

## Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia

Recovery of gold and mercury from the tailings of amalgamation process from the artisanal mining

Vidal Aramburú R.<sup>1</sup>; Pablo Núñez J<sup>1</sup>; Ángel Azañero O.<sup>1</sup>; Melchor Figueroa L<sup>1</sup>; Pedro Gagliuffi E.<sup>2</sup>

### RESUMEN

La muestra que es materia del presente trabajo de investigación es el relave del proceso de amalgamación procedente del distrito de Lomas, departamento de Piura y fue proporcionada por los mineros artesanales de la zona. La caracterización mineralógica de la muestra arroja la presencia de los siguientes minerales: oro, electrum, pirita, arsenopirita, hematina, goethita y gangas. Se realizaron pruebas metalúrgicas con el concentrador Falcon a diferentes fuerzas de gravedad: 40, 50, 60, 70 y 80 G's, con una granulometría de 56.55% -200 malla. Los balances metalúrgicos indican que la mejor prueba seleccionada es con 60 G's, obteniéndose un concentrado de 82.78 g/TC, recuperación de 17.76% y un radio de concentración de 28.55. Los resultados indican que estos equipos mayormente trabajan como preconcentración. La cabeza ensayada de este relave de amalgamación tiene 18.69 g/TC de oro y 4.62 ppm de mercurio, el promedio de las cabezas calculadas es 16.16 g/TC de oro y 3.64 ppm de mercurio, la diferencia de estas cabezas es por la presencia de oro libre y electrum como se indica en la caracterización.

Uno de los aspectos importantes del estudio es que el mercurio en el relave del concentrador Falcon tiene una ley promedio de 3.67 ppm. Este indicador es muy alto comparado con los límites máximos permisibles, que es de 0.14 ppm.

También se realizaron pruebas combinadas de concentración Falcon y cianuración con la muestra remolida a una granulometría de 77.89% -200 malla. El resultado del concentrador Falcon indica en oro una calidad de concentrado de 137.19 g/TC, recuperación de 19.54% y un radio de concentrado de 46.51. La cianuración de relave del concentrador Falcon es favorable, llegando a una recuperación de 97.56% de oro, con consumo de cianuro de 1.64 Kg/TM y cal de 9.44 Kg/TM. Es importante mencionar que el relave de cianuración tiene 2.70 ppm de mercurio.

**Palabras clave:** Oro, electrum, mercurio, Falcon, cianuración

### ABSTRACT

The sample which is the subject of this research work is the process of amalgamation tailings, from the district of Lomas, department of the Piura. Provided by the miners in the area. The mineralogical characterization of the samples showed the presence of the following minerals: gold, electrum, pyrite, arsenopyrite, hematite, goethite and gangues. Tests were conducted metallurgical concentrator Falcon to different forces of gravity: 40, 50, 60, 70 and 80 G's, with a particle size of 56.55% - 200 mesh. Metallurgical balances indicate that the best evidence is gathered with 60 G's, obtaining a concentration of 82.78 g/TC, recovery of 17.76% and 28.55 radio concentration. The results indicate that these teams mostly work as preconcentration. The head trial of this amalgamation tailings is 18.69 g/TC gold and 4.62 ppm of mercury, the average calculated heads is 16.16 g/TC gold and 3.64 ppm of mercury, the difference of these heads is by the presence of free gold and electrum as shown in characterization. One of the important aspects of the study is that mercury in the tailings of the Falcon concentrator has an average grade of 3.67 ppm. This indicator is very high compared with the maximum permissible limits which is 0.14 ppm. Combined tests were also conducted Falcon and cyanide concentration in the sample remolida to a particle size of 77.89% - 200 mesh. The result indicates the Falcon concentrator quality gold concentrate 137.19 g/TC, recovery of 19.54% and 46.51 concentrate radio. The cyanidation of tailings from the concentrator Falcon is favorable, leading to a recovery of 97.56% gold with cyanide consumption of 1.64 Kg/TM and 9.44 Kg/TM of lime. It is important to mention that the cyanidation tailings is 2.70 ppm mercury.

**Keywords:** Gold, electrum, mercury, Falcon, cyanidation

1 Docente de la EAP Ingeniería Metalúrgica – FIGMMG, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: vidalaramburu@hotmail.com

2 Docente de la EAP Ingeniería Geológica – FIGMMG, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: pgagliuffie@unmsm.edu.pe.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el Perú cuenta con una estratificación de la minería, atendiendo a criterios relacionados con la magnitud de la producción y la extensión del área de explotación, así se tiene: gran minería, mediana minería, pequeña minería y minería artesanal. Se cuenta además con un marco legal para la actividad minera, y que debe ser cumplido por las partes competentes; sin embargo, existen sectores que no cumplen con las normatividades vigentes, manteniéndose en una situación de informalidad e incluso ilegalidad. Siendo el sector minero de mayor preocupación.

La minería artesanal ha tomado gran impulso a partir de los años ochenta en un contexto de precios altos del oro, alimentada por procesos migratorios generadas por diversas causas. Un 11% de toda la producción de oro en el Perú que en el 2006 llegó a 203 TM proviene de la minería artesanal. Se estima que hay unos 80,000 mineros artesanales y 20,000 personas que les proveen servicios, además 300,000 personas directamente o indirectamente son dependientes de esta actividad. El 60% de los mineros artesanales es informal, el resto se está formalizando en pequeñas empresas.

También se sabe que las operaciones artesanales se caracterizan por una baja productividad, escasas condiciones de seguridad y un impacto ambiental negativo, porque emplean fundamentalmente el proceso de amalgamación.

La minería artesanal representa una de las pocas alternativas de supervivencia en zonas deprimidas en las que otras actividades que absorben mano de obra, como la agricultura, no existen o han desaparecido.

Tradicionalmente las zonas con gran producción artesanal fueron: Puno, el sur medio (Arequipa, Ayacucho e Ica) y el departamento amazónico de Madre de Dios. En los últimos años han aparecido zonas de minería artesanal en el norte (Piura, Cajamarca y La Libertad), donde el procesamiento de minerales se está dando en forma empírica en la mayoría de los casos. Precisamente la muestra que es materia del presente trabajo de investigación, procede del distrito de Lomas, departamento de Piura.

## II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se basa en el diseño de pruebas experimentales a nivel de laboratorio, utilizando los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Geológica de la UNMSM.

### Objetivos

El objetivo es recuperar oro, mercurio y encontrar el grado de contaminación del mercurio, a partir de los relaves del proceso de amalgamación, que utiliza la pequeña y la minería artesanal.

### Hipótesis

Como hipótesis se plantea encontrar procesos metalúrgicos de separación en la primera etapa como la gravimetría-centrifugación y la cianuración en la segunda etapa que permitirá mejorar la recuperación de oro y mercurio. Encontrar los niveles de contaminación del mercurio.

### Equipamiento

Entre los equipos empleados podemos mencionar:

Molino de bolas

Concentrador Falcon

Agitador de rodillos

Balanza analítica

Estufa eléctrica

Mallas

### Análisis microscópico de la muestra

El análisis realizado sobre la muestra, ha permitido determinar sus constituyentes mineralógicos, las distribuciones volumétricas de aquellos minerales que han intervenido en el análisis modal, sus respectivos grados de liberación y la interpretación de los grados de liberación para los minerales que han intervenido en el análisis modal.

En la Tabla N.º 1 se insertan los minerales observados y los que han intervenido en el análisis modal:

Tabla N.º 1.

Minerales	Fórmula	Abreviatura
Oro	Au	Au
Electrum	Au-Ag	el
Pirita	FeS <sub>2</sub>	py
Arsenopirita	FeAsS	apy
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hm
Goethita	FeO.0H	gt
Gangas		GGs

### Distribución volumétrica y grados de liberación

Las distribuciones volumétricas son reportadas en términos porcentuales, del mismo modo con respecto a los grados de liberación; los cuales se proporcionan

para todos los minerales que han intervenido en el análisis modal y se pueden observar en la Tabla N.º 2.

Tabla N.º 2.

MINERALES	VOLUMEN (%)	GRADO DE LIBERACIÓN (5)
Oro	0,20	99,50
Electrum	0,32	93,75
Pirita	0,40	100,00
Arsenopirita	2,62	100,00
Hematita	14,70	92,24
Goethita	30,47	91,19
Gangas	51,29	94,41
TOTAL	100,00	

### Interpretación de los grados de liberación

Observando la tabla anterior, se hará la siguiente interpretación de los grados de liberación de los minerales que han intervenido en el análisis modal:

El oro ocupa el 0,20% del volumen total de la muestra, de este volumen el 99,50% se halla libre, permaneciendo aún entrelazado el 0,50% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

El electrum ocupa el 0,32% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 93,75% se halla libre, mientras que el 6,25% restante se encuentra aun entrelazado, siendo el motivo de su no liberación total los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos.

La pirita ocupa el 0,40% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 100,00% se halla libre, lo que indica que de las partículas que han intervenido en el análisis modal, todas se hallan libres.

La arsenopirita ocupa el 2,62% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 100,00% se halla libre, indicando que, de las partículas que han intervenido en el análisis modal, todas se hallan libres. Ver Figuras N.º 1, 2, 3, 4 y 5.

La hematita ocupa el 14,70% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 92,24% se halla libre, mientras que 7,76% restante se encuentra aún entrelazado, siendo el motivo de su no liberación total los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos.

La goethita ocupa el 30,47% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 91,19% se halla libre, mientras que 8,81% restante se encuentra aun entrelazada, siendo el motivo de su no liberación total los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos.

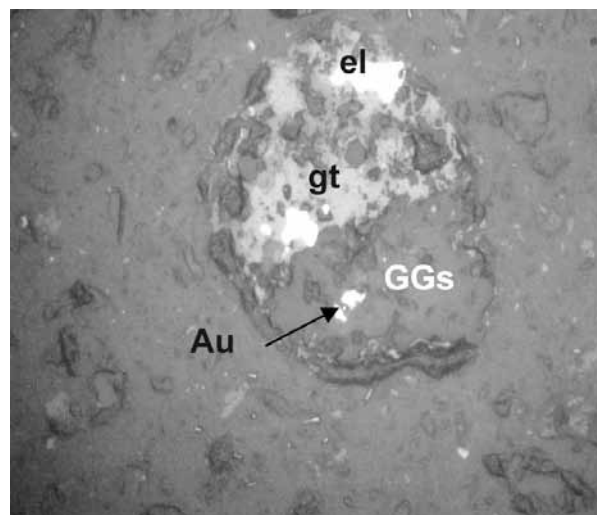


Figura N.º 1.

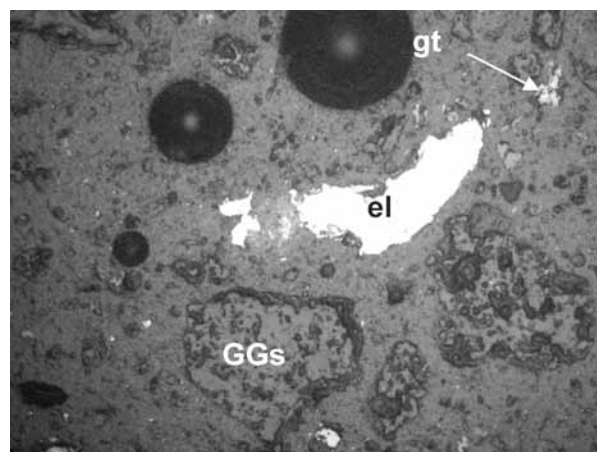


Figura N.º 2.

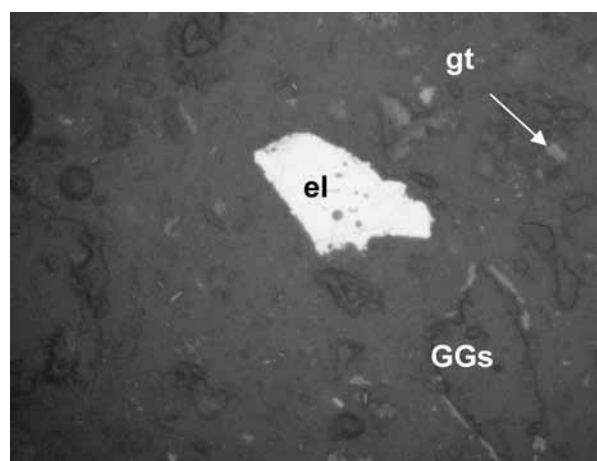


Figura N.º 3.

La ganga ocupa el 51,29% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 94,41% se halla libre, mientras que el 5,59% restante se encuentra aún entrelazado, siendo el motivo de su no liberación total los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos.

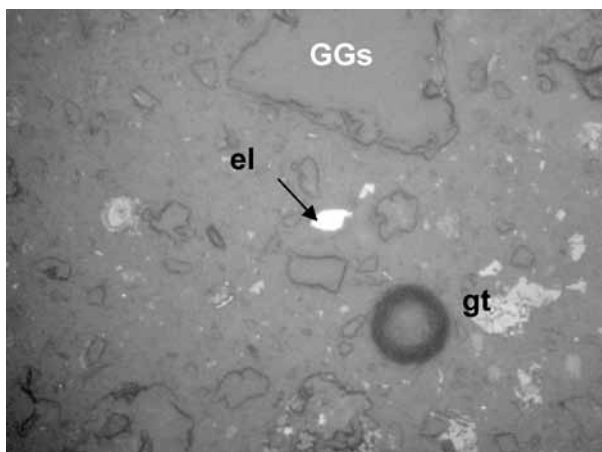


Figura N.º 4.

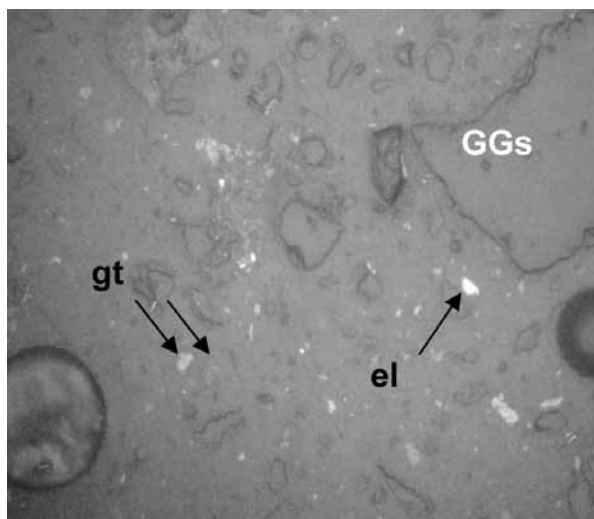


Figura N.º 5.

### III. PRUEBAS METALÚRGICAS EXPERIMENTALES

#### Pruebas metalúrgicas con el concentrador Falcon [5]

Para realizar las pruebas metalúrgicas con el concentrador Falcon, es importante que la muestra sea representativa de todo del conjunto, por eso es necesario realizar un muestreo sistemático.

#### Condiciones de la prueba

Peso muestra: 5000 g

Fuerza de G.: 40, 50, 60, 70 y 80 G's

Granulometría: 56.55 % - 200 malla

Presión agua: 3 psi

#### Resultado de la prueba de muestra remolida con 60 G's

En vista de que la mejor prueba seleccionada es con una fuerza de gravedad de 60 G's para ésta prueba la muestra es remolida, llegando a una granulometría de 77.89% -200 malla. Ver Tablas N.º 3, 4, 5, 6 y 7.

#### Prueba de cianuración [1, 2, 6,9]

La prueba de cianuración se realizó con el relave de la tabla N.º 8

#### Condiciones de la prueba

Peso muestra: 300 g

Relación L/S: 2/1

Granulometría: 77.89% - 200 malla

Tiempo de cianuración: 24 hrs

Consumo de NaCN: 1.64 Kg/TM

Consumo de Cal: 9.44 Kg/ TM

### IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN [3, 4, 7 y 8]

Analizando los resultados del estudio microscópico, el oro ocupa el 0.20% del volumen total de la muestra, de este volumen el 99.50% se halla libre, permaneciendo aun entrelazado el 0.50% restante. El electrum ocupa el 0.32% del volumen total de la muestra, de este volumen, el 93.75% se halla libre, mientras que 6.25% restante se encuentra aún entrelazado.

El relave del proceso de amalgamación, que es materia del presente trabajo de investigación tiene una ley ensayada de 18.69 g/TC de oro y 4.62 ppm de mercurio. El promedio de la ley calculada es 16.16 g/TC de oro y 3.64 ppm de mercurio, la diferencia de estas leyes es fundamentalmente por la presencia de oro libre y electrum.

La caracterización de la muestra nos indica la presencia de los siguientes minerales: oro, electrum, arsenopirita, hematina, goethita y gangas. El oro y el electrum se encuentran como partículas libres y

Tabla N.º 3. Resultados de la prueba con 40 G's.

Componentes	Peso (g)	% Peso	Leyes de Lab.		Contenido fino		% Recuperación		Rc.
			Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg	
Cabeza	5000.00	100.00	18.69	4.62	18.69	4.62	100.00	100.00	
Concentrado	111.24	2.23	89.25	3.12	1.99	0.07	11.44	1.62	44.95
Relave	4888.76	97.77	15.76	4.34	15.41	4.24	88.56	98.38	
Cabeza calculada			17.40	4.31					

Tabla N.º 4. Resultados de la prueba con 50 G's

Componentes	Peso (g)	% Peso	Leyes de Lab.		Contenido fino		% Recuperación		Rc.
			Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg	
Cabeza	5000.00	100.00	18.69	4.62	18.69	4.62	100.00	100.00	
Concentrado	116.41	2.33	84.14	2.95	1.96	0.05	12.54	1.39	42.95
Relave	4883.59	97.67	14.00	3.64	13.67	3.56	87.46	98.61	
Cabeza calculada			15.63	3.61					

Tabla N.º 5. Resultado de la prueba con 60 G's

Componentes	Peso (g)	% Peso	Leyes de Lab		Contenido Fino		% Recuperación		Rc
			Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg	
Cabeza	5000.00	100.00	18.69	4.62	18.69	4.62	100.00	100.00	
Concentrado	175.14	3.50	82.78	2.25	2.90	0.08	17.76	2.48	28.55
Relave	4824.86	96.50	13.92	3.25	13.43	3.14	82.24	97.52	
Cabeza Calculada			16.33	3.22					

Tabla N.º 6. Resultado de la prueba con 70 G's

Componentes	Peso (g)	% Peso	Leyes de Lab		Contenido Fino		% Recuperación		Rc
			Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg	
Cabeza	5000.00	100.00	18.69	4.62	18.69	4.62	100.00	100.00	
Concentrado	129.14	2.58	100.98	2.95	2.61	0.08	15.76	2.71	38.72
Relave	4870.86	97.42	14.32	2.95	13.95	2.87	84.24	97.29	
Cabeza Calculada			16.56	2.95					

Tabla N.º 7. Resultado de la prueba con 80 G's

Componentes	Peso (g)	% Peso	Leyes de Lab		Contenido Fino		% Recuperación		Rc
			Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg	
Cabeza	5000.00	100.00	18.69	4.62	18.69	4.62	100.00	100.00	
Concentrado	121.89	2.44	65.66	1.85	1.60	0.05	10.76	1.22	41.02
Relave	4878.11	97.56	13.60	4.16	13.27	4.06	89.24	98.78	
Cabeza Calculada			14.87	4.11					

Tabla N.º 8.

Componentes	Peso (g)	% Peso	Leyes de Lab		Contenido Fino		% Recuperación		Rc
			Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg	
Cabeza	5000.00	100.00	18.69	4.62	18.69	4.62	100.00	100.00	
Concentrado	107.50	2.15	137.19	5.60	2.95	0.12	19.54	2.91	46.51
Relave	4892.50	97.85	12.42	4.10	12.15	4.01	80.46	97.09	
Cabeza Calculada			15.10	4.13					

Tabla N.º 9. Resultados de la cianuración

Componentes	Peso (g) o Vol. (ml)	Leyes de Lab.		Contenido Fino		% Recuperación	
		Au (g/TC)	Hg (ppm)	Au	Hg	Au	Hg
Cabeza	300.00	12.42	4.10	37.26	12.30	100.00	100.00
Sol. Rica	600.00	6.80	0.69	40.80	4.14	97.56	33.82
Relave	300.00	0.34	2.70	1.02	8.10	2.44	66.18
Cab. Calculada		13.94	4.08				

finas, como podemos observar en las Figuras N.º 1, 2, 3, 4 y 5. El mercurio no aparece en el análisis microscópico.

La mejor prueba seleccionada con el concentrador Falcon es con una fuerza de gravedad de 60 G's y una granulometría de 56.55% - 200 malla (Tabla N.º 5). Los resultados del balance metalúrgico indican una calidad de concentrado de 82.78 g/TC en oro, recuperación de 17.76% y un radio de concentración de 28.55.

Los concentradores Falcon son capaces de recuperar partículas liberadas ultrafinas y hacer separaciones de alta calidad utilizando grandes campos centrífugos. De estos equipos se puede esperar una operatividad mayor al 95%, bajo mantenimiento y simplicidad en la operación. Pero mucho depende de las características de la muestra.

El promedio de ley de mercurio en el relave del concentrador Falcon es 3.67 ppm y en el relave de cianuración 2.70 ppm. Estos valores son relativamente altos si comparamos con los límites máximos permisibles que es de 0.14 ppm.

Cuando la muestra del relave de amalgamación es remolido a una granulometría de 77.89% - 200 malla, los resultados del concentrador Falcon mejoran obteniéndose una calidad de concentrado en oro de 137.19 g/TC, recuperación de 19.54%, pero el radio de concentración sube a 46.51 (Tabla N.º 8).

La cianuración del relave del concentrador Falcon remolido es bastante favorable, llegando a una recuperación en oro de 97.56% (Tabla N.º 9) Ver Figuras N.º 6, 7 y 8.

## V. CONCLUSIONES

El relave de amalgamación, que es materia del presente trabajo de investigación tiene una buena ley de oro de 16.16 g/TC, como cabeza promedio calculada y 3.64 ppm de mercurio.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el proceso conveniente para el tratamiento de los relaves de amalgamación es una preconcentración con el concentrador Falcon, seguida de la cianuración para obtener buenas recuperaciones. Previamente la muestra tiene que ser remolida.

El estudio nos reporta datos muy importantes en cuanto al mercurio, porque encontramos en el relave del concentrador Falcon y en el relave de cianuración con valores relativamente altos comparado con los límites máximos permisibles. Esto significa la contaminación permanente del medio ambiente.

En general, la investigación apunta a sustituir el proceso de amalgamación, por lo expuesto anterior-



Figura N.º 6. Relaves de amalgamación para las pruebas.



Figura N.º 7. Alimentación del relave de amalgamación al concentrador Falcon.



Figura N.º 8. Relave y concentrado Falcon.

mente y reemplazar con un proceso combinado de preconcentración con el concentrador Falcon – Cianuración, partiendo desde el mineral fresco.

Es importante señalar que la minería artesanal requiere un apoyo técnico profesional de un Ingeniero minero, geólogo y metalurgista, para evitar condiciones inseguras, minimizar la contaminación

ambiental, optimizar las operaciones y mejorar la rentabilidad del proceso.

## VI. AGRADECIMIENTO

Al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; al Consejo Superior de Investigaciones; a la Dirección y Coordinación de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM. Finalmente a los profesores y alumnos que han colaborado en el desarrollo del Proyecto de Investigación N.º 091601081.

## VII. REFERENCIAS

- Misari, Ch. F. *Metalurgia del oro*. Vol. I y II, Círculos de Estudios y Promociones en Ciencias de la Tierra, Cepect, Lima. 1994.
- Canseco, D. E, *Metalurgia del oro y plata*. Editorial UNI, Lima. 1978, pp. 44-147.
- Villachica, C.; Pascó Font, A. Minería informal aurífera y medio ambiente en Ica y Arequipa. Proyecto realizado por Grade para el AID-MEN. Lima. 1994.
- Jambeiro, A. C. Tecnología de recuperación de finos y ultra finos de oro. En: *Círculo de Estudios y Promociones de Ciencias de la Tierra. El oro*. Cepect, Lima, p. 279-292.
- Brewis, T. Gravity separation. *Mining Magazine*, 1995.172(5) 279-292.
- Sobral, S., L.G. Curso: *Tecnología actual de los procesos de recuperación de oro y plata*. U.I.S. Colombia, Septiembre, 1994.
- Habashi F. *Extractive Metallurgy*. Vol.2: Hydrometallurgy, Gordon and Breach, New Cork. 1970.
- Espí, J. A (ed.). *El libro de la minería de oro en Iberoamérica*. Monterreina, Madrid, 2001 pp.130-132.
- Rubio, J. *Metalurgia del oro*. Editorial Vicente Rico, México, 1991, pp: 138
- Meza, L. *Aspectos fundamentales de los procesos hidrometalúrgicos de los metales preciosos*. Chile 1981, pp. 30- 34.