

TRATAMIENTO DE RESIDUOS MINEROS METALÚRGICOS MEDIANTE ESPESAMIENTO POR FLOTACIÓN CON AGLUTINADO TANINO - CRESÍLICO

TREATMENT OF METALLURGICAL MINING WASTE BY THICKENING BY FLOTATION WITH TANNIN-CRESYL AGGLUTINATE

Marco Antonio Mejía Flores¹, Eduardo Santiago Cazar Rivera², Jean Carlos Farez Atiencia³

{marco.mejia@esPOCH.edu.ec¹, eduardo.cazar@esPOCH.edu.ec², jean.farez@esPOCH.edu.ec³}

Fecha de recepción: 11/05/2026 / Fecha de aceptación: 30/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: En el Distrito Minero Camilo Ponce Enríquez, el proceso metalúrgico de cominución y recuperación gravimétrica tiene una efectividad del 60 al 80%. La actual normativa ecuatoriana prohíbe la amalgamación con mercurio en procesos de recuperación metalúrgica por ser de riesgo toxicológico elevado, y su riguroso protocolo ocasiona un cumplimiento limitado en el medio ecuatoriano. Un minúsculo error por su toxicidad y capacidad de bioacumulación es una potencial amenaza a la salud humana y al ecosistema; razón por la cual las arenas resultantes del proceso primario con valores importantes a ser recuperados originando el uso de otros métodos entre ellos la flotación. En la flotación se utilizan diversos reactivos químicos de amplia aplicación comercial; no obstante, su empleo genera compuestos insolubles en los relaves, lo que requiere evaluar alternativas que minimicen su impacto ambiental y promuevan una gestión más sostenible, en tal virtud se investiga el tratamiento mediante espesamiento por flotación con aglutinado Tanino Cresílico a materiales de relave con la intención de evaluar la eficiencia del Tanino Cresílico como aglutinante y reactivo auxiliar en procesos de flotación mineral. En este caso aplicando el proceso en arenas de relave, las cuales aún tienen valores significativos de minerales sulfurados polimetálicos; de tal razón se estudió el comportamiento frente a la flotación diferencial, desde residuos minerales muy dóciles a minerales complejos. Los residuos de planta estudiados no presentan dificultad durante los ensayos experimentales de laboratorio mediante pruebas de flotación selectiva en celdas mecánicas, la calidad y la eficiencia de separación de los concentrados fueron mejorados con mayor tiempo de flotación y más etapas de limpieza. Se aplicaron los principios de la flotación selectiva, como espesador y la aplicación de aglutinado Tanino Cresílico, con buenos resultados.

Palabras claves: Flotación, Tanino Cresílico, residuos mineros

¹Escuela superior Politécnica de Chimborazo, <https://orcid.org/0000-0002-7566-2063>

²Escuela superior Politécnica de Chimborazo, <https://orcid.org/0000-0001-7822-9022>

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo – Sede Morona Santiago, <https://orcid.org/0009-0002-9367-9923>

ABSTRACT: In the Camilo Ponce Enríquez Mining District, the metallurgical process of cominution and gravity recovery has an effectiveness of 60 to 80%. Current Ecuadorian regulations prohibit mercury amalgamation in metallurgical recovery processes due to its high toxicological risk, and the rigorous protocol results in limited compliance in Ecuador. Even a minute error, given its toxicity and bioaccumulation capacity, poses a potential threat to human health and the ecosystem. For this reason, the sands resulting from the primary process contain significant mineral value, leading to the use of other methods, including flotation. Flotation utilizes various commercially widely used chemical reagents. However, its use generates insoluble compounds in tailings, requiring the evaluation of alternatives that minimize its environmental impact and promote more sustainable management. Therefore, the treatment of tailings materials by flotation thickening with cresyl tannin binder is being investigated to evaluate the efficiency of cresyl tannin as a binder and auxiliary reagent in mineral flotation processes. In this case, the process was applied to tailings sands, which still contain significant amounts of polymetallic sulfide minerals. For this reason, the behavior under differential flotation was studied, from very docile mineral residues to complex minerals. The plant residues studied did not present any difficulties during experimental laboratory tests using selective flotation in mechanical cells. The quality and separation efficiency of the concentrates were improved with longer flotation times and more cleaning stages. The principles of selective flotation were applied, as well as the mineralogical and chemical study of the sample, bulk flotation tests with thickener and the application of Cresyl Tannin binder, very good results

Keywords: Flotation, Cresylic Tannin, mining waste

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, hace años, mediante una reforma legal, se suprimió el uso del mercurio en los procesos metalúrgicos y se restringió el uso del cianuro para dichos procesos; posterior a estos cambios legales, la flotación, hoy por hoy, es uno de los procesos más relevantes dentro de la concentración de minerales, debido a su capacidad para separar especies de interés a partir de las diferencias de propiedades físico-químicas entre las partículas minerales, Este método es muy utilizado en la industria minera para el tratamiento de minerales sulfurados y no sulfurados, permitiendo mejorar la recuperación metalúrgica y la calidad de concentrados obtenidos; Pero en contraste a esta utilidad, el empleo prolongado de reactivos convencionales ha suscitado la necesidad de investigar alternativas más eficientes y amigables con el ambiente a fin de reducir el impacto ambiental asociado a las operaciones minero metalúrgicas (2).

En este contexto, el uso de aglutinado Tanino Cresílico en la flotación ha despertado interés como posible aglutinante y reactivo auxiliar en procesos de flotación debido a sus propiedades fisicoquímicas y capacidad de influir en la selectividad, estabilidad de la espuma y recuperación de minerales valiosos (3); su aplicación presenta una alternativa potencial para disminuir el consumo de reactivos químicos tradicionales y mejorar el desempeño metalúrgico durante la concentración mineral. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia del Tanino Cresílico en la recuperación, concentración mineralógica durante el proceso de flotación. Para ello se desarrollaron ensayos experimentales de laboratorio utilizando celdas mecánicas de flotación donde se analizaron diferentes condiciones

operacionales de concentraciones del reactivo. Asimismo, se realizaron análisis granulométricos, preparación de pulpas, minerales y mediciones relacionadas con la recuperación metalúrgica, estabilidad de espuma y calidad de concentrado final (3).

En el distrito minero Camilo Ponce Enríquez, específicamente en la parroquia de San Miguel de Brazil, se encuentran asentadas numerosas plantas metalúrgicas de beneficio que desempeñan un papel fundamental en la explotación y procesamiento de minerales de la zona (4).

Estas instalaciones, debido a la naturaleza de sus operaciones, han incorporado tecnologías avanzadas, como las celdas de flotación, para optimizar la recuperación de minerales valiosos. No obstante, es evidente que durante su funcionamiento se generan grandes volúmenes de residuos sólidos y líquidos provenientes de los procesos metalúrgicos, los cuales deben ser gestionados con estrictos criterios ambientales. Estos desechos, una vez tratados mediante procesos de corrección y mitigación ambiental, son finalmente depositados en instalaciones especialmente diseñadas bajo estándares internacionales para el almacenamiento seguro de relaves mineros, conocidas como relaveras permanentes, que buscan minimizar los riesgos de contaminación a largo plazo (4).

En los procesos metalúrgicos implementados en estas plantas, el recurso hídrico juega un papel central, siendo cuidadosamente tratado y separado para su reutilización en distintas etapas del proceso productivo. Esto no solo contribuye a la eficiencia operativa, sino también a la conservación ambiental, al reducir la extracción de agua fresca. Sin embargo, es importante señalar que una parte del agua, tras pasar por procesos de recuperación, es reintegrada al drenaje natural. Esta devolución de agua requiere un monitoreo constante para asegurar que los niveles de contaminación y de agentes químicos estén dentro de los límites permisibles, evitando impactos negativos en los ecosistemas circundantes.

Los químicos empleados durante la flotación, muchos de los cuales no son biodegradables o presentan una degradación muy lenta, requieren un tratamiento más exhaustivo antes de su disposición final. A pesar de los procesos de tratamiento implementados, pueden permanecer concentraciones mínimas de estos compuestos en el agua, las cuales no siempre pueden eliminarse de manera totalmente eficiente, representando un desafío ambiental adicional (5). Esto hace imprescindible el seguimiento y control permanente de los efluentes, así como la implementación de nuevas tecnologías para optimizar la remoción de contaminantes.

Adicionalmente, durante la refinación de minerales y otros procesos metalúrgicos extractivos, se generan otras fuentes de residuos sólidos, tales como materiales estériles o subproductos que pueden contener minerales pesados en concentraciones significativas, expresadas en partes por millón (ppm) (6). Estos residuos, si no se manejan adecuadamente, pueden representar riesgos para el suelo, el agua y la salud humana. Por ello, es fundamental implementar estrategias de manejo que incluyan tratamientos específicos, control de relaves y procesos de sedimentación de sólidos, con el objetivo de minimizar su impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad de las operaciones mineras en el largo plazo (5). El tratamiento de este material con el método de espesamiento con flotación con la inducción de un aglutinante propiciador de la flotación por las propiedades androfilias y por la facilidad estos componentes dentro de la vegetación común del sector, realizando las pruebas para su uso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente investigación, se realizó previamente la preparación del material de relave proveniente de génesis hidrotermal de sulfuros polimetálicos. Las muestras fueron sometidas a procesos de secado, tamizado, homogeneización y cuarteo, con la finalidad de obtener una distribución granulométrica adecuada para los ensayos de flotación (5). Posteriormente, se efectuó la caracterización mineralógica y química inicial del material mediante análisis físicos y químicos, incluyendo la determinación del contenido de humedad y la cuantificación de las especies sulfuradas presentes en las muestras, con el propósito de establecer las condiciones iniciales del relave y su comportamiento potencial durante el proceso de flotación se utiliza un reactor de 4 m³ de capacidad, instalado en el laboratorio, donde se trabaja con pruebas de 2 m³ de residuos mineros metalúrgicos previamente caracterizados tanto en el aspecto físico químico y mineralógico, con valores expresados tanto en ppm. como en porcentajes; el material para el proceso se encuentra en estado semi líquido al 40 %, que es operable en el espesador para la aplicación de los Aglutinados Tanino – Cresilico (1) , para observar el comportamiento de la separación sólido líquido y clasificación gravimétrica recolectada cuyos resultados nos permitirán propiciar las respectivas conclusiones técnicas y formular la aplicabilidad del compuesto en el tratamiento de residuos mineros metalúrgicos mediante espesamiento por flotación (método inductivo) (7).

El estudio se realiza en seis relaveras principales en estado activo de 30.000 ton. cada una pertenecientes a operadores mineros de la Asociación San Jorge, ubicadas en la localidad de San Miguel de Brasil, cada una de estas muestras serán recolectadas de conforme a un enmallado previo, caracterizadas mineralógicamente y aplicadas el aglutinado midiendo tiempo 2, 6 12 horas y dosis del producto en 6,12, 20 g/m³ para recolectar los datos de la prueba.

El muestreo se realizará en las relaveras principales activas en recolección de 6 conjuntos mineros ubicados en la localidad de San Miguel de Brasil, todas ellas colectan material de caracterización común compuestos polimetálicos de baja sulfuración con minerales componentes azufre, arsénico, mercurio plomo, zinc cadmio en roca intermedia tipo andesítico (8).

Las piscinas a muestrearse son de capacidades de 30.000 ton, mediante la malla tipo sistemática o grilla regular estrecha de 4m x 4m hasta una profundidad de 3 m , la recolección del ejemplar será con un muestreador manual tipo T o Auger; en casos particulares mediante calicata de 0,5 m *0,5 m mediante retroexcavadora; la muestra será homogenizada y cuarteada hasta obtener los 2 m³ para el ensayo aplicada a una caracterización mineralógica estándar absorción atómica para obtener datos mineralógicos en miligramos y ppm; luego se procede al sistema al espesamiento por flotación, aplicando tiempos de 1, 4, 6 horas y las dosis de 4, 12, 24 g/m³ con sus respectivas combinaciones las cuales son registradas según los componentes recuperados y medidos en ensayos de absorción atómica (9).

Al efectuar el correspondiente muestreo se obtienen ejemplares con asociaciones y valores minerales diversos, constituyéndose cada muestra un registro de datos particulares, con uno máximo a dos patrones correlacionales entre sí, de tal manera que para realizar el análisis estadístico de las seis relaveras se hace necesario recurrir al coeficiente de variación (9).

RESULTADOS

En el presente estudio se trabajó con 150 muestras, las cuales fueron recolectadas conforme al cronograma planteado, e inmediatamente caracterizadas en orden mineralógico y determinada su medición estándar, para luego ser sometidas a las pruebas de laboratorio de espesamiento por flotación con el material en estado semi líquido al 40 %, con el fin de observar el comportamiento de la separación sólido líquido y clasificación gravimétrica al aplicar en el espesador el Aglutinado Tanino – Cresílico , con la variable tiempo de exposición 2, 6, 12 horas y la variable dos la dosis de 6 g /m³ , y luego en la misma escala de tiempo las dosificaciones de 12 g /m³ y 20 g/m³.

En las caracterizaciones estándar se observa tres conjuntos claramente definidos, a pesar que se tratan de materiales de relavera residuos procedentes del proceso de cianuración se constituyen en tres grupos por su tipo de material según sus estratos en que se encuentra (Príncipe, 2008): Primero Material de matriz andesítico con residuos de polimetálicos au-ag-cu con presencia de sulfatos de cobre de zinc, arsénico y plomo predominante en las relaveras un 70 %, el segundo material tiene una matriz riolítica con nula presencia de Au, Ag, Cu ,pero con alto contenido de 10 ppm de plomo, 25ppm de arsénico y 6 ppm residuos cianicidas, con un 58 % de contenido de carbonato y 33 ppm de hierro, su predominación es del 15 % y un tercer grupo formado por una mezcla indivisa de matriz riolítica andesítico y regolítico con muy pequeñas trazas de au,ag,cu pero con contenido de 5 ppm de plomo, 45ppm de arsénico, 50 ppm de azufre y 6 ppm residuos cianicidas, con un 40 % de contenido de carbonato y 6 ppm de hierro (10).

Los trabajos se realizaron en una temperatura ambiente de 12 °C, con control total de humedad atmosférica; el agua utilizada en la fase es agua tratada de material ligeramente alcalino, pH 8. En las dosificaciones de 2 g/m³ tanto en la magnitud de tiempo de dos, seis y doce horas, no se obtuvieron resultados beneficiosos. El aglutinado no cumplió con su fin, diluyéndose en la pulpa. No se formó una capa colectora en los tres tipos de material.

Sin embargo, en las dosificaciones de 12 g en 6, 12 horas los comportamientos con residuos de polimetálicos (matriz andesítico) au-ag -cu adheridos a los de sulfatos de cobre, de zinc, arsénico y plomo, Se observó que en los sulfatos hubo una perfecta adhesión al espumante con una recuperación perfecta, en los materiales de au-ag-cu, se colectaron en capas intermedias el plomo y hierro simplemente se depresaron.

En el segundo material se recuperó el arsénico y los residuos cianicidas progresivamente se diluye durante el proceso todos los metales pesados son depresados (11). En material de relave con la dosificación de 12 g en la prueba de 6 horas se observó que precipita el carbonato y forma una lámina sólida recolectando los sulfuros y diluye los cianicidas, pero posterior a 6 horas adquiere forma coloidal sin surtir trabajo (11). La dosificación de 20 g/m³ no surtió efecto porque el aglutinado pierde su valor progresivo, siendo sujeto de dilución o forma grumos insolubles.

La diferenciación gravimétrica de los minerales tratados y secuencia de productividad

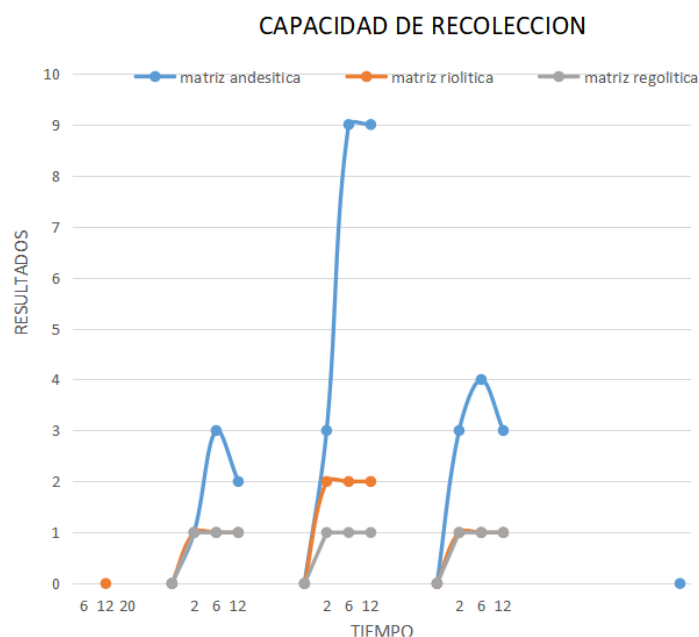


Figura 1. Efectividad de recolección.

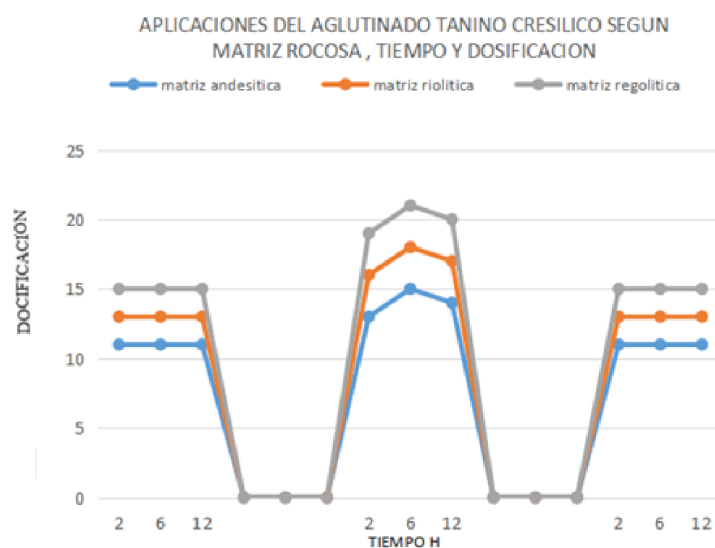


Figura 2. Resultados de concentración.

DISCUSIÓN

El Aglutinado Tanino-Cresílico opera con máxima eficiencia en sus propiedades selectivas a una concentración de 12 g/m³, hasta 6 y 12 horas de trabajo, disminuyendo su tensión superficial a mayores concentraciones, como también a incrementos de horas de trabajo, ocasionando la pérdida de sus propiedades selectivas por falta de un agente cohesionador que fortalezca la membrana colectora.

Según Antonio Cesar Bravo Gálvez en la obra Flotación de Minerales, la flotación diferencial de sulfuros poli metálicos, consiste en recuperar una o más especies mineralógicas, dejando en los relaves otras especies deprimidas por reactivos específicos (11). También

considerando: “Se mezcla por lo tanto el polvo mineral con agua que contiene las sustancias hidrófobantes del mineral, llamadas colectores y se mantiene agitada la dispersión sólida – líquido” (12).

“Las partículas hidrófobadas de mineral se "pegan" a las burbujas de aire, las cuales las arrastran en su movimiento ascendente, mientras que las partículas de ganga permanecen en la dispersión sólido - líquido.

Las burbujas cargadas de partículas de mineral terminan por formar una espuma que se recoge por un vertedero” ” (12). Se analiza de lo obtenido en el laboratorio que el espumante y colector no son lo suficientemente fijo una tensión superficial estable para mayor poder de recolección.

En dosificaciones de 12 g/m³ con trabajos de 6 y 12 horas el comportamiento residuos polimetálicos au-ag-cu con presencia de sulfatos de cobre, sulfatos de zinc, arsénico y plomo, los sulfatos hubo una perfecta adhesión al espumante con una recuperación perfecta, en los materiales de au-ag-cu, se colectaron en capas intermedias el pb y hierro simplemente se depresaron.

En el segundo material se recuperó el arsénico y los residuos cianicidas progresivamente se iban diluyendo durante el proceso todos los metales pesados son depresados. Según Ana Forgiarini en su obra Fundamentos de Flotación “Pasando a la escala molecular, ciertos métodos actuales de separación pueden incluirse en la clase flotación.

Se sabe, en efecto, que al hacer pasar burbujas de aire en una solución de surfactantes, las moléculas de este tienden a adsorberse a la superficie y, por lo tanto, a ser arrastradas por la espuma que se forma. La única diferencia con lo visto hasta ahora, no es realmente el tamaño, sino el hecho de que se trata de moléculas solubles en agua. Guiado por esta razón, conviene clasificar la extracción por espumeo como un método particular, quizás más cerca de la extracción en micelas que de la flotación”. El éxito de estas pruebas va de acuerdo al tipo del mineral y de las sustancias colectoras desarrollándose en un medio favorable.

En el tercer material, la prueba de 6 horas fue idónea porque la regolita precipitó el carbonato y formó una lámina sólida, recolectando los sulfuros y diluyendo los cianicidas, pero, posterior a 6 horas, adquirió forma coloidal sin surtir el trabajo del Aglutinado Tanino-Cresílico. Considerando a Ana Forgiarini en su obra Fundamentos de Flotación: “Las operaciones de flotación dependen de dos tipos de conocimientos científico-técnicos.

De un lado, las técnicas de agitación, contacto, burbujeo, reciclaje, etc., que involucran sistemas polifásicos extremadamente complejos. De otro lado, el conocimiento en cada caso del estado de la superficie de los minerales presentes, en general en función del pH, del o de los colectores y de los agentes activadores o depresores”. Coincide con lo obtenido en el campo de prácticas de tal manera que se hace necesario probar algún accesorio para fijar el aglutinado de prueba.

CONCLUSIONES

La representatividad del material se aseguró mediante el control de su procedencia, composición mineralógica y granulometría (malla N.º 150). Las muestras, provenientes de

relaves del circuito de molienda primaria de una matriz andesítica con veta sílice-sulfurada polimetálica, fueron seleccionadas de un mismo dominio geológico para minimizar la variabilidad mineralógica, litológica y granulométrica. Esto garantizó la homogeneidad de las muestras y la confiabilidad de los resultados obtenidos en la evaluación del tanino cresílico.

En dosificación de 12 g/m³ con trabajos de 6 y 12 horas, los residuos polimetálicos Au-Ag-Cu, con presencia de sulfuros de cobre, sulfuros de zinc, arsénico y plomo, los sulfuros tienen una perfecta adhesión al espumante, con una recuperación perfecta en los materiales de Au-Ag-Cu, con recolección en capas intermedias.

La respuesta del proceso de flotación varió según el tipo de material mineralógico: en la matriz andesítica polimetálica se obtuvo una recuperación eficaz de sulfatos, mientras que en materiales con alta presencia de arsénico y residuos cianicidas se observó una dilución progresiva y depresión de metales pesados. Esto indica la necesidad de optimizar condiciones y posiblemente añadir agentes cohesionadores para mejorar la estabilidad del aglutinado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VERÓNICA, A. A. (2015). RIZOFILTRACIÓN DE PLOMO DEL AGUA DE LA PISCINA DE RELAVES. Machala: UTM.
2. E., K. F. (2007). Caracterización de taninos y creosólicos. Concepción - Chile: Universidad de Concepción.
3. -ENAMI, G. (2012). Guía de operación para la pequeña minería. Santiago, Chile: GEOSERMIN.
4. Forgiarini, A. (2008). Fundamentos de Flotación. Merida - Venezuela: FIRD.
5. Galvez, A. B. (2012). Flotación de minerales. Medellín, Colombia: Editorial Nacional.
6. José, J. (2011). Métodos de investigación. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
7. Julio Fabián, M. M. (2014). Estudio de Impacto Ambiental Ponce Enríquez. Camilo Ponce Enríquez: EIA.
8. M., A. ((2013).). Validación del método de análisis para plomo en el. Machala: UTM.
9. Manuel, A. (2006). Guía Práctica de Análisis de Datos. Córdoba: Consejería de Innovación y Ciencia.
10. Max, L. H. (2006). Espesamiento de lodos por gravedad y flotación. São Paulo Brasil: Inst. Tecnología de saneamiento básico.
11. Max, L. H. (2010). Espesamiento a gravedad y flotación. Sao Paolo: CEPIS.
12. Príncipe, P. H. (2008). Caracterización y optimización de flotación a nivel laboratorio del mineral de cobre. Lima, Perú: Universidad San Marcos.
13. Roberto, H., & Carlos, F. (2000). Metodología de la Investigación. Mexico: McGraw-Hill.
14. Yoshida, T., et al., (1999). Oligomeric hydrolysable tannins from Tibouchina multiflora. Phytochemistry, 52(8): 1661-1666
15. Rubio J, Tessele F, Alhucema Porcile P, Marinkovic E. Flotación y tratamiento de efluentes. Santiago: Sociedad Nacional de Minería; 2001 nov-dic. p. 9-17.
16. Sutulov A. Flotación de minerales. Concepción: Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Universidad de Concepción; 1963.
17. Restrepo Baena OJ. Notas de clase de la asignatura: metalurgia extractiva. Medellín: Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia; s.f.
18. Rovira Pereira A. Metalurgia general. Madrid: Dossat; 1982.
19. Burroughs Gill C. Metalurgia extractiva no ferrosa. México: Limusa; 1990.

20. Sancho J, Verdeja LF, Ballester A. Metalurgia extractiva. Tomos I–II. Madrid: Síntesis; 2000.
21. Unión de Empresas Siderometalúrgicas (UNISED). La fabricación del acero. s.l.: UNISED; 1998.