 | 0,898887 | 0,3164 | 3,028 | 0,958059 | 0,983691 |
| Y _{Nj12} | 55 | 0,2448 | 0,9533 | 0,2334 | 0,999905 | 1225,36 | 0,0004 | 0,5024 | 0,878906 | 0,3708 | 12,8 | 4,74624 | 0,989302 |
| Y _{Nj13} | 60 | 0,2010 | 0,9623 | 0,1934 | 0,999944 | 73,025 | 0,0067 | 0,4893 | 0,849217 | 0,3609 | 19,92 | 7,189128 | 0,991171 |
| Y _{Nj14} | 65 | 0,1642 | 0,9690 | 0,1591 | 0,999969 | 35,64 | 0,0134 | 0,4776 | 0,816975 | 0,354 | 31,787 | 11,25259 | 0,993069 |
| Y _{Nj15} | 70 | 0,1319 | 0,9750 | 0,1286 | 0,999984 | 22,785 | 0,0205 | 0,4671 | 0,782278 | 0,3491 | 53,046 | 18,51835 | 0,994860 |
| Y _{Nj16} | 75 | 0,1032 | 0,9810 | 0,1012 | 0,999993 | 16,34 | 0,028 | 0,4575 | 0,745151 | 0,3457 | 94,864 | 32,79448 | 0,996445 |
| Y _{Nj17} | 80 | 0,0779 | 0,9860 | 0,0768 | 0,999997 | 12,465 | 0,036 | 0,4487 | 0,705513 | 0,3434 | 189,107 | 64,93934 | 0,997761 |
| Y _{Nj18} | 85 | 0,0557 | 1,0000 | 0,0557 | 0,999999 | 9,885 | 0,0446 | 0,4409 | 0,663172 | 0,342 | 450,615 | 154,1103 | 0,998773 |
| Y _{Nj19} | 90 | 0,0357 | 1,0000 | 0,0357 | 0,999999 | 8,055 | 0,0538 | 0,4334 | 0,617823 | 0,3419 | 1481,18 | 506,4154 | 0,999473 |
| Y _{Nj20} | 95 | 0,0174 | 1,0000 | 0,0174 | 0,999999 | 6,67 | 0,0639 | 0,4262 | 0,568852 | 0,3425 | 11068,4 | 3790,957 | 0,999874 |
| Y _{Nj21} | 100 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5,58 | 0,0752 | 0,4196 | 0,515280 | 41 | 0,5 | 20,6120 | 1,000000 |

El comportamiento de s , B_N y k para $D_N=0,038$ se puede observar en la Figura 1.

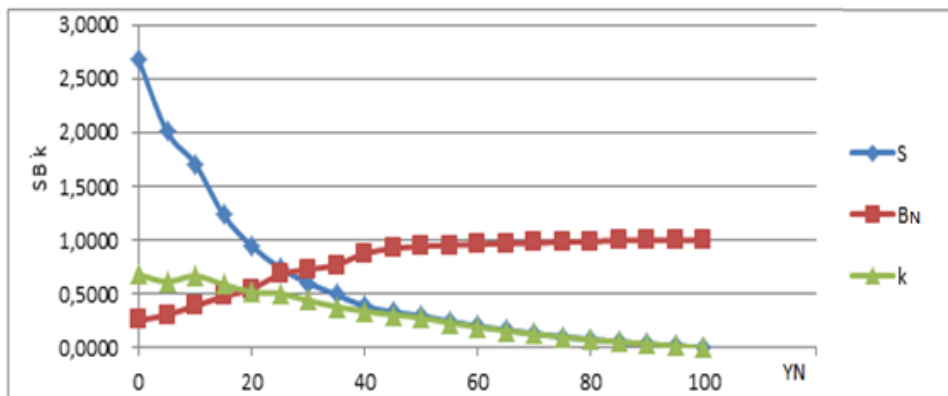


Figura 1. Variación de la frecuencia de los granos con $D_N=0,038$.

El comportamiento de s para las fracciones medias se muestra en la Figura 2 y para las fracciones gruesas en la Figura 3.

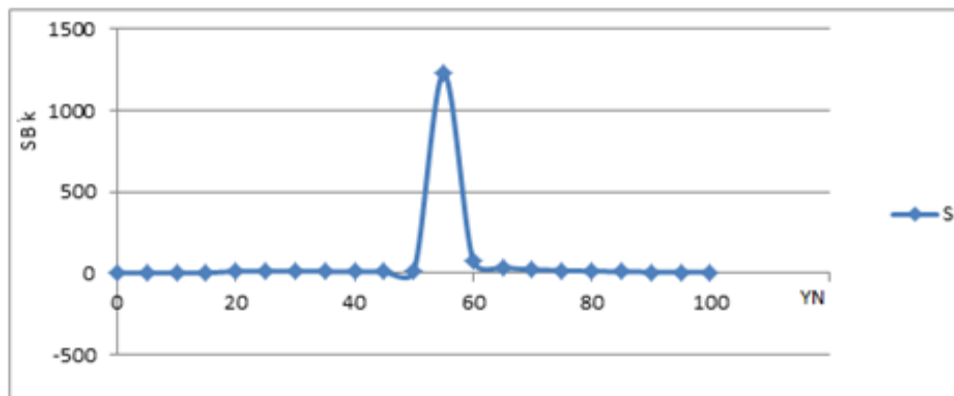


Figura 2. Comportamiento de s para el caso de variación de la frecuencia de los granos con $D_N=0,15$

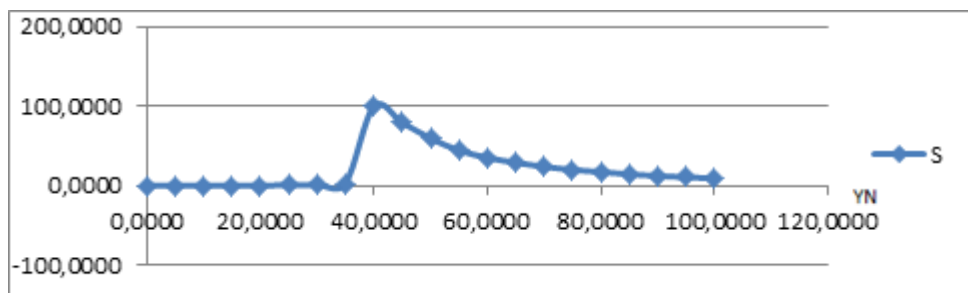


Figura 3. Comportamiento de s para el caso de variación de la frecuencia de los granos de diámetros $D_N=0,8487$.

3.2. Discusión de la simulación del modelo

De los resultados obtenidos en el epígrafe anterior puede observarse que cuando la variación de la frecuencia se produce en las partículas presentes de menor diámetro, el modelo se ajusta muy bien (tal como lo indican los valores del coeficiente de correlación en la Tabla 1, columna 6) y los resultados son numéricamente coherentes (Figura 1).

Algo similar sucede cuando varían las frecuencias de partículas de mayor diámetro, excepto en la última fila donde el valor de s queda fuera de la tendencia que presentan el resto de los valores de ese parámetro.

El resultado de modelar del comportamiento de la dispersión, cuando varía la frecuencia de las partículas de diámetro medio, es deficiente y así lo indican los valores de los coeficientes de correlación en la Tabla 1.

En definitiva, todos esos resultados revelan que, el modelo es perfectamente aplicable a los casos donde la mayor frecuencia esté presente para las partículas de menor diámetro.

Otro aspecto interesante que se puede observar en la Tabla 1 es que, cuando todas las partículas tienen las mismas frecuencias (ver fila 3) y es por tanto el escenario de mayor polidispersión, el valor de s no es el mayor (los valores de s en la dos primeras filas son mayores). Esto indica que cuando varía la frecuencia de las partículas de menor diámetro, el modelo tiene una clara correlación entre el valor de s y la polidispersión, solo si la frecuencia de las partículas más finas es mayor o igual que cualquiera de las frecuencias restantes (en este caso el modelo es adecuado a partir de la tercera fila de la Tabla 1).

Un análisis del diámetro 0,150 revela que el modelo es conveniente solo en las primeras cuatro filas que muestran los casos donde la frecuencia que varía es menor o cercana a las demás. En diámetro 0,8487 se observa que el modelo es representativo de la polidispersión, excepto para la última fila, aunque debe observarse que se produce un salto de monotonía en la fila 13.

3.3. Presentación de datos de los casos de estudio

Como puede observarse en la Tabla 2 la distribución granulométrica en las suspensiones de la pulpa laterítica tiene un comportamiento propio de sistemas polidispersos.

Tabla 2. Distribución granulométrica por tamizado

| Dp,mm | Pulpa laterítica | | | Cieno carbonatado | | |
|-------|------------------|-----------|---------------|-------------------|-----------|---------------|
| | % Retenido | % Cernido | Frecuencia YB | % Retenido | % Cernido | Frecuencia YB |
| 0,85 | 1,51 | 98,48 | 4,65 | 1,36 | 98,63 | 4,19 |
| 0,3 | 4,65 | 93,82 | 4,22 | 4,19 | 94,44 | 2,1 |
| 0,15 | 4,22 | 89,59 | 3,16 | 2,1 | 92,34 | 1,4 |
| 0,106 | 3,16 | 86,43 | 1,63 | 1,4 | 90,94 | 2,58 |
| 0,09 | 1,63 | 84,79 | 1,20 | 2,58 | 88,36 | 9,41 |
| 0,075 | 1,20 | 83,59 | 4,86 | 9,41 | 78,95 | 10,64 |
| 0,045 | 4,86 | 78,73 | 78,73 | 10,64 | 68,31 | 68,31 |
| 0 | - | - | 0 | - | - | 0 |

Se pudo determinar por tamizado vía húmeda que la pulpa cruda de laterita posee un 22 % de partículas mayores de 0,045 mm; por tanto, las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, lo cual corrobora lo obtenido en trabajos anteriores (Avramidis y Turian 1991; Rivas y Colás 2005; Pérez & Garcell 2006; Hernández *et al.* 2015).

Las pulpas de cieno carbonatado forman sistemas altamente polidispersos. Las partículas mayoritarias corresponden a la clase menor de 0,045 mm, constituyendo el 68,31 % en peso de las fases sólidas en la muestra, lo cual confirma los resultados de Martínez, Izquierdo y Pompa (2014).

Para conocer las partículas contenidas en el 78,73 %, menores a 0,045 mm, se empleó un analizador de tamaños HORIBA, el cual da a conocer todos los diámetros de partículas que tiene la muestra. En las Figuras 4 y 5 se puede apreciar que las partículas más finas son mayoritarias y determinan la velocidad de sedimentación de este mineral, así como su comportamiento reológico.

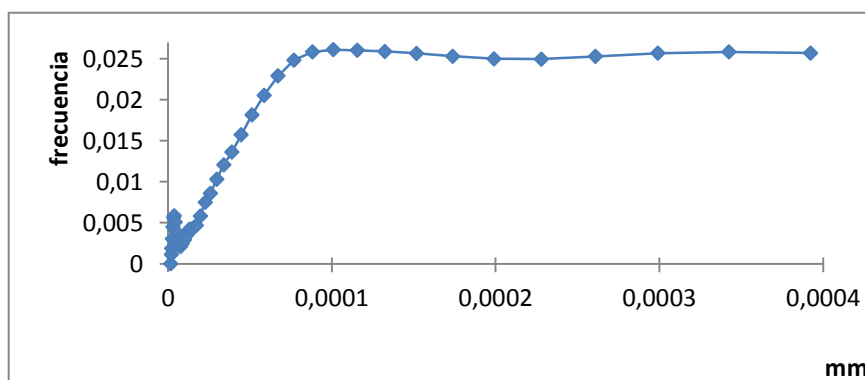


Figura 4. Comportamiento de la frecuencia granulométrica de la pulpa cruda según el análisis por HORIBA.

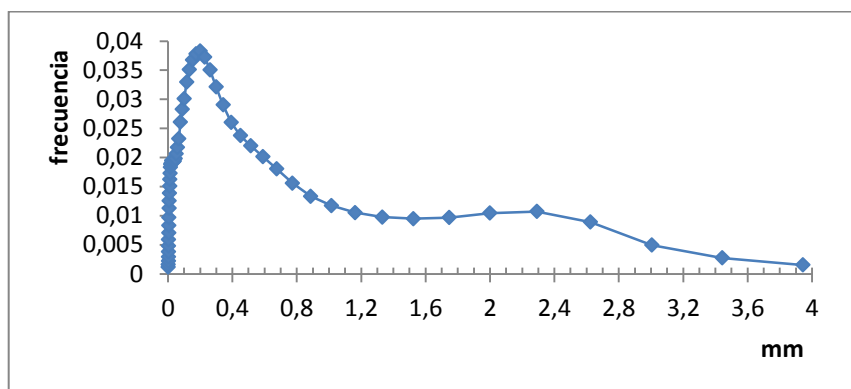


Figura 5. Comportamiento de la frecuencia granulométrica del cieno carbonatado según el análisis por HORIBA.

3.4. Modelación y análisis de los casos de estudio

El procesar los datos con el modelo escogido se obtiene los resultados que aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de ajuste del modelo para los casos de estudio

| Caso | s | B_N | k | r | Error Estándar |
|------------------------------|-------|-------|--------|--------|----------------|
| Pulpa laterítica con tamiz | 0,144 | 0,832 | 0,1198 | 0,9999 | 0,0024 |
| Pulpa laterítica con HORIBA | 0,80 | 0,58 | 0,4640 | 0,9988 | 0,0338 |
| Cieno carbonatado con tamiz | 2,691 | 0,144 | 0,3875 | 0,9957 | 0,0476 |
| Cieno carbonatado con HORIBA | 0,752 | 0,599 | 0,4505 | 0,9981 | 0,04325 |

Respecto a los resultados se observa que:

- Los modelos obtenidos son aceptables en cada caso, tal como se deduce de los valores de los coeficientes de correlación.
- Los valores de s calculados para los datos obtenidos al tamizar el material (en iguales condiciones) reflejan correspondencia respecto a un hecho que se muestra en los datos: el cieno tiene mayor polidispersión que la pulpa laterítica.
- Los valores de s calculados para los datos obtenidos mediante el HORIBA son semejantes a pesar de las diferencias obvias entre los datos. Sin embargo, existe cierto comportamiento análogo entre ambas distribuciones de frecuencia, tal como se muestra en la Tabla 4 y debido al paso 4 del procedimiento descrito en el epígrafe 2.1, los resultados son numéricamente muy semejantes,

a pesar de las diferencias de escalas en el tamaño de las partículas presentes en cada caso.

- Los parámetros de las modelaciones de la misma muestra son diferentes cuando los datos son adquiridos por diferentes vías (Tamiz y HORIBA). Nótese que los valores de k obtenidos de muestras tamizadas son menores que los obtenidos de muestras analizadas con HORIBA. Esto, ni lo contrario, se puede afirmar para s y para B_N .

4. CONCLUSIONES

- El Modelo de Garcell-Pérez es satisfactorio en el sentido de que hay correspondencia entre los valores numéricos de s y las frecuencias en que se distribuyen las partículas, cuando la mayor frecuencia esté presente para las partículas de menor diámetro.
- El Modelo de Garcell-Pérez es adecuado para la modelación de la polispersión de cieno carbonatado y de pulpa laterítica cruda.
- La comparación de los resultados de s obtenidos por el Modelo de Garcell-Pérez solo es posible cuando los datos sean obtenidos bajo las mismas condiciones y se refieren a muestras del mismo material.

5. REFERENCIAS

- AVRAMIDIS, K. S. & TURIAN, R. M. 1991: Yield stress of laterite suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 143(1): 54-62.
- CERPA, A.; TARTAJ, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; REQUENA, J.; GARCELL, L. R. & SERNA, C. J. 1996: Rheological properties of concentrated lateritic suspensions. *Progr Colloid Polym Sci.* 100: 266-270.
- CERPA, A.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; SERNA, C. J. & TARTAJ, P. 2001: Relationship between the colloidal and rheological properties of mineral suspensions. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 79(4): 608-611.
- CERPA, A.; TARTAJ, P.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. T.; REQUENA, J.; GARCELL, L. & SERNA, C. J. 1999: Mineral-content and particle size effects on the colloidal properties of concentrate lateritic suspensions. *Clays and Clay Minerals* 47(4): 515-521.
- FALCÓN, J. 2006: El beneficio de minerales y la separación de fases en las tecnologías limpias de la industria minero-metalúrgica. En: VII Clean Technology In The Mining Industry [Memorias]. Buzios, Río de Janeiro Brazil, octubre.
- GARCELL, L.; MORALES, M. P.; ANDRES-VERGÉS, M.; TARTAJ, P. & SERNA, C. J. 1998: Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science* 205(2): 470-475.

- HERNÁNDEZ, R. G.; MARTÍNEZ, R. R.; DURÁN, A. C. & PÉREZ, A. O. 2015: Eficiencia energética en sistemas de bombeo de hidromezclas. *Minería & Geología* 31(3): 109-127.
- HYAMS, D. 1997: CurveExpert, Versión 1.34 (Aplicación Informática). USA. <http://web.archive.org/web/http://www.ebicom.net/~dhyams/cftp.htm>
- MADIGAN, C.; LEONG, Y. K. & ONG, B. C. 2009: Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *International Journal of Mineral Processing* 93(1): 41-47.
- MARTÍNEZ, R. R.; IZQUIERDO, I. & POMPA, M. 2014: Pérdida de carga durante el transporte en régimen laminar de pulpas de cieno carbonatado. *Minería & Geología* 30(1): 80-94.
- MILLER, I.; FREUND, J. & JOHNSON, R. 2005: *Probabilidades y Estadísticas para ingenieros*. Volumen I y II. Cuarta Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana S.A., México, 624 p. ISBN: 0-13-712-761-8.
- PÉREZ, G. L. 2010: *Modelo matemático que correlaciona los principales factores de influencia sobre el comportamiento reológico de las pulpas lateríticas*. Leonel Garcell (Tutor). Tesis doctoral. Universidad de Oriente. 134 p.
- Pérez, G. L. & Garcell, L. R. 2006: Influencia de la distribución de tamaño de las partículas y de la temperatura sobre la reología de suspensiones lateríticas. *Tecnología Química* 26(1): 88-93.
- PÉREZ, G. L.; CARDERO, Y. & GARCELL, L. R. 2009: Modelo matemático para describir la distribución granulométrica de la fase dispersa de las suspensiones de laterita. *Tecnología Química* 29(2): 84-96.
- RIVAS, S. & COLÁS, E. 2005: *Efecto de la granulometría sobre la reología de suspensiones de cieno carbonatado*. Trabajo de diploma. Universidad de Oriente. 61 p.

Gabriel Hernández-Ramírez, ghdezr@ismm.edu.cu

Ing. Eléctrico. Máster en Electromecánica. Profesor Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba

Aristides A Legrá Lobaina, alegra@ismm.edu.cu

Lic. Matemática. Doctor en Ciencias. Profesor Auxiliar
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba

Leonel Garcell-Puyans, garcell@fiq.uo.edu.cu

Ing. Químico. Doctor en Ciencias. Profesor Titular
Universidad de Oriente, Santiago de Cuba

Rodney Martínez Rojas, rmartinez@ismm.edu.cu

Ing. Mecánico. Máster en Electromecánica. Profesor Asistente
Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Cuba