

COMPARACIÓN ENTRE EL ENSAYO AL FUEGO Y CONTEO DE PARTÍCULAS EN LA DETERMINACIÓN DEL TENOR DE ORO ALUVIAL

*Natalia Zapata*¹, Hamilton Copete¹, María Esperanza López², Rubén Darío Chanci³*

1: Ingenieros de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

2: Docente del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

3: Ingeniero de Minas y Metalurgia, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia

*e-mail: trinidad.zapata@udea.edu.co

Resumen: En este trabajo se realizan aportes sobre la metodología a llevar a cabo en el estudio del oro de un yacimiento aluvial. El material es tomado de una trinchera a diferentes profundidades. A cada muestra en su estado de entrega, se le realizó un análisis granulométrico y luego se concentró en batea, obteniéndose dos productos: colas y concentrado. Se determinó el tenor del mineral empleando dos métodos: ensayos al fuego y conteo de partículas con la ayuda de un estereoscopio con aumentos de 20X, 36X y 72X. Finalmente se determinó en cuáles mallas estaba la mayor cantidad de oro y se compararon los tenores obtenidos por las dos técnicas, encontrándose diferencias entre los dos métodos, que para efectos prácticos y debido a que se registran resultados con el mismo orden de magnitud, son representativos para la industria extractiva del oro.

Palabras clave: Oro, análisis granulométrico, ensayos al fuego, conteo de partículas.

Abstract: This paper presents some contributions on the methodology to be carried out to study the gold from an alluvial deposit. The material was taken from a trench at different depth. For each sample, as received, a particle size analysis was performed, and were then concentrated on a tray. Two products were obtained: tailings and concentrate. Subsequently, the tenor of the mineral was determined using two methods: fire tests and particle counting, with the help of a stereoscope with X20, X36 and X72 magnification. Finally, sieves with contained the greater amount of gold were identified, and the gold tenors obtained by the two techniques were compared. Differences between the two methods were found. For practical purposes and due to the some results showing the same order of magnitude, they are not considered representative for the gold mining industry.

Keywords: Gold, sieves analysis, fire test, particle counting.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la época de los alquimistas, el oro tiene la reputación de ser el más noble de los metales, es decir, existe como un metal nativo en fase sólida y es no reactivo en contacto con la mayoría de los líquidos y gases [1].

En Colombia, la mayoría de los yacimientos auríferos son beneficiados y extraídos, sin tener conocimiento preciso de las características de los diferentes tipos de mena en que se presenta este metal precioso, lo que ha llevado a un desajuste entre los equipos, los procesos y los parámetros operacionales requeridos para el correcto funcionamiento de una planta de extracción. El

desconocimiento de éste acarrea una baja recuperación de oro, mal aprovechamiento de los recursos minerales y altos niveles de contaminación de varias zonas mineras de nuestro país [2].

Los factores que afectan la extracción del oro, son de naturaleza mineralógica, es por este motivo que el conocimiento de la mineralogía del mineral o producto metalúrgico a ser tratado, si es apropiadamente combinado con las pruebas metalúrgicas, proporcionan las herramientas necesarias para la mejor recuperación [2].

El oro aluvial es un importante generador de fuentes de trabajo y de riqueza. Actualmente para su beneficio se usan métodos artesanales y en algunos casos maquinaria pesada pero con resultados muy pobres sobre todo en recuperación (menor a 50 %), por lo que una parte del oro que ya ha sido trabajado, por deficiencias y desconocimiento de otros métodos se pierde en los relaves [3].

Es muy importante hallar las características de los depósitos minerales y las asociaciones con sus minerales, pues determinan los métodos de explotación minera, los requerimientos en los procesos de extracción y el rendimiento de los procesos químicos [4]. Es por este motivo, que en los yacimientos que contienen oro, es fundamental encontrar la forma y ocurrencia del oro, distribución de tamaño de grano del oro, tipo de ganga y material huésped, asociación con otras especies minerales y alteración de minerales [5].

Los granos de oro nativo han sido reconocidos que contienen alrededor de 99,8% de oro. Gran parte del oro de la corteza terrestre está asociado a ganga silíceo en filones o vetas, para lo cual es necesario en su tratamiento metalúrgico liberarlo de la ganga por medio de la molienda [5], el oro también puede estar presente en la estructura de sulfuros como pirita y arsenopirita, en forma de oro "invisible", ya sea como solución sólida o como partículas submicroscópicas. Esta forma de oro, representa pocas decenas de ppb del 1 % en peso de su mineral huésped y se considera generalmente que es una característica de sedimentación primaria [6].

El oro puro tiene una densidad de $19,3 \text{ g/cm}^3$, sin embargo típicamente el oro nativo tiene una densidad de $15,0 \text{ g/cm}^3$. Por consiguiente, si se libera de la ganga, podrá ser fácilmente recuperado por concentración gravimétrica a tamaños y partículas sobre los $10 \mu\text{m}$. Su distintiva alta reflectividad y baja dureza pueden ser usados también como medio de identificación [5]. El oro cuando se encuentra en estado nativo; varía en tamaño desde partículas finísimas, difíciles de recuperar, hasta pepitas (nuggets) de dimensiones considerables.

Las muestras en la gran mayoría de minerales de este tipo corresponden a lo que se define como un placer, que es un depósito de arena, grava u otros materiales residuales o detríticos que contienen uno o más minerales de valor económico, los cuales se han acumulado por procesos de meteorización y concentración mecánica. Las características que presentan este tipo de depósitos son:

- Contienen por lo menos un elemento valioso, el cual es relativamente pesado y resistente a la erosión y abrasión.
- El mineral valioso está libre de la roca a la que estuvo asociado (roca matriz).
- El metal valioso se encuentra concentrado en contenidos económicos [7].

1.1. Beneficio del oro

Es durante el proceso de lavado y cribado que se obtiene la fracción inferior a 5 mm, dónde se realiza el proceso de beneficio del oro o de los distintos minerales pesados. Los concentrados de minerales pesados en forma de arenas negras obtenidos, son posteriormente transportados a una planta construida para tal efecto que incluye por lo general una criba y una mesa vibratoria. El oro es separado del resto de los minerales pesados, en sucesivas pasadas por la mesa vibratoria, utilizando también y según el caso, concentradores gravimétrico de campo y laboratorio o simplemente mediante bateas, para posteriormente ser lixiviados con agua regia y el producto previamente reducido, ser fundido en un pequeño horno [8].

Mediante una correcta caracterización metalúrgica, es posible plantear procesos y algunos parámetros de operación. Un ensayo complementario a las fracciones gravimétricas, es la distribución granulométrica del oro. Este ensayo se realiza con el mineral clasificado hasta 500 mallas Tyler. La muestra es pasada a través de una serie de varios tamices, se recolecta y pesa el mineral retenido en cada malla. Posteriormente, se determina la cantidad de oro en cada fracción granulométrica, mediante la técnica combinada de ensayo al fuego seguido de absorción atómica [2].

Para este estudio, se utilizó el análisis granulométrico por tamizado, caracterizando el material de partida, el concentrado y las colas, además se realizó una inspección visual con la ayuda de un estereoscopio a cada una de las mallas de la distribución elegida, para determinar el valor de los tenores de las muestras analizadas por las dos técnicas empleadas: ensayo al fuego y conteo de partículas.

1.2. Alternativa de beneficio metalúrgico

Para optimizar los resultados metalúrgicos en el tratamiento de minerales aluviales, si es que económicamente resulta factible, en la literatura se recomiendan los procesos de beneficio que a continuación se indica:

- Concentración gravimétrica en combinación con fuerza centrífuga para captar el oro fino (concentrador Knelson).
- Concentración gravimétrica seguida de flotación utilizando celdas y reactivos convencionales.
- Concentración gravimétrica del oro grueso, flotación de oro fino aglomerando en aceite y carbón, en este caso las celdas pueden ser de gran volumen [3].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material tomado en una trinchera construida en un yacimiento aluvial, estaba formado por 7 muestras, las cuales se clasificaron de acuerdo a la profundidad, siendo 1 la más superficial y 7, la más profunda.

2.1. Toma de humedad al material en estado de entrega

Esta prueba se realiza con el fin de determinar la cantidad real de material seco en el estado de entrega de las muestras, para que ante una eventual preparación de pulpa: no se presente exceso de humedad, facilitar la concentración de los minerales; y evitar el consumo excesivo del fluido empleado para la separación.

Para la realización del análisis se tomó de cada muestra aproximadamente 50 g, luego se llevó a una estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ y se midió el peso seco.

En el laboratorio, esta prueba es importante porque no toda la muestra fue secada en la estufa, y se requiere conocer el peso de la muestra base seca, para el cálculo del peso real del material de llegada.

2.2. Concentrado de las muestras

Se debe realizar este proceso porque el oro tiene una alta densidad y conviene tener un concentrado de las especies más densas. Se tomaron las muestras 1, 2, 3 y 4, se realizó una desintegración manual inicial y luego se mezcló cada una con suficiente agua para facilitar la disgregación de las diferentes especies y facilitar su posterior concentración gravimétrica por medio de batea. Las muestras restantes desde su estado de entrega contaban con un tamaño de partícula adecuado, por esto no fue necesario realizar la desintegración manual. Los pesos de los concentrados para cada muestra y el rango de profundidad, se observan en la Tabla 1. El porcentaje en peso de los concentrados es bajo como es de esperarse en este tipo de yacimiento aluvial.

Tabla 1. Rango de profundidad de extracción, peso y porcentaje en peso respecto al peso inicial de los concentrados de las muestras después del bateado.

Muestra	Rango de Profundidad (m)	% En Peso del Concentrado Respecto a Peso Inicial
1	0,0-0,79	0,19
2	0,79-1,38	0,07
3	1,38-2,05	0,45
4	2,05-2,69	1,10
5	2,69-3,37	0,47
6	3,37-4,31	0,31
7	4,31-5,01	0,15

2.3. Tamizado en húmedo de las muestras

Luego del proceso de concentración, se procedió a realizar el tamizado en húmedo con la distribución de tamices de la serie Tyler 60, 80, 100, 140, 200, 270, 325, 400, 500 y base, con el fin de obtener la separación de manera diferenciada de las fracciones por tamaño y poder predecir

en cuál de ellas se encontraba la mayor cantidad de oro. Luego se verificó el peso de cada concentrado.

Una vez se tuvo seleccionada la serie de tamices, se realizó el análisis granulométrico en húmedo de cada una de las muestras. El material obtenido fue llevado a una estufa de secado a (110 ± 5) °C por 24 horas, transcurrido este tiempo se dejaron reposar, para pesarlas y almacenarlas por separado.

2.4. Conteo de partículas de las muestras

El conteo de partículas, aunque es un método dispendioso, se exploró como una alternativa para la cuantificación de oro de aluvión en la muestra por malla, dado que el concentrado para realizar ensayos al fuego era bajo.

El proceso consistió en verter una porción de la muestra previamente clasificada en una caja de Petri, tratando que ésta quedara dispersa uniformemente. Luego se realizó el barrido manual observando las partículas en un microscopio estereográfico Spencer A/O de tal manera que se pudiera examinar todas las porciones de la misma. Cada barrido se realizó por duplicado y se efectuó el conteo de acuerdo a la clasificación realizada por muestra y malla. En las muestras 1, 2 y 3, se separaron las partículas para realizar una tabla de colores; ésta es empleada en campo para obtener de forma rápida la ley de oro del lugar explorado. Las demás muestras no se alteraron, para poder realizar los ensayos al fuego de los concentrados. Las muestras, con tamaños comprendidos entre 106 μm y 250 μm , fueron observadas a 20X, entre 53 μm y 75 μm a 36X y a partir de 45 μm se realizó el barrido a 72X.

2.5. Ensayos al fuego del concentrado

Una vez se finalizó la observación al microscopio estereográfico y debido a la poca cantidad de muestra, se unificaron los concentrados por mallas, quedando así un solo concentrado para las muestras 4, 5, 6 y 7. A las muestras 1, 2 y 3 no se les realizó este análisis, debido a que las partículas de oro encontradas fueron extraídas para realizar una tabla de colores. Luego se calcularon las cargas, se introdujeron en la mufla a una temperatura de (1100 ± 5) °C por una hora, se separaron y limpiaron los botones de plomo para su copelación y finalmente se efectuó la disolución del *doré* con ácido nítrico.

2.6. Ensayos al fuego de las colas

Luego de realizada la concentración, se secaron las colas a una temperatura de (110 ± 5) °C por 24 horas, se hizo desintegración manual para posteriormente tomar una muestra representativa; en primer lugar se fraccionó la muestra con un cortador de Jones, seguido por el método de cono y cuarteo hasta obtener un tamaño adecuado de muestra para los ensayos al fuego. Teniendo las cargas pesadas, maceradas y homogenizadas se introdujeron en la mufla a una temperatura de (1100 ± 5) °C por una hora, luego se hizo la separación y limpieza de los botones de plomo para su copelación y finalmente se efectuó la disolución del *doré* con ácido nítrico para determinar el contenido de oro que pudieran contener las colas.

3. RESULTADOS

3.1. Humedad de las muestras en estado de entrega

En la Tabla 2, se presentan los resultados de humedad de las muestras a su llegada de la mina.

Tabla 2. Peso seco y porcentaje en peso de humedad de las muestras en estado de entrega.

Muestra	Profundidad (m)	Peso seco muestras estado de entrega (g)	Porcentaje en peso de humedad de muestras en estado de entrega (%)	Estado de entrega
1	0,0-0,79	32587,38	2,71	
2	0,79-1,38	26736,59	4,34	
3	1,38-2,05	23832,36	1,68	
4	2,05-2,69	15805,98	0,93	
5	2,69-3,37	16407,41	0,73	
6	3,37-4,31	17042,13	0,53	
7	4,31-5,01	10294,83	0,10	

3.2. Análisis granulométrico de los concentrados

La distribución granulométrica de los concentrados se muestra en la Figura 1. Se puede observar que todos los concentrados presentan una distribución similar y en un mismo rango de tamaño de

partícula entre 45µm-180 µm; el R^2 promedio obtenido de los ensayos con un valor 0,9235, ratifica la confiabilidad del método empleado. Esto indica que el tamaño del oro libre podría estar entre estos rangos.

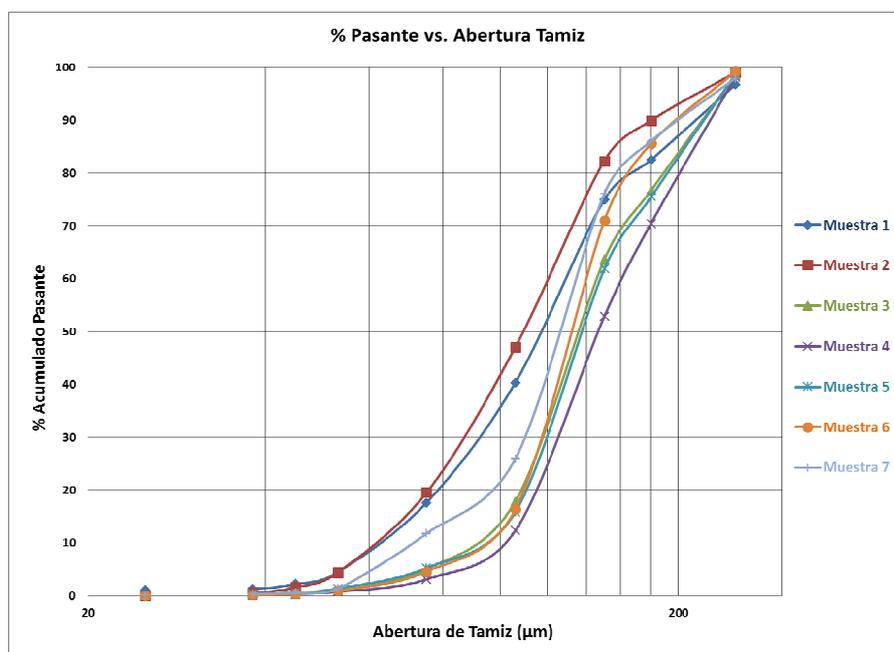


Figura 1. Distribución granulométrica de los concentrados.

3.3. Conteo de partículas de oro

La cantidad de partículas de oro encontradas en los diferentes concentrados se muestran en la Tabla 3; para el cálculo del tenor a partir del conteo se asume que las partículas son de geométrica esférica, con base en sus tamaños se calculó el volumen, con el valor de la densidad (19,3 g/cm³) se halló la masa y la sumatoria de las masas en cada una de las mallas, correspondió al peso total de la muestra.

Tabla 3. Resultados del conteo de partículas por análisis estereográfico.

Muestra	Conteo de Partículas (# de Partículas)									
	60	80	100	140	200	270	325	400	500	Base
1	7	9	9	52	12	15	3	1	1	0
2	1	1	0	5	1	19	9	0	0	0
3	0	1	4	6	8	7	1	0	0	0
4	0	7	8	20	2	9	5	4	0	0
5	1	5	4	25	8	1	0	0	0	0
6	1	5	2	12	3	5	0	0	0	0
7	0	1	1	2	1	2	1	2	0	0

En estos resultados se encontró que la mayor cantidad de partículas se ubican en 106 μm (malla 140); diferente a lo encontrado en las muestras 2 y 3, que exhiben sus mayores valores entre 53 μm (malla 270) y 75 μm (malla 200) respectivamente, para este caso se nota entonces que se da una relación directamente proporcional entre el valor de los concentrados de las muestras y el número de partículas de oro encontrado, de acuerdo a los valores reportados en las Tablas 1 y 3.

En la Figura 2, se muestran imágenes tomadas del microscopio estereográfico. En los círculos se observan las partículas de oro. Éstas presentan forma aplanada, morfología atribuida a los fenómenos ocurridos durante el transporte aluvial, principalmente el aplastamiento, el impacto y la fricción.

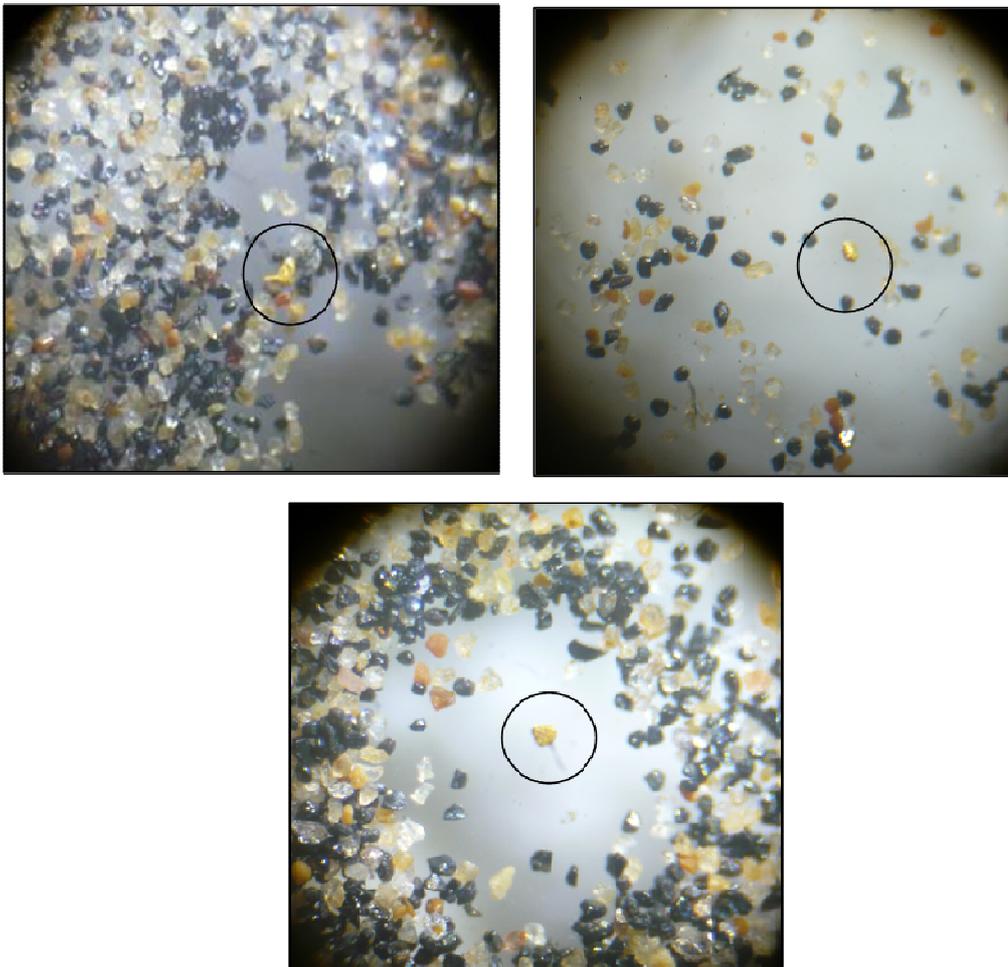


Figura 2. Partículas de Oro observadas al estéreo: Muestra 1, malla 270 a 36X.

3.4. Ensayos al fuego

En la Tabla 4, se muestra un resumen detallado de los tenores obtenidos por el método de conteo de partículas y de ensayos al fuego.

Tabla 4. Tenores de oro para cada muestra por ambos métodos.

Muestra	Conteo de partículas	Ensayos al Fuego
	g Au/Ton Mineral	
1	0,0804	*
2	0,0118	*
3	0,0130	*
4	0,0598	0,1090
5	0,0558	0,0463
6	0,0398	0,0325
7	0,0122	0,0214
Total Tenor	0,2728	-

* *Nota:* Las partículas de oro de estas muestras se separaron para realizar la tabla de colores.

Como se observa en la Tabla 4, según los cálculos realizados por conteo de partículas, se encontró un tenor para toda la trinchera de 0,2728 g de Au/Ton de mineral, siendo las muestras 1 y 4 las que contienen una mayor cantidad de oro con valores de 0,0804 g/Ton y 0,0598 g/Ton respectivamente; y las muestras 2 y 7, las que exhibieron menores valores (0,0118 g/Ton y 0,0122 g/Ton).

Para los ensayos al fuego mostrados en la misma Tabla, se observa el mayor tenor para la muestra 4 con un resultado de 0,1090 g/Ton; valor que coincide con la premisa planteada en el párrafo anterior donde el tenor de esta misma muestra se ubicó en los primeros lugares.

También se aprecian que las similitudes que existen en los resultados por las dos vías de cálculo empleadas, presentan resultados en el mismo orden de magnitud por los dos métodos empleados. La muestra 4, a pesar de ser en la que existe la mayor diferencia con los dos métodos, se sigue ubicando en los primeros lugares en aporte de oro a la totalidad de la muestra; en los demás valores no se dan grandes diferencias.

Finalmente se debe aclarar que las diferencias encontradas en los resultados hallados por conteo de partículas y ensayos al fuego, pueden deberse a las aproximaciones hechas por la técnica, que dan lugar a diferencias en los resultados.

4. CONCLUSIONES

- El método de cálculo por observación al estereó mostró que a 106 μm se presentó la mayor cantidad de partículas para la gran mayoría de las muestras, con excepción de las muestras 2 y 3, que presentaron este comportamiento a 53 y 75 μm respectivamente.
- El procedimiento realizado para el cálculo de los tenores de acuerdo al tamaño de partícula, mostró un tenor para toda la muestra tomada en la trinchera de 0,2728 g Au/m³ de mineral, con sus mayores valores encontrados en las muestras 1 y 4.

- Los ensayos al fuego de las colas no presentaron valores de oro, lo que indica que todo el oro se encuentra en el concentrado obtenido por batea.
- Las diferencias en los resultados de los tenores calculados por el método de conteo de partículas y por ensayos al fuego, tienen porcentaje de error promedio del 32,78 %, esto se presume es producto de algunas suposiciones realizadas por el método de conteo de partículas, anotando que para algunas muestras como la 5 y 6 este error es inferior al 20%.
- El desarrollo de este trabajo por medio de observación al estéreo, muestra la importancia de conocer los tamaños y proporciones del mineral de oro de aluvión, siendo esto una base en el ajuste de los parámetros empleados para el beneficio y para predecir las cantidades aproximadas del mineral en cada malla, predicción que no es posible realizar mediante los ensayos al fuego, por la limitación de material concentrado.
- La determinación de oro libre y su granulometría, es de gran utilidad en el trabajo de campo, con esta herramienta es posible realizar un mejor control sobre los concentrados y las colas para la recuperación del mineral valioso.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pokrovski, Gleb S., et al., “Gold speciation and transport in geological fluids: insights from experiments and physical-chemical modeling”, Geological Society, London, Special Publications, Vol. 402, No 1, pp. 9-70, 2014.
- [2] Traslaviña, Y; et al., “Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar- Colombia), para la selección de los procesos de extracción”, Dyna, Año 72, No. 145, pp. 23-35. Medellín, Marzo de 2005.
- [3] Azañero, A. “Oro aluvial: Alternativas de beneficio metalúrgico”, - L.M. C. - Promoción Aurífera. Banco Minero del Perú, Info. No 1997, 1987.
- [4] La Red Mundial, [<http://es.scribd.com/doc/92607443/texto01>], Julio de 2012.
- [5] La Red Mundial, [<http://es.scribd.com/doc/74854047/Una-Perspectiva-General-Del-Oro>], Junio de 2012.
- [6] Velásquez, German, et al., “Formation and deformation of pyrite and implications for gold mineralization in the El Callao District”, Economic Geology, Venezuela, Vol. 109, No 2, pp. 457-486, 2014.
- [7] La Red Mundial, [<http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgm/publicaciones/public05/archivo.pdf>] Tomado, Junio de 2012.
- [8] viladevall, M., “La prospección de placeres de oro y otros minerales densos”, Universitat de Barcelona, Grupo I+D+I de Geología Económica, Ambiental e Hidrología, 2004.