

## **Efecto del tamaño de partícula sobre la recuperación por flotación de un mineral polimetálico en un proceso industrial**

C. De Santiago\*, J.F. García, K. Ontiveros, J. Zúñiga, D. Pacheco

Subdirección de Tecnología e Innovación. Departamento Procesamiento de Minerales. CITD Peñoles.

\* [clara\\_desantiago@penoles.com.mx](mailto:clara_desantiago@penoles.com.mx)

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se muestran los resultados de evaluación del efecto del tamaño de partícula en la recuperación por flotación de mineral polimetálico en tres unidades operativas. Cada unidad operativa procesa mineral a un K80 específico, el cual en algunas ocasiones se ha ido modificando por incremento en tonelaje a procesar. A nivel laboratorio se evaluó el efecto que tiene la reducción del tamaño de partícula respecto al K80 actual sobre la recuperación de valores. Se demostró de manera general que, con tamaños más finos, entre 35 y 40 micrones se reportó un incremento en la recuperación de oro y plata en los tres casos evaluados.

Para el caso de la unidad operativa "A", la recuperación de oro, plata y plomo en el concentrado de plomo incrementó 19, 13 y 13 unidades respectivamente al reducir tamaño de 110 a 40 micrones. La unidad operativa "B" incrementó tres y dos unidades porcentuales para oro y plata respectivamente en el concentrado de plomo al disminuir de 62 a 35 micrones y para la unidad operativa "C" la recuperación de oro y plata incrementó siete y cuatro unidades porcentuales al disminuir el tamaño de partícula de 65 a 35 micras.

**PALABRAS CLAVE:**  $K_{80}$ , reducción de tamaño de partícula.

## **INTRODUCCION**

La concentración de valores por flotación depende de diversos factores, siendo el primero de ellos la liberación necesaria para obtener un grado y recuperación óptima. Típicamente, desde el inicio de una operación se cuenta con parámetros de liberación necesaria para obtener una recuperación en planta aceptable.

Una vez que se procesa el mineral a nivel industrial, se optimiza la planta y se va monitoreando el comportamiento metalúrgico con base a la variabilidad del mineral, ya sea por tonelaje procesado, leyes y/o mineralogía.

Un caso que se presenta en algunas operaciones mineras, algunas veces porque la ley del mineral disminuye y otras porque se tiene mineral disponible, es que van incrementando el tonelaje a procesar, esto no debería ser un problema mientras se mantenga la liberación necesaria para el proceso de concentración. El detalle es que algunas plantas utilizan el mismo equipo de molienda y se rebasa la capacidad de disminuir el tamaño de partícula requerido.

En el presente trabajo se comparan los resultados metalúrgicos obtenidos por flotación con el K80 actual de planta y los obtenidos con moliendas más finas. Esta información será útil para tomar decisiones en un posible ajuste en la molienda de cada unidad operativa.

## **METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Las experimentaciones se realizaron sobre muestras tomadas de planta, para el mineral "A" el K80 de operación fue 110 micras y se evaluaron dos niveles abajo: 75 y 40 micras.

Para minerales "B" y "C" la investigación se realizó a tamaños de 62 y 65 micras (K80 planta) respectivamente y 35 micras.

Las actividades que se realizaron sobre los tres minerales fueron las siguientes:

- Preparación de muestras
- Ensaye químico de cabeza
- Caracterización mineralógica
- Pruebas de flotación variando tamaño de partícula

### ***Preparación de muestras***

Los tres diferentes minerales correspondientes a cada unidad operativa se tomaron de la banda de alimentación al molino SAG, recibiendo tamaños gruesos entre 2 ½" y 4" totalizando alrededor de 150 kg por muestra. Para su preparación se incluyó reducción de tamaño y cantidad de muestra para lograr una buena representatividad hasta la formación de lotes de un kilogramo para pruebas de flotación, así como la preparación para ensaye químico.

### Ensayo químico de cabeza

Se realizó ensayo químico de cabeza para los minerales de cada unidad operativa, la Tabla 1 contiene los principales elementos. Se observa que el mineral "A" contiene más valores de oro y plata, pero el mineral "C" contiene mayor cantidad de plata, plomo y zinc.

**Tabla 1.-** Ensayo químico de cabeza.

| identificación | Au   | Ag  | Pb   | Zn   | Cu   | Fe   |
|----------------|------|-----|------|------|------|------|
|                | g/t  | g/t | %    | %    | %    | %    |
| Mineral "A"    | 1.62 | 155 | 0.89 | 1.17 | 0.05 | 3.07 |
| Mineral "B"    | 1.42 | 95  | 0.84 | 1.70 | 0.14 | 6.04 |
| Mineral "C"    | 0.54 | 357 | 1.10 | 1.69 | 0.06 | 5.40 |

### Caracterización mineralógica

Se realizó la caracterización mineralógica de los minerales de las tres unidades operativas al tamaño de operación en planta. Se determinó la especiación mineralógica global y liberación respectiva. La Tabla 2 indica las principales especies minerales detectadas para cada muestra por la técnica de microscopía electrónica de barrido.

**Tabla 2.-** Composición mineralógica global.

| Grupo                   | Especie      | % en Peso   |             |             |
|-------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
|                         |              | Mineral "A" | Mineral "B" | Mineral "C" |
| Sulfuros                | Pirita       | 4.542       | 6.589       | 3.918       |
|                         | Esfalerita   | 1.406       | 1.988       | 1.955       |
|                         | Galena       | 0.513       | 0.742       | 0.821       |
|                         | Calcocita    | 0.039       | -           | -           |
|                         | Calcopirita  | 0.033       | 0.284       | 0.119       |
|                         | Arsenopirita | -           | 0.417       | 0.263       |
|                         | Pirrotita    | -           | 0.083       | 0.163       |
| Especies de oro y plata | Oro Electrum | <0.001      | 0           | -           |
|                         | Oro nativo   | <0.001      | -           | -           |
|                         | Polibasita   | -           | 0.002       | 0.021       |
|                         | Argentita    | 0.007       | 0.002       | 0.008       |
|                         | Freibergita  | 0.015       | 0.002       | 0.002       |
|                         | Pirargirita  | 0.013       | 0.006       | 0.017       |
| Óxidos de Plomo         |              | 0.504       | -           | -           |
| Óxidos de Zinc          |              | 0.348       | -           | -           |
| Ganga no sulfurosa      |              | 92.584      | 89.873      | 92.710      |

En el mineral "A" los sulfuros principales fueron pirita, esfalerita y galena. Se identificaron óxidos de plomo y zinc reportando 0.50 y 0.35% respectivamente. La ganga no sulfurosa reportó 92.58 %.

Para los minerales "B" y "C" se reportaron pirita, esfalerita, galena y arsenopirita como sulfuros principales. No se reportaron óxidos de plomo y zinc. Las especies de ganga totalizaron 89.87% para mineral "B" y 92.71% para mineral "C".

**Tabla 3.- Liberación absoluta.**

| Mineral | K <sub>80</sub> , micras | Liberación, % |       |       |       |         |       |       |
|---------|--------------------------|---------------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
|         |                          | Gln           | Esf   | Ccp   | Pi    | Esp. Ag | Ars   | Gn    |
| "A"     | 110                      | 66.04         | 70.29 | 54.54 | 80.92 | 65.49   | -     | 93.57 |
| "B"     | 62                       | 80.26         | 82.71 | 85.34 | 87.59 | 66.80   | 68.90 | 94.51 |
| "C"     | 65                       | 82.47         | 77.04 | 84.89 | 82.90 | 70.68   | 62.50 | 95.83 |

Los minerales "B" y "C", con un K<sub>80</sub> similar, reportaron liberación aceptable para galena y esfalerita, cercanas o superior al 80%, lo cual hace posible obtener buen grado y recuperación. El mineral "A", con K<sub>80</sub> de 110 micrones, reportó baja liberación para galena y esfalerita. Las especies de plata reportaron liberaciones bajas, 65.49 y 70.68% en los tres minerales.

Con base en la regla empírica comprobada de que, "con minerales de sulfuros la liberación en cada rango de tamaños prácticamente se mantiene constante, independientemente de la distribución de tamaños" <sup>(1)</sup>, es posible extrapolar la liberación medida a una molienda diferente a la medida en planta. Mediante la simulación de Gaudin-Schumann es posible pronosticar la liberación a diferente tamaño de partícula partiendo de liberaciones relativas medidas a un tamaño en particular.

Las Figuras 1 a 3 muestran las curvas de simulación de liberación de cada especie a diferente tamaño de partícula, calculadas a partir de la liberación relativa medida al cada tamaño de molienda que tiene cada operación de los tres minerales de estudio.

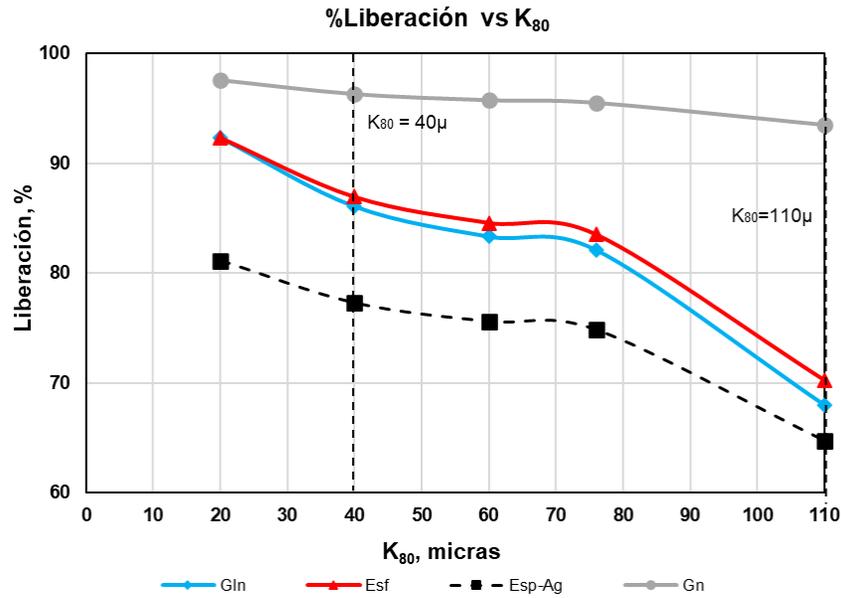


Figura 1.- Efecto de tamaño de partícula sobre la liberación, mineral "A"

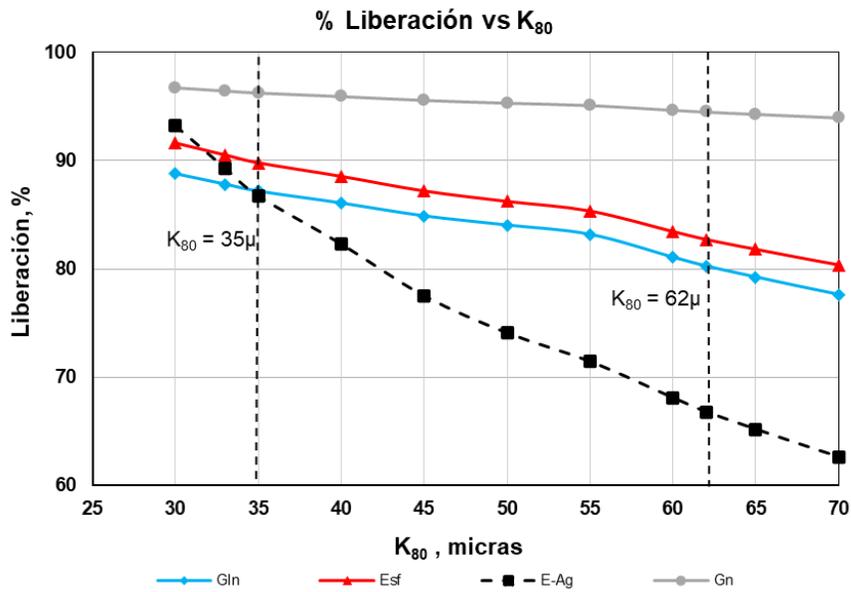


Figura 2.- Efecto de tamaño de partícula sobre la liberación, mineral "B"

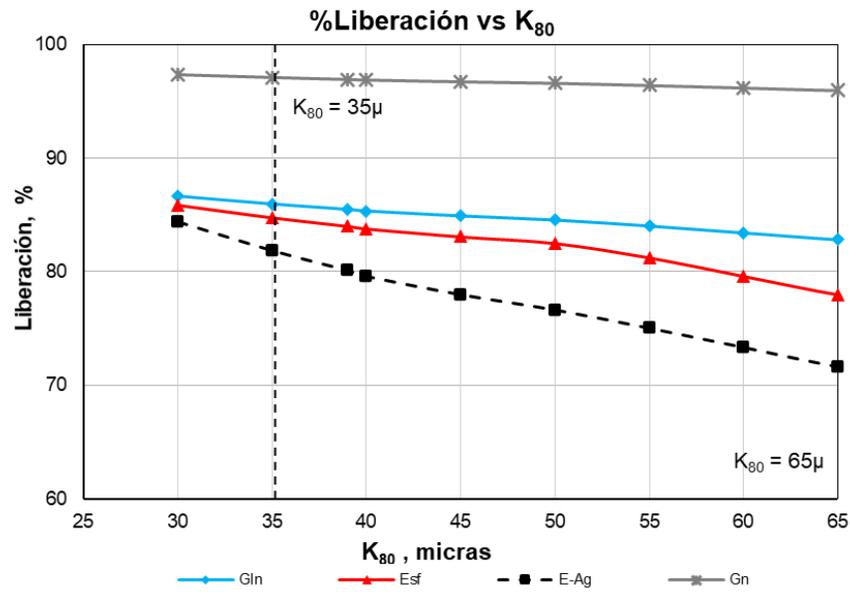


Figura 3.- Efecto de tamaño de partícula sobre la liberación, mineral “C”

Los aspectos más relevantes de las simulaciones realizadas fueron:

- Se observaron cambios importantes en liberación al disminuir el tamaño de partícula desde  $K_{80}$  de operación hasta 40 micrones para el caso de mineral “A” y 35 para minerales “B” y “C” respectivamente.
- Para el mineral “A” las liberaciones de galena, esfalerita y especies de plata incrementaron alrededor de dieciocho, diecisiete y trece unidades porcentuales al disminuir el tamaño de partícula desde 110 hasta 40 micrones.
- En el mineral “B” las liberaciones de galena, esfalerita y especies de plata aumentaron siete, siete y veinte unidades porcentuales respectivamente.
- En el mineral “C” las liberaciones de galena, esfalerita y especies de plata aumentaron tres, siete y diez unidades porcentuales respectivamente.

Cabe mencionar que, los resultados anteriores son referidos a la potencial liberación de especies minerales que se obtendría al realizar un cambio en la molienda y por consecuencia el  $K_{80}$  del mineral, como seguimiento a esto, debe revisarse el aspecto de concentración.

### Flotación

Se realizaron pruebas de flotación selectiva Pb-Zn para el mineral "A" y Pb-Zn-Fe para los minerales "B" y "C", el esquema químico de reactivos utilizado fue el estándar de cada unidad operativa. Para el caso del mineral "A" se realizaron pruebas a tres tamaños de partícula y para los minerales "B" y "C" solamente en dos.

Los resultados de las pruebas considerando recirculación de medios para cada mineral a diferente tamaño de partícula se muestran en las Tablas 4 a 6 y las Figuras 4 a 15 muestran el perfil de las curvas grado vs recuperación para oro, plata y plomo en circuito de plomo; y de zinc en el circuito de zinc. Lo anterior para cada mineral evaluado en circuito abierto.

**Tabla 4.- Resultados de pruebas con recirculación de medios, mineral "A".**

| Producto          | K <sub>80</sub> ,<br>μ | % Peso | Ensayes     |           |              |              |      |      |          | Distribución, % |           |           |           |    |    |
|-------------------|------------------------|--------|-------------|-----------|--------------|--------------|------|------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|----|----|
|                   |                        |        | Au          | Ag        | Pb           | Zn           | Cu   | Fe   | Ins. HCl | Au              | Ag        | Pb        | Zn        | Cu | Fe |
| Conc. de plomo    | 110                    | 0.70   | 97.27       | 9569      | <b>46.13</b> | 10.48        | 2.16 | 5.43 | 9.67     | <b>57</b>       | <b>55</b> | <b>43</b> | 8         | 35 | 1  |
|                   | 75                     | 0.89   | 90.70       | 8786      | <b>43.76</b> | 10.64        | 2.36 | 6.37 | 11.96    | <b>65</b>       | <b>59</b> | <b>49</b> | 10        | 45 | 2  |
|                   | 40                     | 1.11   | 89.64       | 8368      | <b>39.65</b> | 10.43        | 2.27 | 8.00 | 15.77    | <b>75</b>       | <b>68</b> | <b>56</b> | 12        | 49 | 3  |
| Conc. de zinc     | 110                    | 1.20   | 4.72        | 962       | 1.69         | <b>45.41</b> | 0.76 | 4.65 | 18.51    | 5               | 10        | 3         | <b>56</b> | 21 | 2  |
|                   | 75                     | 1.23   | 5.55        | 1213      | 1.64         | <b>46.40</b> | 0.57 | 5.23 | 19.78    | 5               | 11        | 3         | <b>57</b> | 15 | 2  |
|                   | 40                     | 1.33   | 5.00        | 1046      | 1.30         | <b>46.23</b> | 0.55 | 6.80 | 17.53    | 5               | 10        | 2         | <b>64</b> | 14 | 3  |
| Cola de flotación | 110                    | 98.11  | <b>0.47</b> | <b>44</b> | 0.41         | 0.36         | 0.02 | 2.91 |          | 39              | 36        | 54        | <b>36</b> | 44 | 97 |
|                   | 75                     | 97.88  | <b>0.37</b> | <b>40</b> | 0.40         | 0.34         | 0.02 | 3.04 |          | 30              | 30        | 49        | <b>33</b> | 39 | 96 |
|                   | 40                     | 97.55  | <b>0.28</b> | <b>30</b> | 0.33         | 0.24         | 0.02 | 3.27 |          | 20              | 21        | 41        | <b>24</b> | 36 | 95 |

**Tabla 5.- Resultados de pruebas con recirculación de medios, mineral "B".**

| Producto          | K <sub>80</sub> ,<br>μ | % Peso | Ensayes     |            |              |              |      |       |          | Distribución, % |           |           |           |    |    |
|-------------------|------------------------|--------|-------------|------------|--------------|--------------|------|-------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|----|----|
|                   |                        |        | Au          | Ag         | Pb           | Zn           | Cu   | Fe    | Ins. HCl | Au              | Ag        | Pb        | Zn        | Cu | Fe |
| Conc. de plomo    | 65                     | 1.69   | 14.56       | 15301      | <b>47.38</b> | 7.20         | 1.14 | 8.40  | 5.97     | <b>48</b>       | <b>82</b> | <b>91</b> | 7         | 38 | 3  |
|                   | 35                     | 2.00   | 14.53       | 13693      | <b>41.09</b> | 5.44         | 1.07 | 9.85  | 12.22    | <b>56</b>       | <b>86</b> | <b>93</b> | 7         | 41 | 4  |
| Conc. de zinc     | 65                     | 2.96   | 1.77        | 906        | 0.81         | <b>49.25</b> | 0.62 | 10.67 | 1.37     | 10              | 9         | 3         | <b>89</b> | 37 | 6  |
|                   | 35                     | 2.78   | 1.44        | 806        | 0.58         | <b>51.63</b> | 0.66 | 9.83  | 1.03     | 8               | 7         | 2         | <b>88</b> | 35 | 5  |
| Conc. de fierro   | 65                     | 5.53   | <b>2.64</b> | <b>257</b> | 0.26         | 0.59         | 0.05 | 31.26 | 22.76    | 29              | 5         | 2         | <b>2</b>  | 6  | 33 |
|                   | 35                     | 5.98   | <b>2.26</b> | <b>183</b> | 0.20         | 0.63         | 0.04 | 28.71 | 26.69    | 26              | 3         | 1         | <b>2</b>  | 5  | 32 |
| Cola de flotación | 65                     | 89.82  | <b>0.07</b> | <b>16</b>  | 0.04         | 0.03         | 0.01 | 3.48  |          | 13              | 4         | 5         | <b>2</b>  | 19 | 59 |
|                   | 35                     | 89.24  | <b>0.06</b> | <b>12</b>  | 0.04         | 0.04         | 0.01 | 3.52  |          | 11              | 3         | 4         | <b>2</b>  | 20 | 59 |

**Tabla 6.- Resultados de pruebas con recirculación de medios, mineral “C”**

| Producto          | K <sub>80</sub> ,<br>μ | % Peso | Ensayes     |           |              |              |      |       |             | Distribución, % |           |           |           |    |    |
|-------------------|------------------------|--------|-------------|-----------|--------------|--------------|------|-------|-------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|----|----|
|                   |                        |        | Au          | Ag        | Pb           | Zn           | Cu   | Fe    | Ins.<br>HCl | Au              | Ag        | Pb        | Zn        | Cu | Fe |
| Conc. de plomo    | 62                     | 2.16   | 51.86       | 3487      | <b>35.69</b> | 10.70        | 4.53 | 10.93 | 5.49        | <b>77</b>       | <b>79</b> | <b>90</b> | 14        | 70 | 4  |
|                   | 35                     | 2.08   | 56.50       | 3796      | <b>37.05</b> | 7.89         | 3.98 | 8.99  | 5.73        | <b>80</b>       | <b>81</b> | <b>92</b> | 10        | 70 | 3  |
| Conc. de zinc     | 62                     | 2.60   | 1.60        | 252       | 0.46         | <b>51.10</b> | 0.83 | 9.58  | 2.58        | 3               | 7         | 1         | <b>78</b> | 16 | 4  |
|                   | 35                     | 2.62   | 1.08        | 248       | 0.31         | <b>53.33</b> | 0.70 | 8.29  | 1.39        | 2               | 7         | 1         | <b>85</b> | 16 | 4  |
| Conc. de fierro   | 62                     | 6.41   | <b>2.52</b> | <b>96</b> | 0.19         | 0.35         | 0.05 | 32.55 | 16.03       | 11              | 6         | 1         | <b>1</b>  | 2  | 34 |
|                   | 35                     | 6.72   | <b>2.41</b> | <b>86</b> | 0.18         | 0.41         | 0.05 | 29.10 | 20.35       | 11              | 6         | 1         | <b>2</b>  | 3  | 33 |
| Cola de flotación | 62                     | 88.83  | <b>0.15</b> | <b>9</b>  | 0.07         | 0.13         | 0.02 | 4.02  |             | 9               | 8         | 7         | <b>7</b>  | 11 | 58 |
|                   | 35                     | 88.58  | <b>0.12</b> | <b>8</b>  | 0.05         | 0.06         | 0.02 | 4.13  |             | 7               | 7         | 5         | <b>3</b>  | 12 | 61 |

Los aspectos más relevantes a partir de los resultados de flotación fueron:

- Para el mineral “A”, en el concentrado de plomo se observó un incremento en recuperación de oro, plata y plomo al cambiar K<sub>80</sub> = 110 hasta 40 micrones. El grado de plomo y zinc fueron aceptables.
- El grado de zinc en concentrado de zinc del mineral “A” fue similar en los tres tamaños evaluados, sin embargo, la recuperación incrementó de 56 hasta 64% desde K<sub>80</sub> = 110 hasta 40 micrones, entre 110 y 75 micras no hubo un cambio significativo.
- El concentrado de plomo en el mineral “B” reportó un incremento en recuperación de oro de tres unidades porcentuales y dos para plomo y plata respectivamente. El grado de plomo aumentó y la ley de zinc disminuyó al reducir el tamaño de partícula.
- El grado y recuperación de zinc en concentrado de zinc de mineral “B” incrementaron al moler de 62 a 35 micrones.
- Para el mineral “C” la recuperación de oro, plata y plomo aumentaron en siete, cuatro y dos unidades porcentuales respectivamente en el concentrado de plomo. El concentrado de zinc fue similar en los dos tamaños evaluados.
- Todas las curvas grado recuperación de oro, plata, plomo y zinc, para los minerales de las tres unidades operativas indican un claro mejor desempeño con tamaños más finos al obtenido actualmente en las unidades operativas respectivas.
- Los resultados de flotación obtenidos para cada mineral indican una congruencia con la predicción de liberación que se realizó a moliendas más finas.
- En el presente estudio se complementó la simulación de liberación con pruebas de flotación para tener mayor soporte de un potencial cambio en el proceso de molienda, sin embargo, en una primera etapa, los datos de liberación deberían ser, al menos de forma preliminar un aspecto importante a revisar. También es importante mencionar

que no precisamente un incremento en la liberación será proporcional al incremento en recuperación de valores.

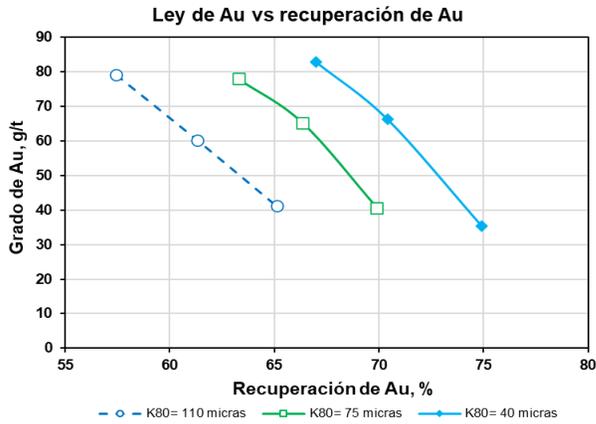


Figura 4.- Curva G-R de oro en concentrado de plomo mineral "A"

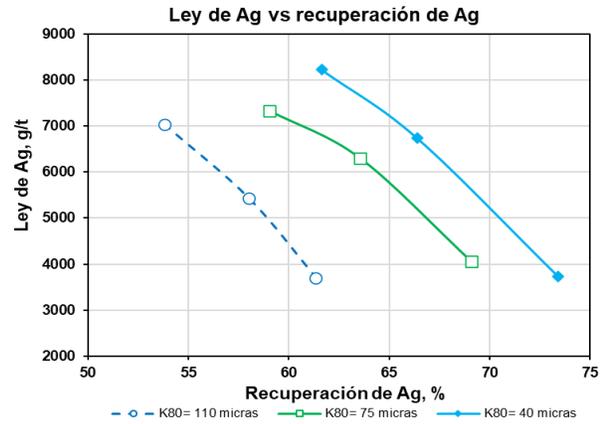


Figura 5.- Curva G-R de plata en concentrado de plomo mineral "A"

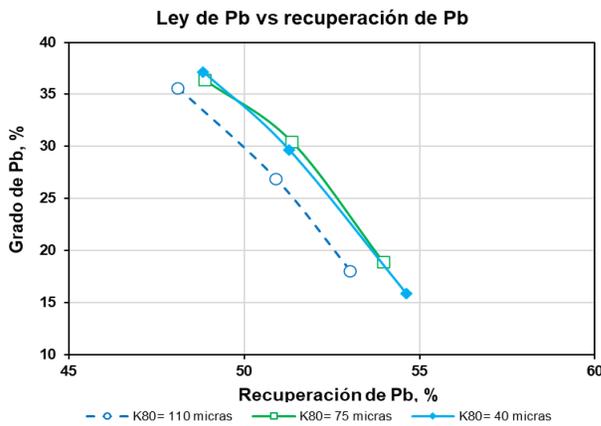


Figura 6.- Curva G-R de plomo en concentrado de plomo mineral "A"

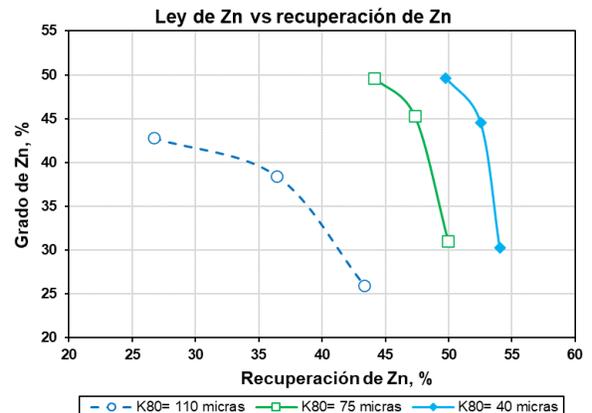


Figura 7.- Curva G-R de zinc en concentrado de zinc mineral "A"

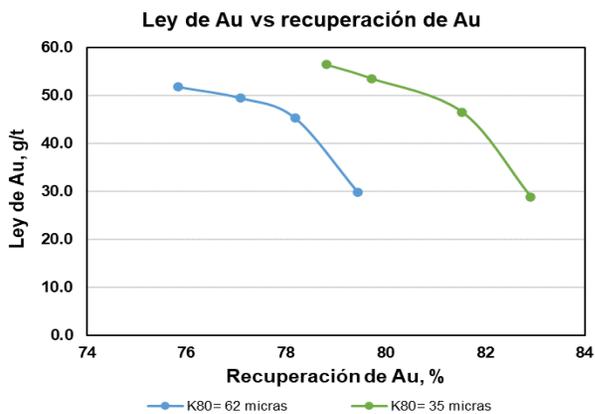


Figura 8.- Curva G-R de Au en concentrado de plomo mineral "B"

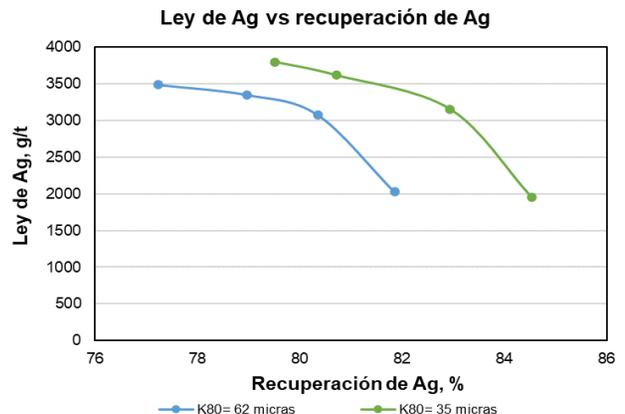


Figura 9.- Curva G-R de Ag en concentrado de plomo mineral "B"

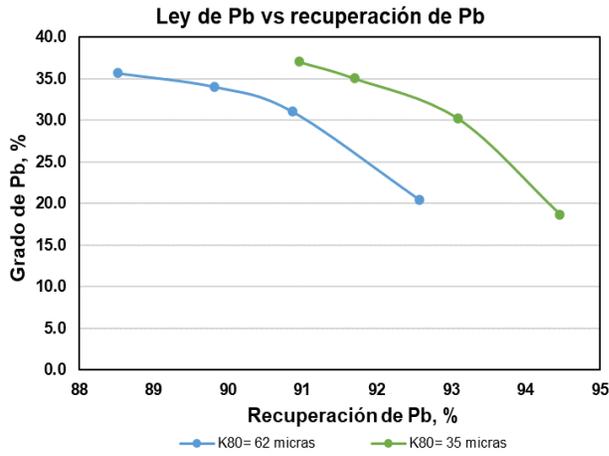


Figura 10.- Curva G-R de Pb en concentrado de plomo mineral "B"

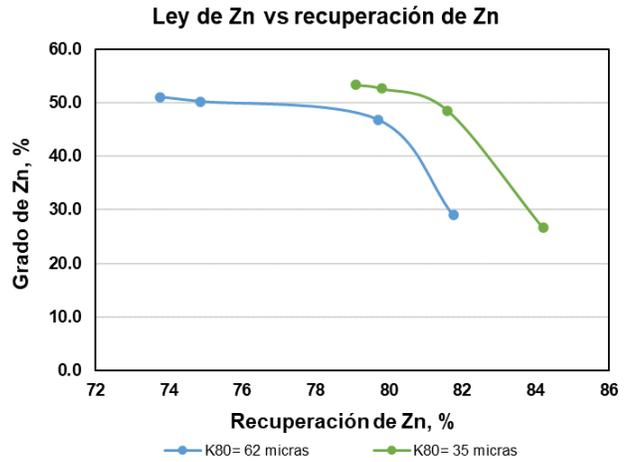


Figura 11.- Curva G-R de Zn en concentrado de zinc mineral "B"

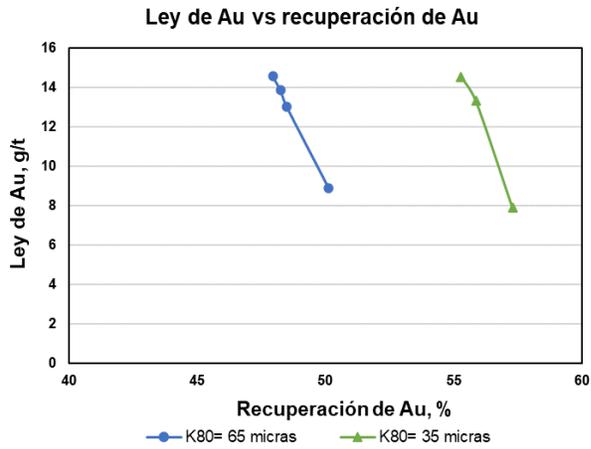


Figura 12.- Curva G-R de Au en concentrado de plomo mineral "C"

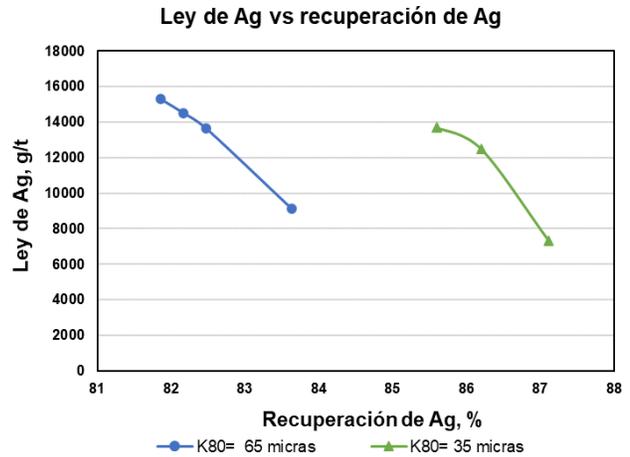


Figura 13.- Curva G-R de Ag en concentrado de plomo mineral "C"

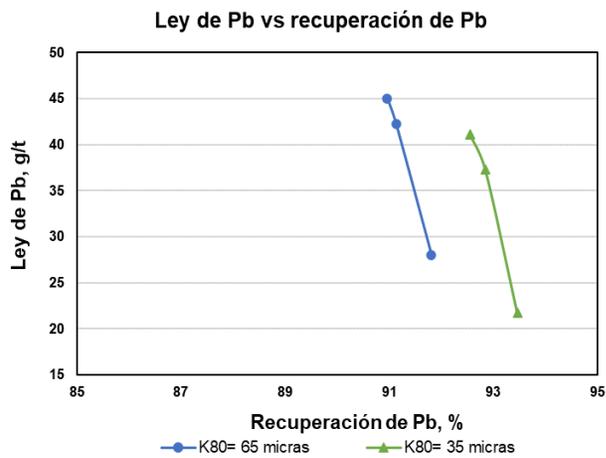


Figura 14.- Curva G-R de Pb en concentrado de plomo mineral "C"

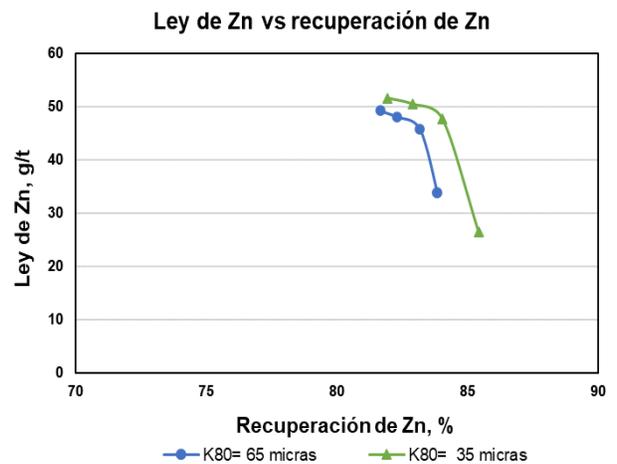


Figura 15.- Curva G-R de Zn en concentrado de zinc mineral "C"

## **CONCLUSIONES**

- Se puede realizar simulación de liberación de forma muy aceptable utilizando el modelo de distribución granulométrica de Gaudin-Schumann.
- Antes de realizar pruebas de flotación a diferentes tamaños, se puede tener una referencia al utilizar simulación de liberación a diferentes tamaños.
- Los resultados obtenidos por flotación reportaron potencial para obtener un incremento en recuperación de oro, plata y plomo en el concentrado de plomo de los tres minerales evaluados al disminuir tamaño de partícula alrededor de 35 micrones.
- Para el mineral "A" se observó una mejora en recuperación de zinc en concentrado de zinc, pero para los minerales "B" y "C" no hubo un cambio significativo.

## **REFERENCIAS**

Magallanes L. (2019). "Aplicaciones metalúrgicas sobre un análisis modal"

