



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia-Química

**COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN DE
PULPA LIXIVIADA DE MINERALES DEL
YACIMIENTO CAMARIOCA ESTE UTILIZANDO EL
FLOCULANTE ZUKERFLOC N-30M**

Tesis presentada en opción al título de Master en Metalurgia

ELUBERTO ESPINOSA ESPINOSA

Moa 2016



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. “Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia-Química

**COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN DE
PULPA LIXIVIADA DE MINERALES DEL
YACIMIENTO CAMARIOCA ESTE UTILIZANDO EL
FLOCULANTE ZUKERFLOC N-30M**

Tesis presentada en opción al título de Máster en Metalurgia

Autor: Ing. Eluberto Espinosa Espinosa

Tutor: Prof. Tit., Ing. Pedro E. Beyris Mazar, Dr. C

Moa 2016

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Declaro que soy el único autor de la Tesis de Maestría titulada: Comportamiento de la sedimentación de pulpas lixiviadas de minerales del yacimiento Camarioca Este utilizando el floculante ZUKERFLOC N-30M.

Para que así conste, firmo la presente a los ____ días del mes de _____ del año 2016.

Eluberto Espinosa Espinosa

Firma del autor

Dr. C. Pedro Enrique Beyris Mazar

Firma del tutor

Pensamiento

“Todo está dicho ya; pero las cosas, cada vez que son sinceras, son nuevas”

José Martí

Dedicatoria

Dedico este modesto Trabajo de Maestría, a las personas que me demostraron que SI SE PUEDE...

- ✓ A nuestro invicto Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz en su 90 cumpleaños...
- ✓ A mis padres, Liduvina y Eluberto...
- ✓ A mi queridísimo hijo, Ernesto Alejandro...
- ✓ A mi hermana y hermanos...
- ✓ A mis sobrinos...

Agradecimientos

Ofrezco mi agradecimiento a todos los que han contribuido al desarrollo de este trabajo:

- ✓ A la Revolución Cubana, su obra imperecedera me ha permitido estudiar, creciendo física y espiritualmente cada día en una sociedad única...
- ✓ A mi tutor Dr. C. Pedro Enrique Beyris Mazar, por sus recomendaciones, sus valoraciones oportunas, revisión ortográfica y de redacción, su inteligencia en la conducción de este trabajo, sin su incuestionable ayuda no hubiese podido...
- ✓ A mis padres, Eluberto y Liduvina, a mi hermana y hermanos, por su ayuda en mi formación...
- ✓ A mi hijo Ernesto Alejandro, mi fuente de inspiración, presente en cada momento...
- ✓ A la Ing. Sorángel Rivas, Alicia Maperson; a los Ing. Ángel Legrá, Pedro Pellicier, Hugo Angulo, Wilmer Cressequi, a los operadores y mecánicos del CEDINIQ, su dedicación y entrega nunca la olvidaré...
- ✓ Al MSc. Ciro Sam y esposa, al Dr. Ramón Peña, por sus revisiones y recomendaciones...
- ✓ Al Dr. C Amauris de los Milagros Palacios Rodríguez por permitirme reanudar la Maestría, a los profesores del ISMM del Departamento de Metalurgia, me han forjado profesionalmente durante todos estos años...
- ✓ A Victorino Mendoza, al Ing. Eddy Tito, a Yexi Rigñack Peña, por su ayuda con los medios informáticos cuando más los necesité; a la Ing. Aleyda Alpajón, al Ing. Miguel Portuondo y a Marbelina Rodríguez, de la ECG por la impresión y encuadernación del trabajo...
- ✓ A la Lic. Yennicel Cuenca Abreu, por la revisión de redacción y ortográfica final del trabajo defendido.
- ✓ A mis compañeros de trabajo de Control de la Producción de la Empresa Ernesto Che Guevara, al Ing. Rubén Rosell y a Paula Crespo que siempre me alentó a continuar, para todos, mi admiración y respeto...

A todos muchas gracias...

RESUMEN

El cambio mineralógico del material que se alimenta a la planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa Productora de Níquel Comandante Ernesto Che Guevara ha cambiado significativamente los parámetros de diseño de los sedimentadores lo que ha hecho necesario buscar vías para su solución, por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada de los minerales lateríticos del yacimiento Camarioca Este bajo la acción del floculante ZUKERFLOC N-30M para mejorar las condiciones del proceso. La investigación se desarrolló aplicando el software STATGRAPHICS con un diseño factorial multinivel para la experimentación a escala de laboratorio; para el análisis del comportamiento de la sedimentación de la pulpa se empleó el método de Talmage y Fich y se determinó la concentración y la dosis del floculante para la evaluación que se desarrolló a escala piloto. Los principales resultados se obtuvieron con la pulpa lixiviada y magnetizada para la dosis de 4,0 g/t con menor esfuerzo cortante, menor viscosidad de la pulpa y un % de sólido superior a la etapa en la que se le aplicó la dosis de 6,0 g/t. La operación con la aplicación de floculante le permitirá a la planta disminuir el inventario pasivo de Ni, Co, NH₃ y CO₂.

Palabras clave: Lixiviación carbonato amoniacal; sedimentación; floculante.

ABSTRACT

The mineralogical change of the ore fed to Commander Ernesto Che Guevara Nickel Plant Leaching and washing, has greatly change the - design parameters, so that it has lead to find alternatives for its solution, so this paper objective was to assess the thickening behavior of the leached and magnetized slurry of the lateritic ores of Camarioca Este Ore body under the action of the flocculent ZUKERFLOC N-30M, in order to improve the process conditions. The investigation was developed applying the software STATGRAPHICS with a design factorial multilevel for the experimentation to laboratory scale; for the analysis of the behavior of the sedimentation of the pulp it was used the method of Talmage and Fich and it was determined the concentration and the dose of the flocculent for the evaluation that was developed to scale pilot. The best results were obtained with the leached and magnetized slurry, for the dosages of 4, 0 g/t with lower cutting effort, less viscosity of the slurry and a solid % that is greater to the stage in the dosage of 6,0 g/t was applied. The operation with the application of the flocculent, will allow the plant to lower the inventory of Ni, Co, NH₃ and CO₂.

Words key: Ammonia carbonate leach; thickening; flocculent.

.

INDICE

INTRODUCCIÓN	- 1 -
1. MARCO TEÓRICO.....	- 5 -
1.1 Breve descripción del proceso tecnológico de la empresa.....	- 5 -
1.2 Caracterización de la Planta de Lixiviación y Lavado.....	- 8 -
1.3 Sedimentación, conceptos generales.....	- 10 -
1.4 Fundamentos teóricos de la floculación.....	- 12 -
1.4.1 Teoría básica de la coagulación y la floculación.....	- 13 -
1.5 Trabajos investigativos precedentes.....	- 16 -
Conclusiones del capítulo.....	- 22 -
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	- 24 -
2.1 Diseño de la experimentación.....	- 24 -
2.2 Materiales utilizados y sus características.....	- 26 -
2.3 Floculante ZUKERFLOC N-30M.....	- 27 -
2.4 Metodología de la investigación.....	- 28 -
2.5 Equipos y técnicas de análisis químicos utilizadas.....	- 30 -
2.6 Descripción del flujo tecnológico a escala piloto.....	- 38 -
Conclusiones del capítulo 2.....	- 41 -
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	- 43 -
3.1 Análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos a escala de Laboratorio.....	- 43 -
3.1.1 Efecto de la concentración de la solución y dosis de floculante en la velocidad de sedimentación.....	- 43 -
3.1.2 Efecto de la concentración de la solución y la dosis de floculante en el esfuerzo cortante y en la viscosidad de la pulpa.....	- 44 -
3.1.3 Esfuerzo cortante y viscosidad de la solución de floculante a diferentes concentraciones.....	- 46 -
3.2 Evaluación a escala Piloto.....	- 46 -
3.2.1 Análisis comparativo de los resultados analíticos durante la etapa con y sin aplicar floculante.....	- 47 -

3.2.2	Parámetros del proceso en Lixiviación durante la etapa con y sin aplicar floculante.....	- 48 -
3.2.3	Comportamiento de la velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa sin aplicar y aplicando floculante.	- 49 -
3.2.4	Resultado del esfuerzo cortante y viscosidad de la pulpa obtenido sin aplicar floculante.	- 51 -
3.2.5	Resultados del esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa obtenidos aplicando floculante en Lixiviación.	- 53 -
3.3	Evaluación económica.....	- 54 -
	Conclusiones del capítulo 3.....	- 56 -
	CONCLUSIONES	- 58 -
	RECOMENDACIONES	- 59 -
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 60 -
	ANEXO:	- 65 -

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la producción de níquel con mayor eficiencia es un imperativo de la economía cubana, por lo que se han realizado importantes investigaciones encaminadas a mejorar la eficiencia de su proceso tecnológico; en la tecnología carbonato amoniacal del proceso CARON, la eficiencia final del proceso, depende de una de las operaciones unitarias básicas de la tecnología, la sedimentación de la pulpa lixiviada, en la que no se ha logrado estabilidad por los cambios en las características mineralógica del mineral que se alimenta al proceso.

Aunque se ha trabajado en determinar un floculante que permita mejorar el comportamiento de la sedimentación, sin incrementos del amperaje de los sedimentadores, no siempre se ha logrado los resultados esperados. Cubillet, Chaviano y Espinosa (1988), Lalande y Espinosa (1995), evaluaron este proceso con el empleo de floculante, seleccionando, en ambos casos, un polímero de alto peso molecular ignorando el diseño de los sedimentadores con bajo torque que provocó inestabilidad en las operaciones con altos amperajes en los mismos.

Rivas (2012) y (2012)a, para la pulpa lixiviada y magnetizada, evaluaron diferentes tipos de floculante, no considerando el efecto de la variación de la concentración de la solución y los mejores resultados los alcanzó a altas dosis para su aplicación a escala industrial. García y Rojas (2006), evaluaron la sedimentación de la pulpa lixiviada de la Empresa “Comandante René Ramos Latourt”, de Nicaro, con todos los floculantes lograron buenos resultados sin definir uno de ellos. Morales, Ganzó y Espinosa (2000), y Espinosa y Beyris (2016), determinaron a escala de Laboratorio que el mejor floculante para este proceso fue el QUIMIFLOC N-30, equivalente al actual ZUKERFLOC N-30M.

La separación de los licores y la pulpa se lleva a cabo mediante un proceso de decantación a contracorriente, el sólido alimentado en forma de pulpa, desde los tanques de contacto, se expulsa en forma de colas empobrecidas de níquel y cobalto, desde la última etapa de lavado, mientras que los licores se alimentan en sentido contrario, desde esta misma etapa hasta la primera etapa de lixiviación, que se obtiene el licor producto final de esta etapa del proceso.

Por diseño, a la pulpa lixiviada se le ha aplicado la floculación magnética para favorecer la sedimentación, esta no siempre ha sido efectiva, con la explotación de nuevos yacimientos de minerales empobrecidos de los metales valiosos y alto contenido de impurezas, sílice (SiO_2) y óxido de magnesio (MgO), provocan crisis de sedimentación con aparición de transversos, bajas velocidades de sedimentación y altos porcentajes de sólidos en suspensión, considerando que estas menas pueden cambiar sus propiedades Turro, (2002), Chang, Rojas y Arce, (2004); Chang, Toirac y Arce, (2006).

Los sedimentadores de proyecto fueron diseñados con bajo torque en su mecanismo, por lo que la floculación magnética y la floculación química que se implementó en alguno de sus sedimentadores, como una medida de preparación a la UBP Lixiviación y Lavado, para asimilar estos minerales, ha sido inestable, provocando incremento en el amperaje de los motores del mecanismo de accionamiento. En el diseño original no se consideró la aplicación de floculante.

En la Unidad Básica de Producción de Lixiviación y Lavado de la Empresa del Níquel "Comandante Ernesto Che Guevara", en Moa, Cuba, se desarrolla el proceso de lixiviación del níquel y el cobalto contenido en el mineral reducido procedente de la UBP Hornos de Reducción, proceso que es fundamental dentro de la cadena productiva de la industria, en ella los metales valiosos son extraídos desde el mineral reducido, utilizando como sustancia disolvente una solución de hidróxido y carbonato de amonio y como agente extrayente el oxígeno, el cual se le inyecta a la pulpa mediante el aire de baja presión en los turboaeradores.

A inicios del año 2010, se modernizó un sedimentador de la primera etapa de lixiviación, que se diseñó con un mecanismo de alto torque capaz de asimilar todo el mineral que se recibe, desde la UBP de Hornos de Reducción, su alta capacidad

solo se garantiza mediante el empleo de floculante que mejore la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada, estable y sin incrementos del amperaje de los sedimentadores; el yacimiento Camarioca Este, será alimentado al proceso, pero no ha sido evaluado a escala de laboratorio, ni a escala piloto, bajo la acción del floculante ZUKERFLOC N-30M, lo que se define como **situación problemática**.

Problema científico: Insuficiente conocimiento del comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada de los minerales del yacimiento Camarioca Este utilizando el floculante ZUKERFLOC N-30M y su influencia en las propiedades reológicas de la pulpa.

Objeto de estudio: Pulpa de minerales lateríticos lixiviada y magnetizada de los minerales del yacimiento Camarioca Este.

Campo de acción: Factores que afectan la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada.

Hipótesis:

- Si a la pulpa lixiviada y magnetizada de los minerales lateríticos del yacimiento Camarioca Este se le añade el floculante ZUKERFLOC N-30M se podrá incrementar la velocidad de sedimentación, disminuir los sólidos en suspensión y el área unitaria con efecto no significativo en el esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa mejorando las condiciones de sedimentación de esta.

Objetivo general:

- Evaluar el comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada de los minerales lateríticos del yacimiento Camarioca Este bajo la acción del floculante ZUKERFLOC N-30M, con las dosis y concentración determinadas a escala de laboratorio.

Objetivos específicos:

- Determinar la composición química de la materia prima evaluada.
- Evaluar a escala de laboratorio muestras de pulpa del mineral Camarioca Este utilizando el floculante ZUKERFLOC N-30M en muestra de pulpa lixiviada y magnetizada.

- Evaluar a escala piloto los factores que influyen en el proceso de sedimentación de las pulpas de mineral reducido y lixiviado, con floculación magnética y química.

Las **tareas de investigación:**

- Revisión bibliográfica de trabajos investigativos precedentes de sedimentación para pulpas de minerales lateríticos.
- Planificación de los experimentos a escala de laboratorio y piloto para el procesamiento del mineral.
- Toma de la muestra de pulpa lixiviada y magnetizada en Planta Piloto y preparación de las soluciones de floculantes a las concentraciones establecidas en el diseño de experimento.
- Realización de los experimentos a escala de laboratorio y piloto para las condiciones establecidas, dosis y concentraciones de la solución del floculante.
- Tratamiento estadístico e interpretación de los resultados obtenidos.

1. MARCO TEÓRICO

La sedimentación de la pulpa lixiviada en la tecnología carbonato amoniacal ha sido investigada para determinar un floculante que garantice el comportamiento estable de este proceso con bajo esfuerzo cortante y baja viscosidad de la pulpa, el presente trabajo está dirigido en esa dirección.

Los objetivos de este capítulo son:

- Describir brevemente el flujo tecnológico de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara enfatizando en la planta de Lixiviación y Lavado;
- Analizar la fundamentación teórica sobre la sedimentación y la floculación;
- Evaluar los trabajos precedentes relacionados con la sedimentación de pulpas.

1.1 Breve descripción del proceso tecnológico de la empresa.

El esquema tecnológico de la Empresa del Níquel “Comandante Ernesto Che Guevara” (ECG) está basado en la tecnología de la lixiviación carbonato-amoniacal del mineral reducido o proceso Caron, 238-MOP, (2008). El esquema tecnológico está compuesto por Unidades Básicas de Producción (UBP) y Unidades Básicas de Servicios (UBS); en la figura 1 se muestra un diagrama del flujo tecnológico.

La Unidad Básica Minera suministra el mineral laterítico a la fábrica. Los componentes fundamentales del mineral son el níquel, el cobalto y como acompañante en cantidades considerables otros componentes, como el hierro. La transportación se realiza directamente desde las excavaciones hasta el área de recepción por camiones Volvos.

El mineral minado se somete a un proceso de secado y molienda en la UBP Preparación de Mineral y se suministra a los silos de almacenaje, donde se bombea a la UBP Hornos de Reducción ocurriendo en esta el proceso de reducción del Ni contenido en el mineral. La misma está constituida por 24 hornos de soleras múltiples los cuales descargan el mineral a los enfriadores pasando a la UBP Lixiviación y Lavado.

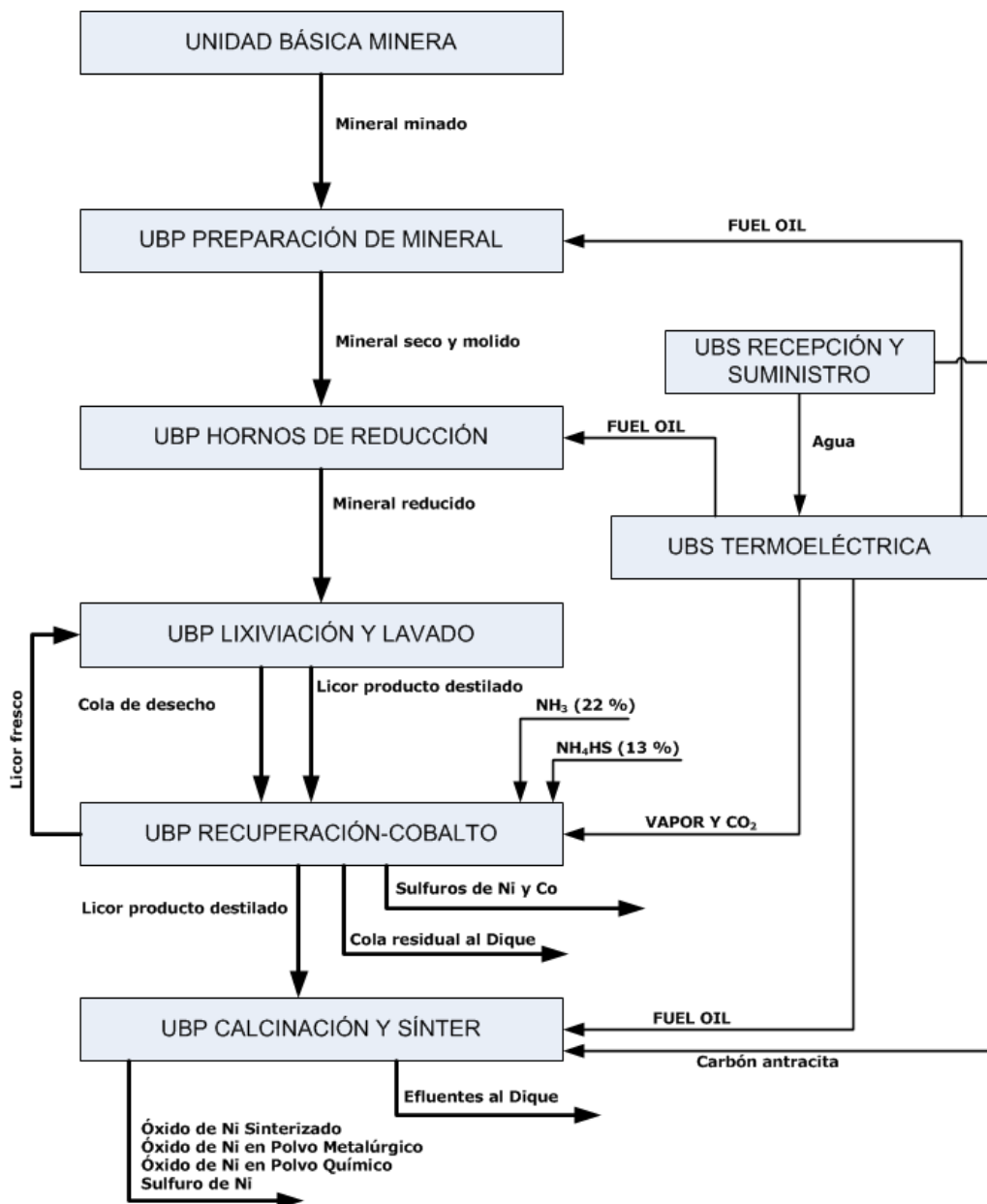


Figura 1: Esquema tecnológico de la Empresa "Ernesto Che Guevara".

La pulpa formada con el mineral reducido, en la UBP Lixiviación y Lavado, pasa por los turboaeradores de la primera y la segunda etapas de lixiviación que operan como primera etapa; el flujo del mineral es a contracorriente con el licor carbonato-amoniaco y el proceso de lixiviación se realiza mediante la oxidación de la pulpa con aire en los turboaeradores, para la separación del licor y el sólido se emplean sedimentadores a los que se le aplica floculación magnética, se dispone de un sedimentador en la primera etapa diseñado para operar con la aplicación de la floculación química.

La pulpa lixiviada se envía a la sección de Lavado compuesto por dos sistemas que operan en paralelo, el licor enriquecido en Ni y Co y la pulpa de desecho son enviados a la UBP Recuperación-Cobalto para su procesamiento; el licor de la segunda etapa de lixiviación se somete a un proceso de separación de cobalto en esta última UBP, una vez tratado con hidrosulfuro de amonio, retorna y se alimenta como licor de contacto en los enfriadores de placas de Lixiviación.

En la UBP Recuperación-Cobalto, el licor enriquecido en Ni y Co se somete a una separación parcial del cobalto, aplicando para ello un proceso de ensemillamiento en tanques agitados con pulpas de sulfuro de Ni y Co ya precipitado y la precipitación en un reactor tubular en el que se alimenta como reactivo precipitante, el hidrosulfuro de amonio.

El sulfuro de Ni y Co se filtra y se seca con el medio ambiente, se envasa y se exporta como uno de los surtidos del proceso. El licor descobaltizado se somete a un proceso de destilación obteniéndose una pulpa de carbonato básico de níquel y la pulpa de desecho de la última etapa de lavado se destila para la recuperación del amoníaco, posteriormente se envía a la Presa de Cola. La pulpa de carbonato de Ni se envía a Calcinación y Sinter.

La UBP Calcinación y Sinter, sedimenta y filtra la pulpa de carbonato básico de níquel la que se alimenta en forma de torta al horno de calcinación para la obtención del óxido de Ni. El óxido descargado del horno de calcinación se alimenta a la máquina de sinter obteniéndose el óxido de níquel sinterizado que constituye el producto final principal de la planta y de la fábrica. Este producto es envasado en Big-Bag y trasladado al Puerto de Moa para su comercialización; además del sinter,

en esta UBP, se obtiene el óxido de níquel en polvo metalúrgico, óxido de níquel en polvo químico y el sulfuro de níquel.

La UBS Termoenergética suministra el vapor para la destilación del licor y la cola, genera parte de la energía eléctrica consumida, suministra aire de proceso, para el transporte neumático y el de instrumento, así como garantiza el tratamiento y enfriamiento del agua.

La Unidad Básica de Recepción y Suministro, potabiliza el agua y como su nombre indica, recepciona, almacena y suministra el amoníaco y el carbón antracita a las UBP.

Se dispone de Direcciones Funcionales: la de Abastecimiento, Seguridad, Salud y Medio Ambiente; Mantenimiento, Economía y Recursos Humanos, así como la Dirección General.

1.2 Caracterización de la Planta de Lixiviación y Lavado

El mineral alimentado desde la UBP Hornos de Reducción, se alimenta hacia los turboaeradores de la primera y la segunda etapas de Lixiviación que operan como una sola etapa, la pulpa lixiviada se sedimenta en el sedimentador de la primera etapa, de este se extrae el licor de reboso que recircula a Tanques de Contacto y la pulpa espesada se bombea hacia el sedimentador de la segunda etapa, 238-MOP, (2008).

Los factores que influyen en la lixiviación son:

- Fineza del mineral molido: la velocidad de reacción en este sistema de lixiviación depende del tamaño de las partículas de los minerales. Cuando las partículas del mineral son pequeñas, se aumenta la superficie de contacto de éstas con la solución acelerándose la lixiviación de los metales. Sin embargo, el mineral muy molido no favorece las cualidades de sedimentación y se crean dificultades con la separación de la pulpa de la solución.
- Grado de Reducción: el contenido total de Ni en el mineral reducido es aproximadamente de 1,53 % o sea, con la reducción se incrementa el porcentaje de Ni. De esta cantidad, sin embargo, no todo el Ni y el Co está en su forma metálica para que se pueda lixiviar, cuando mayor es la eficiencia de la

reducción, mayor será la lixiviación del Ni y el Co, aproximándose el Ni lixiviado y lavado al Ni extractable, siempre y cuando se mantenga el hierro metálico en rango normal de reducción aproximadamente 3 % (absoluto).

- Composición de la solución: es requisito fundamental mantener las concentraciones en las soluciones de lixiviación, la disminución de la concentración de amoníaco y dióxido de carbono por debajo de un 3 % respectivamente perturba la lixiviación del Ni.
- Relación líquido-sólido: es de suma importancia en este proceso de decantación a contracorriente mantener la relación líquido-sólido en los parámetros establecidos, la relación óptima en la alimentación a los turboaeradores es de 6,3:1 y en el cono del sedimentador es de 0,67:1

La relación líquido-sólido de 6,3:1 en los turboaeradores garantiza la extracción del níquel y el cobalto en los valores previstos, la relación de 0,67:1 en los sedimentadores proporciona la separación óptima del licor y el sólido evitando el corrimiento del Ni y el Co hacia las etapas siguientes, con impacto negativo en la eficiencia metalúrgica de la UBP.

- Tiempo de lixiviación: el tiempo de retención de los reactivos en las condiciones de reacción es un elemento básico para el desarrollo de las reacciones químicas dentro del reactor, en la primera etapa debe ser de 97 minutos.
- Temperatura de lixiviación: la lixiviación de los metales reducidos se efectúa cuando se verifican las reacciones de oxidación. Todas las reacciones de oxidación son exotérmicas, desprenden gran cantidad de calor y esto trae como consecuencia un incremento de temperatura en los licores. La lixiviación es conveniente solamente con un aumento relativo de temperatura ya que aumentan las pérdidas de amoníaco de las soluciones y se incrementa la solubilidad del magnesio, Mg. En la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura, Turro, (2002). La correcta operación de los enfriadores de licor garantiza en gran medida el balance térmico de la UBP.

La operación con minerales de mala velocidad de sedimentación, menor a 1,0 m/h, entorpece la operación de la UBP con presencia de transversos, lo que obliga a incrementar la extracción de la pulpa por el cono del sedimentador, disminuye la relación líquido-sólido afectando la eficiencia metalúrgica de la UBP. Es muy importante, para lograr la estabilidad del proceso, evaluación a escala de laboratorio y de Planta Piloto, de un floculante que garantice la operación estable de la sedimentación con bajo porcentaje de sólidos en suspensión en el licor de reboso, incrementa el ciclo de operación y la eficiencia de enfriamiento de los enfriadores de placas y garantiza la operación con una relación líquido-sólido estable en la pulpa del fondo del sedimentador.

1.3 Sedimentación, conceptos generales.

La sedimentación es un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en los procesos hidrometalúrgicos en las operaciones de separación líquido-sólido. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en un medio acuoso. Cuando se produce la sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan, para designar la sedimentación, los términos de clarificación y espesamiento, se habla de clarificación, cuando hay un especial interés en el fluido clarificado y de espesamiento cuando el interés, está puesto en la suspensión concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferentes formas, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración, por lo que se puede hacer referencia a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

a) Sedimentación de partículas discretas.

Se llama *partículas discretas* a aquellas partículas que no cambian de características, forma, tamaño, densidad, durante la caída.

Se denomina *sedimentación* o *sedimentación simple* al proceso de depósito de partículas discretas. Este tipo de partículas y esta forma de sedimentación se presentan en los desarenadores, en los sedimentadores y en los

presedimentadores como paso previo a la coagulación en las plantas de filtración rápida y también en sedimentadores como paso previo a la filtración lenta.

b) Sedimentación de partículas floculentas:

Las *partículas floculentas* son aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas, forma, tamaño, densidad, sí cambian durante la caída.

c) Sedimentación por caída libre e interferida

Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, éstas se depositan sin interferir, a este fenómeno se le denomina *caída libre*. En cambio, cuando hay altas concentraciones de partículas, se producen colisiones que las mantienen en una posición fija y ocurre un depósito masivo en lugar de individual. A este proceso de sedimentación se le denomina *depósito* o *caída interferida* o *sedimentación zonal*.

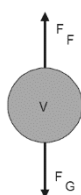
Cuando las partículas, ya en contacto, forman una masa compacta que inhibe una mayor consolidación, se produce una *compresión* o *zona de compresión*. Este tipo de sedimentación se presenta en los sedimentadores de la UBP Lixiviación y Lavado en las operaciones de separación líquido-sólidos.

d) Expresiones de velocidad de sedimentación

- *Partículas discretas con caída libre*

El fenómeno de sedimentación de partículas discretas por caída libre, también denominado en soluciones diluidas, puede describirse por medio de la mecánica clásica.

En este caso, la sedimentación es solamente una función de las propiedades del fluido y las características de las partículas según se demuestra a continuación.



Téngase en cuenta que en el caso de una partícula que se deja caer en el agua, estará sometida a dos fuerzas como se muestra en la figura: fuerza de flotación (F_F), que es igual al peso del volumen del

líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes) y fuerza gravitacional (FG).

$$\text{Si: } FF = \rho * g * V \quad (1)$$

$$\text{y, } FG = \rho_s * g * V \quad (2)$$

donde:

ρ = densidad del líquido

ρ_s = densidad del sólido

V = volumen de la partícula

De la acción de ambas fuerzas tenemos la fuerza resultante, que será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:

$$F_i = g * V * (\rho_s - \rho) \quad (3)$$

donde:

F_i = fuerza resultante o fuerza de impulsión

Arrastrada por esta fuerza (F_i), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la Ley de Newton, cuyo valor es:

$$F_R = C_D * A * \rho * \frac{V_s^2}{2} \quad (4)$$

donde:

F_R = fuerza de rozamiento

A = área transversal al escurrimiento

V_s = velocidad de sedimentación

C_D = coeficiente de arrastre

1.4 Fundamentos teóricos de la floculación

Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas, Ames y Lovera (2015). En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinética o browniana. Se debe a la energía térmica del fluido;

- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad. Se produce en la masa del fluido en movimiento;
- Sedimentación diferencial. Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de la pulpa y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales de tamaño menor de un micrómetro empiecen a aglutinarse. El movimiento browniano actúa dentro de este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo. Este mecanismo ha sido estudiado en lugares donde la temperatura, baja alrededor de cero grados, rango dentro del cual el movimiento browniano se anula y por consiguiente, también lo hace la floculación pericinética. En este caso, se comprobó que la floculación ortocinética es totalmente ineficiente y no tiene importancia alguna sobre partículas tan pequeñas.

1.4.1 Teoría básica de la coagulación y la floculación

Los términos Coagulación y Floculación se utilizan ambos indistintamente en referencia con la formación de agregados. Sin embargo, conviene señalar las diferencias conceptuales entre estas dos operaciones, Anónimo (2015).

La coagulación es la desestabilización de un coloide producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos.

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas primero en microflóculos y más tarde en aglomerados voluminosos, llamados flóculos.

La precipitación del coloide implica por tanto dos etapas:

- Desestabilización. Las teorías sobre el mecanismo de este fenómeno se basan en la química coloidal y de superficies.

- Transporte de núcleos microscópicos para formar agregados densos. La teoría del transporte está basada en la mecánica de fluidos.

Las primeras teorías sobre la cinética de la floculación fueron desarrolladas por Smoluchowski (1916, 1917), quien derivó las expresiones básicas para la frecuencia de colisión de las partículas bajo el efecto del movimiento browniano y en régimen de flujo laminar y desarrolló la siguiente expresión, que es representativa de la floculación pericinética.

$$J = \frac{1}{6} * n_1 * n_2 * (d_1 + d_2) * \frac{d_v}{d_z} \quad (5)$$

donde:

J = número de colisiones entre partículas.

n_1 = concentración de partículas de diámetro (d_1).

n_2 = concentración de partículas de diámetro (d_2).

$\frac{d_v}{d_z}$ = energía desarrollada en el proceso.

Camp y Stein (1943), fueron los primeros en determinar que para fines prácticos, era necesario añadirle turbulencia al proceso y generalizaron la ecuación de Smoluchowski para incluir las condiciones de flujo turbulento. Así, de acuerdo con su expresión, la frecuencia de colisiones está expresada por la siguiente ecuación:

$$H_{ij} = \frac{4}{3} * n_i * n_j * R_{ij}^3 * G \quad (6)$$

donde:

(H_{ij}) es el número de colisiones por unidad de tiempo y por unidad de volumen entre las partículas de radio (R_i) y (R_j); (n_i) y (n_j) son las concentraciones de las partículas colisionantes; (R_{ij}) es el radio de colisión ($R_i + R_j$) y (G) es el gradiente de velocidad que, según ellos, es igual a:

$$G = \sqrt{\left[\frac{\varepsilon}{\nu} \right]} \quad (7)$$

donde:

ε = potencia total por unidad de volumen del fluido y

ν = viscosidad cinemática.

La principal objeción a la expresión (2) se basa en el hecho de que esta ecuación fue deducida para condiciones de flujo laminar y que pierde mucho de su sentido físico cuando se la aplica a floculadores cuyo flujo es en su mayor parte turbulento, según expresaron Camp y Stein y posteriormente Snel y Arboleda (1982).

Los gradientes de velocidad de una escala de longitud dada no contribuirán significativamente a la colisión de partículas más grandes o más pequeñas que esta escala. Así como el rígido modelo desarrollado por Smoluchowski para condiciones de flujo laminar no es enteramente aplicable a floculación turbulenta.

Otras alternativas fueron estudiadas por Frisch (1956), Levich (1962) y Saffman y Turner (1956), quienes desarrollaron expresiones estrictamente formuladas para flujo turbulento.

$$J = 12 * \pi * \beta * n_1 * n_2 * R_{1-2} * G \quad (\text{Levich}) \quad (8)$$

$$J = 1,3 * R^2 * n_1 * n_2 * G \quad (\text{Turner}) \quad (9)$$

Formas integradas de la ecuación (2) para diferentes tipos de flujo fueron presentadas por Fair y Gemmell (1964), Tambo (1964), Swift y Friedlander (1963) y Wang (1966).

Partiendo de la ecuación de Smoluchowski, Harris (et al) (1966), que establecieron un modelo matemático para la velocidad de aglomeración de las partículas, admitiendo que el volumen de la partícula resultante es igual a la suma de los volúmenes de las partículas aglomeradas y que su densidad permanece constante. A la menor de las partículas agregadas se la llama *partícula primaria* y su concentración por unidad de volumen es (n_1). Una fracción de las partículas que colisionan se aglomera, otra no lo hace y otras se pueden desaglomerar, de acuerdo con las características de las partículas del coagulante y del flujo, por ejemplo, estabilidad de los coloides, esfuerzos hidrodinámicos.

En las ecuaciones que siguen se introducirá, por lo tanto, un coeficiente de aglomeración (n), que representa a la fracción del número total de colisiones realizadas con éxito. Los flóculos restantes están constituidos por las partículas i, j, k , cuyas concentraciones por unidad de volumen son n_i, n_j, n_k y sus radios, $i/3R, j/3R, k/3R$

Inicialmente, para una suspensión dispersa, $t = 0$

$$\frac{dn_1}{dT} = -n * \delta * a * \frac{dV}{dy} * \phi * n_1 \quad (10)$$

donde:

δ = función de la distribución de tamaños definida por:

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^{p-1} n_i * [i^{1/3} + 1]^3}{\sum_{i=0}^p n_i} \quad (11)$$

a = relación entre el radio de colisión de un flóculo y su radio físico:

$$a = \frac{R_{ij}}{r_i * i^{1/3} + j^{1/3}} \quad (12)$$

ϕ = fracción del volumen del flóculo:

$$\phi = \frac{4}{3} * \pi * R_1^3 * \sum_{i=1}^p i n_i$$

y, $\frac{dV}{dy}$ es el gradiente de velocidad.

El tamaño máximo de los floculos está limitado a un floculo de orden p . El modelo propuesto no permite la determinación del tamaño máximo del floculo.

1.5 Trabajos investigativos precedentes

Para darle solución a las afectaciones que se presentan durante la sedimentación de la pulpa lixiviada se han desarrollado trabajos encaminados a determinar un floculante que garantice la clarificación de los licores sin compactación de la pulpa dado a las limitaciones en el torque del mecanismo de accionamiento que presentan los sedimentadores sin modernizar.

Los floculantes han sido de gran utilidad en el mejoramiento de los procesos de sedimentación y clarificación. En el caso del proceso de sedimentación de la pulpa cruda de la Empresa "Comandante Pedro Sotto Alba" no ha sido obviado, Grave de Peralta y Méndez (1971), Nebot (1969a) y (1969b) estudiaron una amplia variedad de floculantes orgánicos, entre ellos, los de la serie Magnafloc, Sedomax, Glycol, Poliot y Alcopat, no obteniéndose efectos beneficiosos, ni en la sedimentación, ni en la compactación de la pulpa cruda.

La prueba realizada a escala industrial en uno de los sedimentadores por Grave de Peralta (1975), al cabo de varios días de operación hubo un efecto negativo relacionado con el incremento de la viscosidad de la pulpa dificultando el bombeo hacia la Planta de Lixiviación. En estos resultados negativos pudieron influir muchos factores: concentración de floculante, punto de dosificación, control de pH y conductividad entre otros que no fueron definidos.

Cubillet, Chaviano y Espinosa (1990), desarrollaron evaluaciones de la pulpa lixiviada y magnetizada a escala de laboratorio con floculante poliacrilamida en forma de gel, lograron altas velocidades de sedimentación, superiores a 2,1 m/h; a escala industrial el resultado no fue el esperado, no se consideró en el trabajo el diseño de los sedimentadores con bajo torque y seleccionaron un polímero de alto peso molecular que provocó incremento en el amperaje del motor del mecanismo y por otra parte, la evaluación a escala industrial, se desarrolló sin un sistema automático para la preparación y dosificación del floculante.

Lalande y Espinosa (1995), realizaron experimentaciones de 14 floculantes a escala de laboratorio con pulpa de la primera etapa de lixiviación, identificando el floculante Percol 338, como el mejor, por la alta velocidad de sedimentación y la compactación de la pulpa que alcanzó; se determinó para la primera etapa aplicar una dosis de 20 g/t, se evaluó a escala industrial, pero no fue efectivo por ser un floculante de alto peso molecular, ignoró en la selección del polímero el diseño del sedimentador con bajo torque en el mecanismo de accionamiento que provocó alto amperaje en el motor del mecanismo.

García-Peña (1997), determinó que para la pulpa de carbonato básico de níquel en la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, el floculante Magnafloc LT-30 fue el de mejor resultado, evaluó concentraciones de la solución del polímero de (0,5, 0,3 y 0,1) g/L y logró los mejores resultados con la menor concentración aplicada de 0,1 g/L con la dosis de 0,6 g/m³ de pulpa.

Beyris-Mazar (1997), consideró que el conocimiento sobre la sedimentación de la pulpa cruda es relativamente joven, al no existir resultado científico o investigativo, que de forma integral, resuelva incrementar el porcentaje de sólido del producto espesado en la tecnología de la lixiviación ácida por encima de un 48 % y define un

nuevo indicador, índice de sedimentación como relación metal ligero/metal pesado, para efectuar la homogenización de los minerales lateríticos, no alteró la ley del mineral y le permitió predecir el comportamiento de la sedimentación, teniendo en cuenta la relación existente entre los factores fundamentales que influyen como sistema en el proceso, logró porcentajes de sólidos superiores a 46,61 %.

Morales, Ganzó y Espinosa (2000), evaluaron 12 floculantes en la pulpa de la primera etapa de Lixiviación, magnetizada y sin magnetizar, el de mejor resultado fue el QUIMIFLOC N-30, floculante aniónico a base de poliacrilamida de alto peso molecular, con velocidad de sedimentación superior a 1,5 m/h, mayor densidad final de la pulpa y menor porcentaje de sólidos en suspensión; aplicó la Norma NRBI-579.

Landrau, Martín y Espinosa (2001), aplicaron 14 floculantes en pulpa magnetizada y sin magnetizar de la primera etapa de Lixiviación, de ellos el floculante AM10-THU alcanzó velocidad de sedimentación superior a la que se alcanzó con la muestra de pulpa en blanco, menor porcentaje de sólido en suspensión y mayor compactación de la pulpa. Se aplicó la Norma NRBI-579.

Turro Breff (2002), realiza un análisis de las características reológicas de los desechos lixiviados y lavado del proceso industrial CARON. Los análisis físico-químicos indicaron gran similitud en las composiciones químicas de las muestras tomadas en diferentes períodos, constituidas fundamentalmente por altos contenidos de maghemita. El estudio granulométrico demostró que en estas pulpas predominan volúmenes de partículas finas con tamaños inferiores a los 43 μ m. Determinó las características reológicas de las suspensiones en función de la concentración de sólidos, de la temperatura y del pH. Las curvas de flujo de las pulpas con concentraciones de 30 % y 35 % en peso de sólido exhiben un flujo pseudoplástico; mientras que las de mayores concentraciones pueden ajustarse al modelo reológico de los plásticos Bingham con un coeficiente de correlación medio de 0,99. Los cambios en la temperatura tienen poco efecto a bajas concentraciones y son más influyentes a las concentraciones más altas, debido a su mayor influencia sobre la estructura que forman las partículas sólidas. En cada muestra que

investigó, los valores máximos de viscosidad y del esfuerzo cortante inicial, a diferentes concentraciones, se obtuvieron a pH para los cuales se observó la mayor estructuración de las colas. A valores de pH menores o mayores al indicado, las viscosidades disminuyeron, lográndose una mayor estabilidad de las suspensiones. Estos resultados indicaron que las colas poseen propiedades superficiales típicas de los sistemas coloidales, debido al alto contenido de partículas finas presentes en las mismas.

Nicolini, D (2004), evaluó 13 floculantes en pulpa de la primera y tercera etapas de lixiviación y para la última etapa de lavado; el FA 920 SHR, AH 912, AN 905 SH, AN 910 SH, AN 913 SH, AN 923 SH, AN 934 SH, AN 945 SH, AN 113 SH, AN 118 SH, AN 125 SH y AN 132 SH, a concentración de 0,5 g/L. Determinó que el floculante AN910-SH fue el de mejor resultado, durante la evaluación a escala de laboratorio no aplicó la norma NRBI-579; la dosis y la velocidad de sedimentación referidas de 3,45 m/h, no se corresponden con la altura de descenso de la cama de sólido y el tiempo transcurrido que mostró en el informe, por otra parte, al aplicarlo a escala industrial, no consideró los cambios de mineral alimentado a la industria desde la evaluación que desarrolló a escala de Laboratorio, no logró confirmar los resultados del laboratorio reportados.

Alavés-Bolaños, M (2005), evaluó los floculantes QUIMIFLOC C-300, A-100, C-30HMW, C-13, C-11 y C-85 en pulpa de la primera etapa de lixiviación magnetizada y sin magnetizar, el mejor resultado para la pulpa sin magnetizar fue con el QUIMIFLOC C-30HMW con el que logró una velocidad de sedimentación de 1,39 m/h y para la pulpa magnetizada el QUIMIFLOC C-12 con una velocidad de 2,11 m/h; aplicó dosis desde 3,0 g/t hasta 8,0 g/t, logró buena clarificación y compactación de la pulpa en ambos casos, no evaluó los resultados a escala industrial.

García y Rojas (2006), en la Empresa “René Ramos Latourt”, de Nicaro, evaluó en pulpas de mineral reducido y de sulfuro de níquel, cinco floculantes, los CHEMADD A-41, 42 y 43 de la firma CHEMATEK con el IP-600 de la firma ZAR CIA y el Percol, versión canadiense del MAGNAFLOC R-155, alcanzando incrementos en las

velocidades de sedimentación y disminución de los sólidos en suspensión, pero no definió el de mejor resultado, pues todos se comportaron de forma similar.

Sam-Palanco (2007), evaluó a escala de miniplanta la sedimentación de la pulpa para la lixiviación ácida; en la planificación de los experimentos, elaboración y valoración de los resultados utilizó el software STATGRAPHICS, versión 5.1 y determinó la viscosidad de la pulpa con el Reómetro-Rheotest 2 de fabricación alemana. Estudió la influencia de las soluciones saturadas de los aditivos E-2 y E-3, el que fue disuelto en una solución ácida de pH igual a 1 y del floculante magnafloc 455, pero no logró incrementar las concentraciones de sólidos por encima de la muestra en blanco. No identificó en el informe que aditivo utilizó, ni evaluó la influencia de la variación de la concentración del aditivo, ni la del floculante en la sedimentación de la pulpa.

Chematek-S.p.A (2007), evaluó para pulpa de carbonato básico de níquel de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, quince floculantes, los ChemaDD (P-1014, A-013, A-015, A-28, A-5030, A-5031, A-5032, H-19, ZETAG-7205i, ZETAG-7264, A-1931) y los QUIMIFLOC N-30 y A-100; aplicó el método de Jarra, que consistió en la evaluación de varias muestras contenidas en Jarras, con agitadores, de velocidad variable, a las que se les aplicó simultáneamente el floculante, para su evaluación, el resultado que obtuvo lo comparó con el método de escaneado continuo TURBISCAN para evaluar la efectividad de los floculantes. Determinó que el método óptico fue válido y aplicable, el floculante que mejor favoreció el proceso de sedimentación fue el ChemADD A-28; para determinarlo solo consideró la velocidad de sedimentación y no la influencia de otras variables que determinan la eficacia del proceso.

Beyrís-Mazar & Falcón-Hernández (2007), determinaron mediante difracción de rayos-x (DRX) las fases mineralógicas existentes en la mena y con los ensayos de sedimentación se estudió el comportamiento de éstas en la pulpa laterítica. Concluyó que la composición mineralógica de la mena juega un papel importante en la sedimentación de la pulpa de minerales lateríticos, cuando en esta se presentaron como fases secundarias, la gibbsita, cuarzo, antigorita, que son de bajas densidades, se obtuvo una mala calidad de sedimentación, en tanto que la

presencia de fases minerales densas como la hematita, magnetita, maghemita, favoreció la sedimentación.

CEDINIQ (2009), evaluó en pulpa de la primera etapa de la UBP Lixiviación y Lavado los floculantes PICIZ-7010, A-5030, AN-910SH, A-100 y el AM-10THU, aplicó dosis de (50, 21, 9 y 6) g/t de sólido seco; aplicó el método de Coe y Clevenger, determinó que el mejor resultado fue con el floculante AM-10THU, alcanzó velocidad de sedimentación de 1,39 m/h. No se refirió a las condiciones en las que realizó la experimentación, tales como la densidad de la pulpa y la concentración del floculante que aplicó.

Jiménez-Ferrer (2012), reportó los resultados que obtuvo a escala industrial con el floculante PICIZ 7010 para la pulpa lixiviada y magnetizada de la primera etapa de Lixiviación en el sedimentador modernizado de alto torque, logró densidad relativamente baja para un sedimentador de alta capacidad de procesamiento, de 1,640 kg/L a 1,715 kg/L y los porcentajes de sólidos en suspensión en el licor de reboso fueron altos, de 160 mg/L a 200 mg/L.

Rivas-Romero (2012a), evaluó para la pulpa lixiviada y magnetizada a escala de laboratorio siete floculantes, AN-910SH, A-110HMW, A-100 HMW, A-115V, A-120V, N-100 y N-300; aplicó la Norma NRBI-579, determinó el de mejor resultado el N-300 pero a dosis de 9 g/t, con el que logró una velocidad de 1,27 m/h y un esfuerzo cortante de 10,76 Pa, no refiere a qué por ciento de sólido en la pulpa alcanzó esta determinación ni la concentración de la solución de floculante que aplicó.

Rivas-Romero (2012b), realizó nuevas evaluaciones con pulpa lixiviada con los floculantes AN-910SH, A-115V y el PICIZ 7010; encontró que el de mejor resultado fue el AN-910SH con dosis de 3 g/t a escala de Laboratorio pero no logró disminuir el porcentaje de los sólidos en suspensión a menos de 120 mg/L.

Ames y Lovera (2012), evaluaron la pulpa de las Plantas de Concentración de minerales por flotación, a escala piloto en un espesador piloto de cono profundo, a partir de las pruebas de laboratorio, determinó el tipo de floculante, concentración de sólidos en la alimentación y dosificación para maximizar el ratio de tratamiento ($t \cdot d / m^2$), que les permitiera lograr la máxima claridad del líquido y máxima densidades en la descarga con el mínimo de dosificación. Determinó que los

cambios en la distribución granulométrica, tipo de mineral y pH tienen un gran impacto; seleccionó como floculante óptimo el CL PHP40 PLUS, realizó el análisis granulométrico en mallas, encontrándose el mayor porcentaje pasante en la malla de 200 mesh. Concluyó que un espesador de cono profundo industrial, no debe descargar porcentajes de sólidos superiores a 84%, no es bombeable y recomendó filtrar para incrementar el porcentaje de sólidos hasta 92% como máximo; estos valores son excesivamente altos para la manipulación de pulpa.

Trejo-de Hita (2012), determinó la mejor combinación y la dosis óptima de reactivo que permitieron obtener un agua potable que cumplió con los criterios de turbiedad y color establecidos en la norma NOM-127-SSA1-1997. Evaluó los policloruros de aluminio HXDADMAC50, HXDADMAC20, HXCOLORHID, PAC, el sulfato de aluminio y los floculantes P-AMIN-AC1, P-DAD-MAC5, P-AMIN-BC7 y P-ACRIL-AN50. Las pruebas de jarras que desarrolló, empleando el software STATGRAPHICS, siguieron un diseño experimental factorial, evaluó los factores: turbiedad, dosis de coagulante y dosis de floculante. Obtuvo modelos matemáticos ajustados a los resultados, con los que determinó la dosis óptima de reactivo y los valores finales de las variables de respuesta. Desarrolló pruebas de jarras empleando un diseño experimental factorial con punto central; determinó la dosis óptima del mejor coagulante (HXDADMAC50) de 5 mg/L y la del mejor floculante (P-AMIN-AC1) de 0,29 mg/L.

Espinosa y Beyris 2016, evaluaron muestra de pulpa lixiviada y magnetizada a escala de Laboratorio los floculantes QUIMIFLOC N-30, PICIZ 7010 Y EL AN 910SH determinando que el floculante QUIMIFLOC N-30 fue el de mejor resultado, incrementó la densidad de la pulpa en un 5,9 %; mejoró la clarificación de los licores disminuyendo el contenido de sólidos en suspensión en el licor clarificado, hasta un 75 % del que se logró con los floculantes PICIZ 7010 y AN 910SH y logró una ligera disminución del área unitaria requerida.

Conclusiones del capítulo

- La sedimentación de la pulpa con la aplicación de floculantes ha sido evaluada a escala de laboratorio e industrial con diferentes tipos de floculantes, a

diferentes dosis y por lo general a concentraciones de 1,0 g/L y 0,5 g/L, para la pulpa lixiviada de los minerales con altos contenidos de elementos nocivos para el proceso, MgO y SiO₂, sin embargo no se conoce el comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada de los minerales del yacimiento Camarioca Este con el floculante ZUKERFLOC N-30M, que garantice velocidades de sedimentación adecuadas y sin incrementos del esfuerzo cortante de la pulpa que incrementan los amperajes del mecanismo de accionamiento del sedimentador.

- No se tiene precedente del desarrollado de otras evaluaciones de pulpa lixiviada y magnetizada con floculante a escala piloto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el diseño de los experimentos, se determinaron las variables a evaluar y la metodología para la toma y preparación de las muestras, análisis químicos y determinaciones de variables requeridas, la aplicación de la norma para la determinación de las velocidades de sedimentación. Los objetivos específicos de este capítulo son:

1. Exponer de forma general la planificación de la investigación;
2. Caracterizar los principales equipos, medios de medición y materiales que fueron utilizados, durante el desarrollo del trabajo;
3. Exponer las principales técnicas y procedimientos que fueron utilizados durante el trabajo experimental.

2.1 Diseño de la experimentación.

La prueba experimental se realizó a escala de laboratorio y de Planta Piloto para los minerales del yacimiento Camarioca Este.

Para garantizar la representatividad del material analizado a escala de laboratorio, la muestra de pulpa lixiviada y magnetizada se tomó en la planta piloto durante la evaluación al mineral del yacimiento Camarioca Este. Se aplicó la norma NRBI-579: "Pruebas de sedimentación" que utiliza el método de Talmage y Fitch.

A escala piloto se tomaron muestras de pulpa sin magnetizar y magnetizada, las cuales fueron floculadas con las dosis y las concentraciones determinadas a escala de laboratorio. A cada una de las muestras se le determinó la velocidad de sedimentación.

Para la planificación de los experimentos, la elaboración y valoración de los resultados, se utilizó el software STATGRAPHICS, versión 15.2.14 (2007). En la

investigación experimental, a escala de laboratorio se analizó la influencia en la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada de los factores siguientes:

- Dosis de floculante, en g de floculante/t de sólidos X1
- Concentración de la solución, en g/L X2.

En las variables de salida:

- Velocidad de sedimentación, en m/h Y1
- Esfuerzo cortante de la pulpa, en Pa Y2
- Viscosidad de la pulpa, en Pa*s Y3
- Sólidos en suspensión, mg/L Y4.

Se utilizó un diseño factorial multinivel con las bases siguientes:

- Número de factores experimentales: 2
- Número de bloques: 3
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 27, incluyendo 1 punto central por bloque
- Grados de libertad para el error: 19.

Los niveles de las variables de entradas se establecieron fundamentados en los trabajos de Morales, Ganzó y Espinosa (2000), Rivas (2012a) y (2012b), los que aplicó a escala industrial Jiménez (2012). En la tabla 1 se presentan los niveles de experimentación.

Tabla 1. Niveles de experimentación.

<i>Factores</i>	<i>Bajo</i>	<i>Medio</i>	<i>Alto</i>	<i>Niveles</i>	<i>Unidades</i>
Dosis floculante	2,0	4,0	6,0	3	g/t
Concentración floculante	0,2	0,4	0,6	3	g/L

El diseño factorial multinivel, está compuesto por 27 experimentos y se desarrolló en tres bloques. El orden de los experimentos fue aleatorio para la protección contra el efecto de variables ocultas.

En la tabla 2 se muestra la planificación de los experimentos. Determinando la velocidad de sedimentación, el esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa y los sólidos en suspensión se obtuvo la correlación de los parámetros tecnológicos escogidos en la sedimentación de la pulpa lixiviada.

Tabla 2. Planificación de los experimentos:

Experimento	Bloque	Dosis de floculante	Concentración de floculante
		g/t	g/L
1	1	2	0.6
2	1	6	0.6
3	1	2	0.2
4	1	4	0.4
5	1	4	0.2
6	1	6	0.2
7	1	6	0.4
8	1	4	0.6
9	1	2	0.4
10	2	2	0.2
11	2	2	0.6
12	2	6	0.6
13	2	4	0.6
14	2	4	0.2
15	2	6	0.2
16	2	6	0.4
17	2	4	0.4
18	2	2	0.4
19	3	6	0.4
20	3	4	0.6
21	3	6	0.6
22	3	2	0.2
23	3	2	0.6
24	3	4	0.2
25	3	6	0.2
26	3	2	0.4
27	3	4	0.4

2.2 Materiales utilizados y sus características

Pulpa de mineral reducido de la primera etapa de lixiviación: mezcla formada por licor y mineral reducido lixiviado en la primera etapa de lixiviación, magnetizada y con las densidades de 1,13 kg/L a 1,14 kg/L; las características de esta pulpa se muestra en la tabla 3:

Tabla 3. Características de la pulpa lixiviada:

Elementos	UM	Solución carbonato amoniacal	Elementos	UM	Mineral reducido
NH ₃	g/L	75,00	Ni	%	0,33
CO ₂		55,00	Co		0,05
Ni		10,50	Fe		42,00
Co		0,35	Densidad	t/m ³	4,17
MgO		0,05	Tamaño	<200 mesh	85,00
S		3,80	(%)	>100 mesh	7,00
Densidad		t/m ³	1,025		
Temperatura	°C	ambiente			
pH	-	8 a 9			

2.3 Floculante ZUKERFLOC N-30M

El floculante en fase sólida es un polvo de color blanco de fácil disolución en agua. En forma de solución, adquiere características gelatinosas, tiene carácter higroscópico. Estas moléculas pueden adsorberse en las secciones activas de varias partículas sólidas, enlazándola en flóculos lo que provoca un incremento considerable de la velocidad de sedimentación.

Para la investigación se utilizó el floculante ZUKERFLOC N-30M, que:

- A escala de laboratorio se prepararon las soluciones a la concentración especificada en la tabla 1.
- A escala piloto se preparó la solución a una concentración de 0,2 g/L.

Morales, Ganzó y Espinosa (2000), evaluaron a escala de laboratorio el comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada y determinaron como el mejor floculante el QUIMIFLOC N-30M a una dosis de 6,0 g/t y concentración de 1,0 g/L; Jiménez-Ferrer (2012), evaluó a escala industrial el floculante PICIZ 7010 para estas pulpas en el sedimentador modernizado de alta capacidad de procesamiento, logró densidad relativamente baja y los porcentajes de sólidos en suspensión en el licor fueron altos, de 160 mg/L a 200 mg/L.

Espinosa y Beyris (2016), determinaron a escala de Laboratorio que el mejor floculante para este proceso fue el QUIMIFLOC N-30, equivalente al actual

ZUKERFLOC N-30M, con una dosis de 6 g/t incrementó la densidad de la pulpa, mejoró la clarificación de los licores disminuyendo los sólidos en suspensión hasta 60 mg/L pero no se ha probado a escala piloto, ni industrial para el yacimiento Camarioca Este; teniendo en cuenta que estas menas pueden cambiar sus propiedades Turro (2002), Chang, Rojas y Arce (2004); Chang, Toirac y Arce (2006), resulta necesario su estudio a escala piloto e industrial.

Para la operación del sedimentador modernizado, SD-109A, luego de una reparación capital, la planta licitó en el mercado un producto con las siguientes especificaciones:

- Estado de agregación: sólido
- Aspecto: polvo
- Color: blanco
- Solubilidad en agua: máximo 3 g/L
- Carácter iónico: aniónico
- Peso molecular: alto
- pH de la solución a 1,0 % a 25 °C: de 6 a 8.

De los floculantes ofertados y evaluado técnicamente se seleccionó y se compró el ZUKERFLOC N-30M y en esta investigación se evaluó el comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada del mineral del yacimiento Camarioca Este, aplicando este polímero.

2.4 Metodología de la investigación

El trabajo se desarrolló a escala de laboratorio y de planta piloto, el análisis de los resultados obtenidos en el Laboratorio se empleó para establecer las variables que se evaluaron en la planta piloto, la dosis de floculante y la concentración de la solución. En la Planta Piloto la evaluación se desarrolló en dos etapas, en una se evaluó el mineral sin la aplicación de floculantes en lixiviación y en la otra etapa evaluativa se le aplicó floculante en esta etapa del proceso, con dos niveles de dosificación, una con dosis de 4,0 g/t y la otra de 6 g/t.

Para la evaluación a escala de laboratorio se aplicó el proceder siguiente:

- a) La muestra de la pulpa lixiviada magnetizada se tomó en la descarga del electroimán de la primera etapa de la Planta de Lixiviación de la Planta Piloto del CEDINIQ y se evaluó a temperatura ambiente y homogenizadas.
- b) Se preparó la solución de floculante a concentraciones y dosis referidas en la tabla 1, en el mismo orden determinado en el software STATGRAPHICS, tabla 2, para evaluar el comportamiento de la sedimentación en cada una de las dosis de floculante, con las variaciones en la concentración de la solución.
- c) Se realizaron tres bloques, para cada dosis se realizaron tres réplicas, se tomó la lectura final de la altura del sólido al cabo de los 120 minutos, a cada uno de los bloques, se evaluó una muestra en blanco para compararla con aquellas a las que se les aplicó floculante, a cada experimento se le tomó muestra de licor y se le determinó el porcentaje de sólidos en suspensión. El licor clarificado se extrajo de la probeta, utilizando una manguera por sifón hasta la superficie del sólido sedimentado en el fondo de la probeta, la muestra sólida se envasó codificada y se le determinó el esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa.
- d) Para la realización de los experimentos se aplicó la Norma NRBI-579. La muestra de pulpa se agitó con un agitador de velocidad variable, para evitar la segregación e inmediatamente se vertió en cada una de las probetas graduadas de 1000 mL, previamente se taró e identificó, se pesó y se calcularon la densidad de la pulpa, el % de sólido en la muestra y el volumen de la solución de floculante acorde a la dosis y concentración que se estableció en el diseño del experimento.
- e) Con el bastón se agitó la muestra dentro de la probeta con diez movimientos de ascenso y descenso, se le inyectó la solución de floculante y seguidamente se agitó la pulpa de forma similar que al inicio, hasta lograr la mezcla del floculante con la pulpa, cuando concluyó la agitación se extrajo el bastón, se puso en funcionamiento el cronómetro y se leyó la altura de la línea de demarcación del sólido y el líquido, en su descenso en el transcurso del tiempo, lo que permitió evaluar el comportamiento de la sedimentación.

- f) Se empleó el EXCEL, se trazó un gráfico de coordenada cartesiana, los valores de altura (Ht) Vs tiempo (t); el gráfico se copió en una hoja del software de dibujo Visio 2010 y se determinó el tiempo unitario y la altura unitaria, este método permitió mayor precisión en los trazados.

Para los experimentos a escala piloto:

- a) Se tomó la muestra de pulpa sin magnetizar en la línea antes de la entrada al electroimán en un pomo de un litro de capacidad y la otra en la línea de descarga de este equipo al sedimentador, posterior a la inyección de la solución de floculante.
- b) Las muestras se vertieron en probetas graduadas de 1000 mL, taradas, se pesaron, les determinaron la densidad de la pulpa, la agitaron con la ayuda de un bastón, se puso en funcionamiento el cronómetro y con una linterna se tomaron las lecturas del descenso de la cama de sólidos en el tiempo para el cálculo de la velocidad de sedimentación.

2.5 Equipos y técnicas de análisis químicos utilizadas

a) Aparatos y utensilios:



Figura 1: Probeta de 1000 mL, balanza analítica y probeta de 2000 mL.

Se emplearon para el desarrollo de los experimentos probetas graduadas de 1000 mL y 2000 mL de capacidad, bastón metálico con cilindro de goma, balanza digital con precisión de 0,1 g, de 3000 g de capacidad, balanza analítica, vidrio reloj, espátulas, floculantes en estado sólidos, agitador vibratorio; pomos plásticos de 250 mL y 500 mL, cronómetro, jeringuillas de 1,0 mL y 2,5 mL de

capacidad, linterna. La figura 1, muestra ejemplos de utensilios y aparatos empleados en la experimentación.

b) Reómetro:

Para la determinación del esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa en esta investigación se empleó el Reómetro, Viscosímetro Rotacional, marca Rheotest 2, de fabricación alemana, se observa junto a los vasos en la figura 2.

Se selecciona el cilindro o rotor y el vaso, el cilindro se conecta y se alimenta la pulpa al vaso con la concentración de sólido determinada, el que se ubica en su posición. Posteriormente se conecta el reómetro y se comienza a tomar la lectura de los valores de α para cada velocidad del rotor. Estos datos son procesados en una hoja de cálculo en EXCEL en la que se obtienen los valores de viscosidad plástica (η_p) y el valor del esfuerzo cortante (τ (Pa)).



Figura 2: Viscosímetro Rheotest 2 con rotor y los vasos

c) Tanque de Contacto TT-1:

Su función es favorecer la mezcla del mineral reducido con el licor para formar la pulpa a lixiviar, ver figura 3:

- Dimensiones: diámetro 0,7 m; altura 0,4 m.

- Altura de descarga: 0,16 m
- Volumen: 0.06 m³.



Figura 3: Tanque de Contacto y la bomba centrífuga

MECANISMO AGITADOR DE CONTACTO MG-1

- Tipo de agitador: Turbina axial
- Construcción: Acero 316
- Características del motor: 440 V; 1,7; 1425 RPM; 0.24 kW.

d) Turboaeradores TT-4, 5, 6 y 7:

En el turboaerador se desarrolla la lixiviación del mineral con la ayuda de agitación y el suministro de aire. Para la agitación vigorosa de la suspensión se utilizan los llamados deflectores (baffles) que son listones verticales colocados radialmente en todo el diámetro del tanque. Poseen 4 deflectores que son los que se requieren para estos casos, cuyo ancho es 0,1 a 0,08 del diámetro del tanque y colocados a la mitad de su ancho a partir de la pared, para evitar la acumulación de sólidos en él y la pared, ver figura 4:

- Dimensiones: diámetro 1,14 m y altura 1,56 m
- Altura de descarga: 1.1 m
- Volumen, 1 m³.

MECANISMOS AGITADORES DE LOS TURBOAERADORES

- Tipo de agitador, Turbina radial (poseen doble polea para garantizar las máximas y mínimas rpm)

- Construcción: Acero 316
- Características del motor: 440 V, 7 A, 1740 rpm, 3.75 kW.
- Velocidad de agitación: mínima 140 rpm; máxima 240 rpm.



• Figura 4: Turboaerador TT-7

e) Punto de muestreo de la pulpa sin magnetizar:



Figura 5: Punto de muestreo de la pulpa sin magnetizar

Está ubicado a la descarga del Turboaerador permitió la toma de la muestra de pulpa sin magnetizar, para la determinación de la velocidad de sedimentación, ver figura 5:

f) Electroimán SJ-1:

Tiene como función favorecer la floculación de las partículas magnéticas y con ello, la velocidad de sedimentación y está diseñado con campos cargados eléctricamente, al pasar el flujo de pulpa a través de ellos, las partículas magnéticas se cargan, ver figura 6.



Figura 6: Electroimán SJ-1, primera etapa de Lixiviación.

- Intensidad de campo, de 0 a 5000 Gauss.
- Voltaje 440 V.

g) Tanque de preparación y dosificación de floculante:

Se emplea para la preparación, envejecimiento y dosificación de la solución de floculante con una concentración de 0,2 g/L, figura 7:



Figura 7: Tanque para la preparación y dosificación de floculante.

- Diámetro interior: 580 mm;
- Altura: 650 mm;
- Volumen útil a emplear: 148 L.

h) Agitador para la preparación de la solución de floculante:

Permite la preparación homogénea y sin formación de grumos de la solución de floculante a inyectar a la pulpa dosificando los granos del polvo en medio de la corriente circular provocada por la agitación, cada uno de las partículas se humecta y se disuelve con facilidad, figura 8:



Figura 8: Agitador y mecanismo de agitación para la preparación del floculante.

- Tipo: agitador de paleta:
- Motor:
 - Tipo: AF 71/2A-11
 - 440 V/230 V, 0,37 kW, 0,86/1,50 A, 60 Hz, 3425 rpm.
- Reductor.
 - Tipo: RW 4D SD
 - P1: 490 W, P2: 370 W, 0...1580 rpm, IKA-WERKE

i) Bomba dosificadora de la solución de floculante:

Dosifica la solución de floculante a la dosis establecida para su evaluación, figura 9:



Figura 9: Bomba dosificadora.

- Modelo: 7019-21.
- 5 A, 115 VAC, 50/60 Hz
- Cole-Parmer®Instrument Company.
- Mfg. By Barnant Company. Barrington, IL 60010 USA.

j) Punto de dosificación de la solución de floculante:

En la línea de salida de la pulpa del electroimán, JS-1, se interconectó la dosificación de la solución de floculante considerando la distancia y trazado de la tubería hasta la descarga al sedimentador que garantizará un correcto mezclado para la acción de floculación de la pulpa. Figura 10:



Figura 10: Punto de dosificación de la solución de floculante.

k) Sedimentador TT-16:

En este equipo se logra la separación de las fases líquido-sólido. La alimentación llega por el depósito central alimentador y es introducido a 1 m por debajo de la superficie libre del líquido, de forma que provoque la mínima agitación. La suspensión original fluye hacia abajo y luego cambia de dirección, tomando la radial, desde el centro hacia arriba al rebosadero. Los sólidos tienden a sedimentar y se comprimen en la parte inferior en el que son trasladados por el rastrillo hacia el centro, donde está el orificio de descarga, ver figura 11.

- Dimensiones: diámetro 4,5 m; altura 3,0 m.
- Volumen: 58,9 m³.
- Construcción: acero regular con rastrillos resistentes a la abrasión.
- Diseño: 2,09 m³/h a 2,65 m³/h.
- Rebosa 1,49 m³/h a 2,3 m³/h



Figura 11: Sedimentador TT-16, primera etapa de Lixiviación

MECANISMO AGITADOR DEL SEDIMENTADOR:

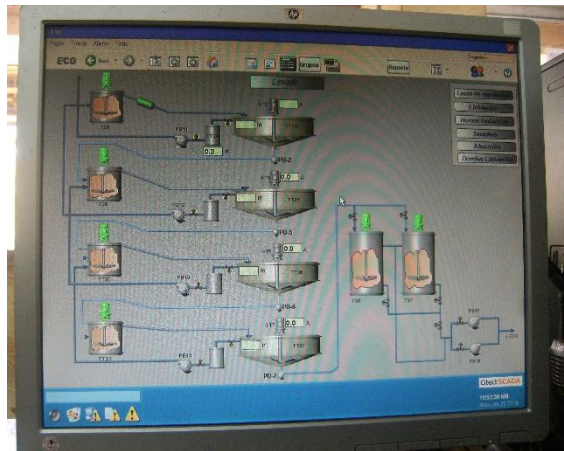
La unidad de reducción principal está protegida de la sobrecarga, elevando los rastrillos y en el caso que esto no sea suficiente desconecta el accionamiento y detiene la unidad principal, para esto tiene tres regímenes: manual, semi y automático:

- Rotación: a favor de las manecillas del reloj
- Velocidad de rotación, 0,326 rpm
- Motor, 440 V, 1.08 A, 0.5 KW, 1800 rpm.

I) Control operacional:

Figura 12: Software para el control operacional CITECT V7.

Para el control de las operaciones se dispone del software CITECT V7, en el que quedan registradas las variables requeridas para el control y seguimiento de las operaciones de la Planta, ver figura 12:

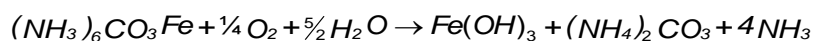
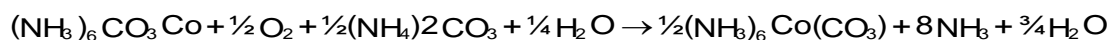
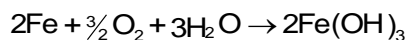


2.6 Descripción del flujo tecnológico a escala piloto

Una vez realizada la mezcla del mineral reducido en el horno de reducción con el licor de contacto en el TT-1, la pulpa formada es bombeada por la bomba centrífuga horizontal (PB-1 ó PB-2, capacidad 10 m³/h), hacia la primera serie de turboaeradores compuesta por 4 unidades (TT-4, 5, 6, 7, capacidad 1,05 m³/h), pasando de un turboaerador a otro por gravedad, donde ocurre la lixiviación con ayuda de agitación de los mecanismos agitadores, MA 1, 2, 3 y 4 y el suministro de aire a razón 33 m³/t de mineral, requerido para las reacciones de oxidación del Ni y el Co, además cierta cantidad de Fe.

El esquema del flujo tecnológico se muestra en el anexo 1.

Las reacciones químicas fundamentales que ocurren en los turboaeradores son:



La pulpa lixiviada en los turboaeradores de la primera etapa pasa por el electroimán SJ-1, donde ocurre la floculación del Fe, pasando al sedimentador de primera etapa (TT-16, rebosa 4,31 m³/h, volumen 84,8 m³/h) en el cual, con ayuda del mecanismo agitador (GT-1/1 y 1/2, capacidad 5,12 m³/h) ocurre la separación líquido-sólido, obteniéndose el licor producto rico en Ni y Co. Posterior a la magnetización en el electroimán se le inyecta una solución de floculante ZUKERFLOC N-30M a una concentración de 0,2 g/L y dosis de 4,0 g/t hasta 6,0 g/t de mineral reducido para evaluar su efecto en la clarificación, compactación y torque del mecanismo de agitación.

El licor producto sale por la canal de reboso y cae por gravedad al tanque (TT-11, capacidad 4,7 m³), donde es bombeado por la bomba centrífuga horizontal (PB-16, capacidad 3,92 m³/h), una parte va hacia el tanque de almacenaje de licor producto, de la primera etapa de lixiviación (TS-2, capacidad 9,4 m³) y la otra parte se utiliza para el completamiento del flujo de licor, a tanques de contacto, para mantener la relación líquido-sólido en el valor planificado, este licor de completamiento pasa por un enfriador de licor (HN-1, capacidad 9,5 m³/h de licor).

El licor producto es bombeado del sistema por la bomba centrífuga vertical (PB-5, capacidad 1.45 m³/h), que puede utilizarse para diluir las colas que se bombean, para la Empresa Ernesto Che Guevara; para preparar soluciones y para el desarrollo de pruebas de destilación u otros usos investigativos.

La pulpa que se sedimenta en el sedimentador TT-16, con una densidad de 1,70 kg/L a 1,75 kg/L, es bombeada por la bomba ODS (PD-1, capacidad 1,56 m³/h), para la

segunda serie de turboaeradores (TT-12, 13 y 14, capacidad 1,05 m³), donde se mezcla con el licor de reboso de la tercera etapa de Lixiviación, provistos de mecanismos agitadores MA-5, 6 y 7 y el suministro de aire se realiza la segunda etapa de la lixiviación del mineral y como ocurre en la primera etapa, la pulpa pasa por un sistema de magnetización en el electroimán SJ-2 y luego al sedimentador de la segunda etapa (TT-23, capacidad 1,6 m³/h, rebosa 2,3 m³/h, volumen 58,9 m³), donde ocurre la separación de las fases líquida y sólida, el licor rebosa al tanque (TT-17, capacidad volumen 9,4 m³) y de aquí a la bombas centrifugas horizontales (PB-6 y 7, capacidad 2,36 m³/h), se encargan de bombearlo a tanques de contacto completamente. En caso dado este sedimentador puede rebosar directamente al tanque TS-2 para adicionar cualquier tipo de licor preparado artificialmente para contacto. En éste existe el mecanismo agitador (GT- 3/1 y 3/2, capacidad 2,65 m³/h). La pulpa sedimentada en la segunda etapa es bombeada por la bomba de diafragma ODS (PD-3, capacidad 1,56 m³/h), para la tercera serie de turboaeradores (TT-19, 20 y 21, capacidad 1,05 m³), donde se mezcla con licor de reboso de la primera etapa de lavado, aquí con agitación, mecanismo agitadores MA-8,9,10 y el suministro de aire se produce la tercera etapa de la lixiviación del mineral y como ocurre en la primera y segunda etapa, la pulpa pasa por un sistema de magnetización en el Electroimán SJ-3 y luego al sedimentador de la tercera etapa (TT-27, capacidad 1,6 m³/h, rebosa 2,3 m³/h, volumen 58,9 m³) donde ocurre la separación de la fase sólida de la líquida, con ayuda del mecanismo agitador (GT-4/1 y 4/2, capacidad 2,65 m³/h). El licor que rebosa al tanque (TT-24, capacidad 0,05 m³) y es bombeado a los turbos de la segunda serie por la bomba centrifuga horizontal (PB-9, capacidad 2,3 m³/h) para la dilución de la pulpa a los turbos y mantener la densidad y con ello garantizar la continuidad del proceso de extracción de Ni.

Los gases amoniacales que se desprenden de los turboaeradores debido a la agitación y aeración de la pulpa son succionados por el ventilador centrífugo (PF-8, capacidad 3200 m³/h) a través de los colectores y enviados al sistema de absorción de amoniaco.

La pulpa sedimentada de la tercera etapa de lixiviación se bombea con la bomba de diafragma ODS (PD-4, capacidad 1,56 m³/h) para el circuito de lavado, compuesto por

4 etapas y tiene como objetivo lavar la pulpa para recuperar el Ni disuelto. Primeramente pasa por el electroimán (SJ-4) y luego al tanque de repulpeo (TT-25, capacidad 0,098 m³) donde se favorece la homogeneización de la mezcla de la pulpa de la etapa anterior TT-27 con el licor de la etapa posterior TT-35 ayudándolo el mecanismo agitador (MG-3)

Finalmente la pulpa empobrecida, o sea la cola, se bombea a los tanques de recepción de cola (TS-6 y 7, capacidad 14,7 m³) donde el sólido se mantiene en suspensión con ayuda de los mecanismos MG-9 y 10, colocados respectivamente en cada tanque, para ser diluida con licor y luego bombeado hacia las canales de los tanques de contacto de la Empresa “Ernesto Che Guevara”; por las bombas centrifugas horizontales (PB-17 y 18, capacidad 14 m³/h) y favorecer la recuperación de algunas cantidades de Ni u otro elemento ventajoso.

El proceso de lixiviación y lavado se efectúa a contra corriente, el licor se alimenta por lavado y se va enriqueciendo hasta llegar a la primera etapa de lixiviación y extraído como licor producto, mientras que la pulpa se alimenta por la primera etapa de lixiviación que va empobreciendo y sale como cola por la última etapa de lavado.

Conclusiones del capítulo 2

- El diseño de la investigación garantiza adecuadamente el tratamiento del problema planteado y fue concebido sobre la base de evaluar a escala de Laboratorio y Piloto el comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada bajo la acción del floculante ZUKERFLOC N-30M. Se utilizó un diseño Factorial Multinivel, empleando el software STATGRAPHICS, versión 15.2.14 (2007).
- La selección y procesamiento del material de trabajo, durante los experimentos, se desarrolló con la aplicación de la Norma NRBI-579: Pruebas de Sedimentación, que utiliza el método de Talmage y Fitch y el método comparativo para la evaluación de los resultados obtenidos a escala de Laboratorio y Piloto
- La selección de los principales equipos, medios de medición y materiales, así como, el empleo de técnica experimental y equipamiento utilizado a escala

industrial, garantizó la calidad y validación de los resultados para su aplicación industrial.

- El floculante que se seleccionó fue el ZUKERFLOC N-30M que tiene carácter aniónico a base de poliacrilamida de alto peso molecular.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para evaluar el comportamiento en la sedimentación de la pulpa lixiviada la influencia de las variables: Dosis de Floculante y Concentración de la solución, obteniéndose una base de datos que sirvió para la interpretación de los resultados. Para el análisis de los resultados experimentales a escala de laboratorio se utilizó el software de análisis estadístico de datos STATGRAPHIC Centurion XV, versión 15.2.14 (2007).

La evaluación de la sedimentación se basa en el comportamiento del descenso de las partículas sólidas floculadas con una solución de floculante en el medio acuoso, en el transcurso del tiempo, tomando las lecturas de descenso de la interfase sólido-líquido, asumiendo como resultados favorables un incremento de la velocidad de sedimentación comparada con la muestra en blanco, mayor clarificación del licor, adecuada compactación sin incrementos notables en el esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa sedimentada.

3.1 Análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos a escala de Laboratorio.

3.1.1 Efecto de la concentración de la solución y dosis de floculante en la velocidad de sedimentación.

Se emplearon las herramientas disponibles para el análisis de los resultados como fue el diagrama de Pareto, las variables evaluadas tuvieron un efecto positivo sobre la velocidad de sedimentación, excepto la combinación AA y AB; la concentración de la solución fue significativa para la velocidad de sedimentación, supera el efecto estandarizado; no fue así, para la dosis de floculante que no lo superó, según se muestra en la figura 13.

Diagrama de Pareto Estandarizada para Veloc Sed

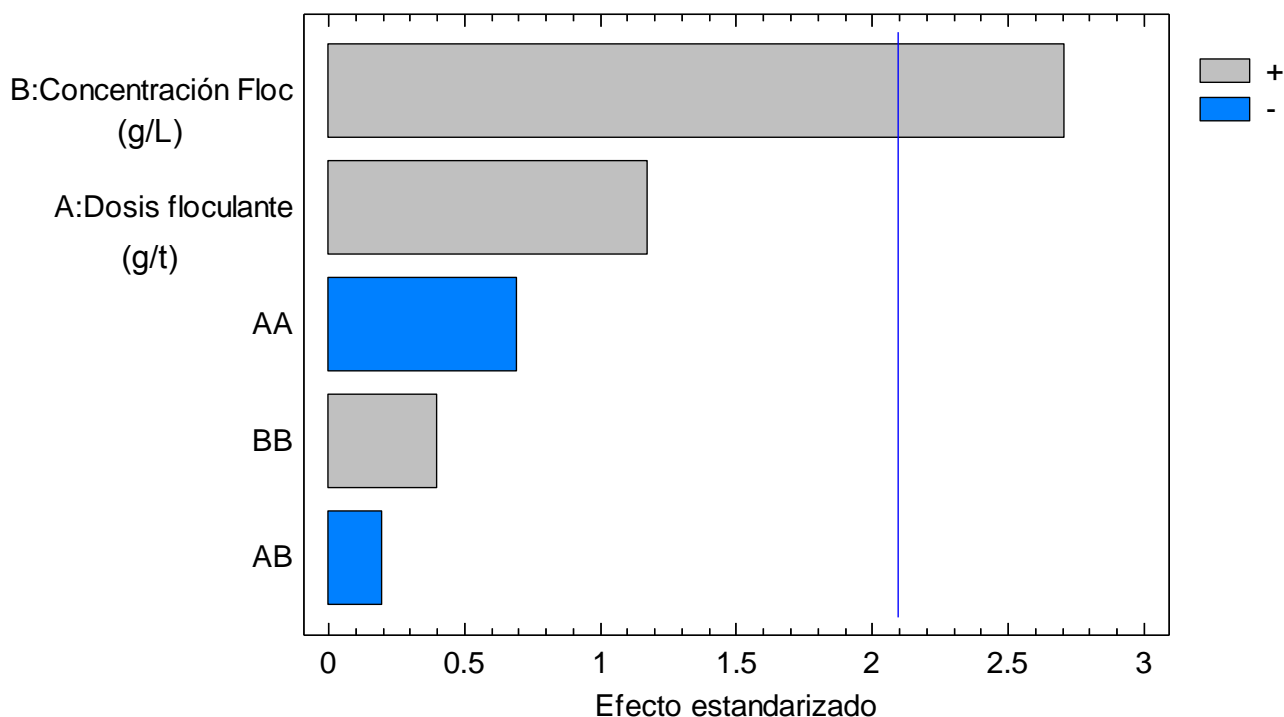


Figura 13: Diagrama de Pareto Estandarizado para la velocidad de sedimentación

3.1.2 Efecto de la concentración de la solución y la dosis de floculante en el esfuerzo cortante y en la viscosidad de la pulpa

Diagrama de Pareto Estandarizada para Esfuerzo cortante

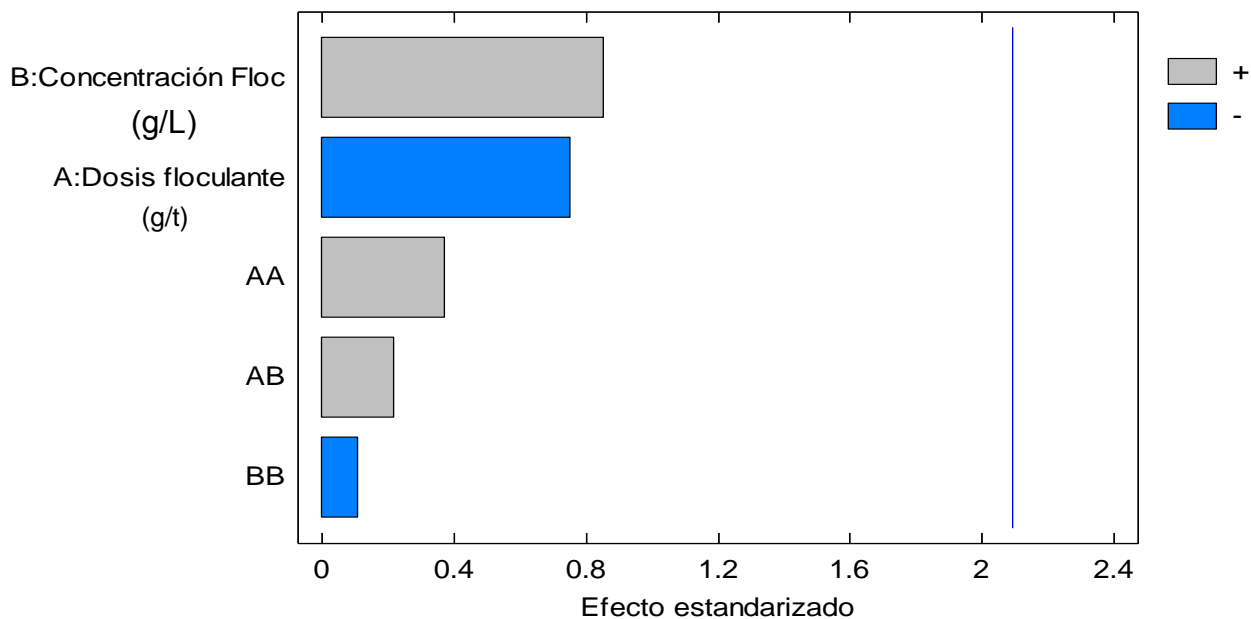


Figura 14: Diagrama de Pareto Estandarizado para el esfuerzo cortante de la pulpa

En la figura 14 en el diagrama de Pareto para el esfuerzo cortante la concentración del floculante y la interacción de AA y AB tuvieron un efecto positivo; la dosis de floculante y la interacción de BB fueron con efecto negativo. Las dos variables no superaron el efecto estandarizado, por lo que son no significativas para el esfuerzo cortante; similar comportamiento se observó para la viscosidad de la pulpa.

La superficie de respuesta para el esfuerzo cortante, figura 15, no se tiene seguridad de que la sedimentación tenga este comportamiento dado a que las variables: Concentración de la Solución y Dosis de Floculantes no fueron variables significativas, según los resultados del diagrama de Pareto. Similar efecto se observó en la respuesta para la viscosidad de la pulpa.

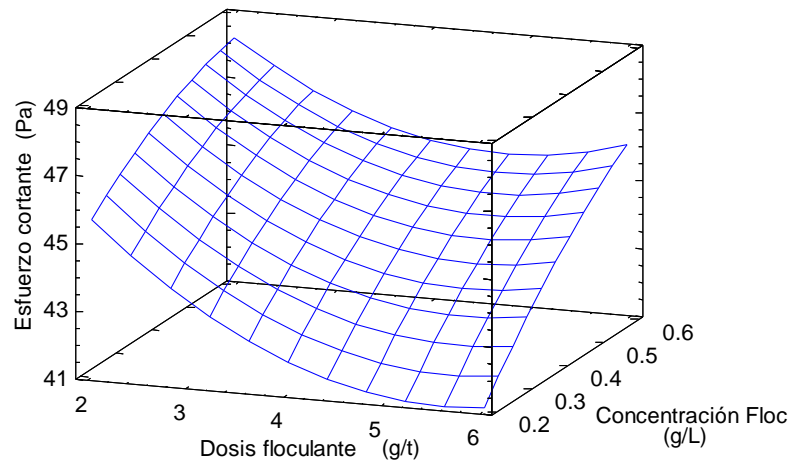


Figura 15: Superficie de respuesta para el Esfuerzo Cortante.

Sam (2007), determinó que con el incremento de la floculación de la pulpa con uno de los aditivos, los valores de viscosidad fueron también altos, mientras que con el otro aditivo ocurrió un efecto contrario; no hizo referencia al tipo de aditivo ni los evaluó a diferentes concentraciones.

Según se establece en la figura 15, un incremento en la dosis de floculante y una disminución de la concentración conducen a una disminución del esfuerzo cortante y con relación a la dosis surge un efecto contrario al comprobado por Sam, (2007); en esta investigación que se evaluó la aplicación del floculante ZUKERFLOC N-30M para los minerales del yacimiento Camarioca Este se introdujo como novedad que se desarrolló con diferentes concentraciones de la solución de floculante, lo que solo ha sido referido por García (1997), que logró los mejores resultados a bajas

concentraciones, 0,1 g/L, pero el estudio fue realizado para la pulpa de carbonato básico de níquel y no para la pulpa lixiviada.

3.1.3 Esfuerzo cortante y viscosidad de la solución de floculante a diferentes concentraciones

Para evaluar el esfuerzo cortante y la viscosidad de la solución de floculante se prepararon soluciones a diferentes concentraciones, se determinaron estas características en el Reómetro, siendo menores para las concentraciones más bajas, como se observa en la figura 16.

A partir de este experimento y tomando en consideración que las variables: Dosis de Floculantes y Concentración de la solución, en la evaluación en el Laboratorio no fueron significativas, se seleccionó para la evaluación piloto aplicando la concentración de 0,2 g/L y las dosis de 4,0 g/t y 6,0 g/t.

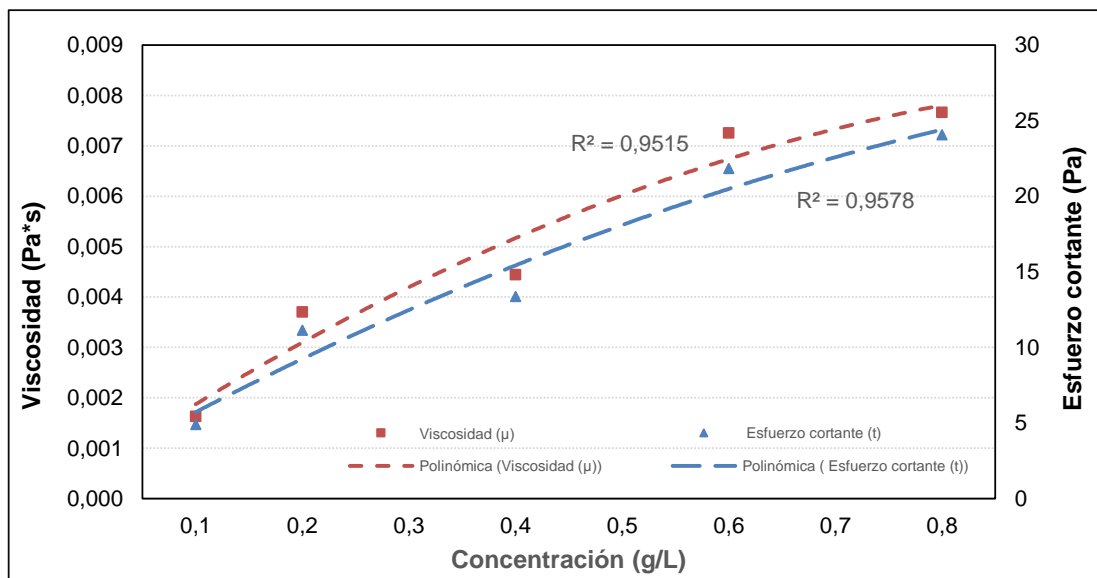


Figura 16: Viscosidad y esfuerzo cortante de la solución del floculante ZUKERFLOC N-30M.

3.2 Evaluación a escala Piloto.

Se procesó a escala piloto una muestra tecnológica conformada con los minerales del yacimiento Camarioca Este, mezclados en las proporciones de mayor probabilidad que se encuentran en el mismo y que pueden ser alimentados al proceso metalúrgico.

Se evaluó su comportamiento en el transcurso de la reducción química y la lixiviación, considerando la influencia del perfil térmico del horno en las extracciones

de níquel y cobalto; así como, de las posibles incidencias en la velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa antes y después de la floculación magnética en la primera etapa de lixiviación.

3.2.1 Análisis comparativo de los resultados analíticos durante la etapa con y sin aplicar floculante.

Se hace referencia a los resultados obtenidos en ambas etapas para evaluar el comportamiento de las variables evaluadas y su relación con la sedimentación. La composición química del mineral reducido se muestra en la tabla 4-A para la primera etapa evaluativa y la tabla 4-B corresponde a la etapa en la que se aplicó el floculante:

Tabla 4-A. Composición química del mineral reducido y metalización del Fe en que no se aplicó floculante en Lixiviación.

Estadígrafo	Composición química del mineral reducido (%)							FM	Metaliz. Fe (%)
	Ni	Co	Fe	FeO	Ni°	Fe°	Fe ²⁺		
Promedio	1,37	0,103	46,58	18,71	1,01	4,31	23,12	46,82	9,25
Máximo	1,49	0,123	48,77	27,79	1,23	4,92	27,84	54,6	10,61
Mínimo	1,32	0,096	42,12	12,01	0,83	3,41	18,67	37,8	7,18
Desv Est	0,03	0,008	1,51	4,92	0,10	0,37	2,85	4,48	0,78

Tabla 4-B. Composición química del mineral reducido y metalización del Fe en la que se aplicó floculante en Lixiviación:

Estadígrafo	Composición química del mineral reducido (%)							FM	Metaliz. Fe (%)
	Ni	Co	Fe	FeO	Ni°	Fe°	Fe ²⁺		
Promedio	1,37	0,110	46,65	17,96	0,74	2,18	25,15	25,10	5,05
Máximo	1,43	0,120	48,11	20,05	0,86	2,85	27,51	38,27	6,05
Mínimo	1,33	0,103	45,51	15,60	0,63	1,66	23,36	14,62	4,45
Desv Est	0,03	0,006	0,82	1,34	0,08	0,41	1,57	9,95	0,59

La fracción magnética y la metalización del Fe fueron superior en la etapa en la que no se le aplicó floculante a la pulpa en lixiviación, los restantes elementos se comportaron de forma similar.

3.2.2 Parámetros del proceso en Lixiviación durante la etapa con y sin aplicar floculante

El régimen operacional en la pulpa de los tanques de contacto durante las dos etapas experimentales, se comportó de modo similar dentro de los rangos normales de operación.

En el sedimentador de la primera etapa las variables controladas se comportaron tal y como se observa en la tabla 5, para ambas etapas evaluativas:

Tabla 5: Condiciones de operaciones logradas en el sedimentador de lixiviación de la primera etapa, operando sin y con floculante.

Estadígrafo	Operando sin floculante					Operando con floculante				
	Ni	NH ₃	CO ₂	Sólidos en suspensión	Densidad	Ni	NH ₃	CO ₂	Sólidos en suspensión	Densidad.
	(g/L)			(mg/L)	(g/L)	(g/L)			(mg/L)	(g/L)
Promedio	10,25	77,68	54,5	117	1741	10,52	76,25	57,78	105	1698
Máximo	11,51	82,05	58,45	191	1790	12,92	79,61	58,1	128	1780
Mínimo	9,04	69,09	48,87	60	1698	9,29	58,1	57,07	89	1649
Desv Est	0,55	3,29	3,1	39,58	24,22	0,74	3,53	0,49	13,6	41,23

Se operó con densidades menores, durante la etapa en la que se aplicó floculante; los sólidos en suspensión fueron más bajos como efecto de la floculación y más estable con menor desviación estándar; las concentraciones de Ni, NH₃ y CO₂ fueron de forma similar para ambos periodos. La densidad reportada por la Planta Piloto es menor cuando se operó con floculante con mayor desviación estándar y por experiencia se conoce que el uso de floculante incrementa las densidades; el transversal en el sedimentador hasta una profundidad de 1,83 metros, operando sin floculante, se mantenía con densidad de 1,20 kg/L a 1,40 kg/L, mientras que con floculante, a esa misma profundidad, el licor se mantuvo totalmente limpio, sin presencia de sólidos que indica que el sólido sedimentó y la densidad se incrementó.

El amperaje del sedimentador se controló por mediciones manuales cada una hora, los valores se mantuvieron estables durante la evaluación del floculante con valores de 0,99 A hasta 1,00 A, no se produjo alteraciones en el amperaje como efecto de la aplicación del floculante.

3.2.3 Comportamiento de la velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa sin aplicar y aplicando floculante.

El comportamiento de la velocidad de sedimentación y densificación de la pulpa en la etapa en la que no se aplicó floculante se muestra en la tabla 6:

Tabla 6. Comportamiento de la velocidad de sedimentación y densificación de las pulpas en la primera etapa de lixiviación durante la evaluación sin floculantes.

Estadígrafo	Amperaje del Electroimán (A)	Velocidad de Sedimentación (m/h)		Densificación (Kg/m ³)
		Pulpa sin magnetizar	Pulpa magnetizada	
Promedio	5,00	0,56	1,02	1,828
Máximo	5,00	0,70	1,18	1,863
Mínimo	5,00	0,49	0,80	1,805
Desv Est	0,00	0,06	0,11	0,019

La estadística descriptiva para la etapa en la que se aplicó el floculante, para la dosis de 4,0 g/t, se muestra en la tabla 7:

Tabla 7. Estadística descriptiva para las determinaciones de la velocidad de sedimentación cuando se aplicó una dosis de 4,0 g/t

	<i>Pulpa sin magnetizar</i>			<i>Pulpa magnetizada y floculada</i>		
	<i>Densidad (g/L)</i>	<i>% de sólidos</i>	<i>Velocidad de sedimentación (m/h)</i>	<i>Densidad (g/L)</i>	<i>% de sólidos</i>	<i>Velocidad de sedimentación (m/h)</i>
Media	1,137	12,261	1,181	1,134	11,881	1,533
Mediana	1,139	12,414	1,110	1,135	11,965	1,482
Desviación estándar	0,006	0,742	0,217	0,008	0,916	0,234
Varianza de la muestra	0,000	0,550	0,047	0,000	0,840	0,055
Mínimo	1,123	10,580	0,750	1,120	10,225	1,220
Máximo	1,148	13,422	1,680	1,145	13,116	2,263
Cuenta	24	24	24	24	24	24

La densidad de la pulpa se encontró en norma, al tomar la muestra para la determinación de la velocidad de sedimentación y se observó que tenía densidad fuera de norma, se desechó y se tomaron las acciones correctivas hasta normalizarla; durante la evaluación de la dosis de 4,0 g/t de floculante la velocidad de la pulpa sin magnetizar alcanzó valores superiores a 1,0 m/h, superior a la

determinada durante la etapa en la que no se aplicó floculante en lixiviación alcanzándose 0,56 m/h, ver tabla 6. La lectura de la interfase sólido-líquido, resultó muy difícil en la muestra no magnetizada, no se apreció la clarificación del licor en la mayoría de los casos hasta pasados los 20 minutos de inicio del experimento.

Para la pulpa magnetizada, que alcanzó una velocidad de sedimentación con valor medio de 1,533 m/h, se logró definir la interfase sólido-líquido transcurridos los primeros cinco minutos del experimento, con buena clarificación del licor.

En la tabla 8, se tiene la estadística descriptiva para la etapa evaluativa, en la que se aplicó una dosis de 6,0 g/t de floculante; la densidad de la pulpa y el % de sólidos se mantuvieron de modo similar en ambas muestras, la velocidad de sedimentación crítica de la pulpa sin magnetizar alcanzó 1,158 m/h. Para la pulpa magnetizada fue de 1,318 m/h, superior a la que alcanzó la pulpa sin magnetizar.

Tabla 8. Estadística descriptiva para las determinaciones de la velocidad de sedimentación cuando se aplicó una dosis de 6,0 g/t

	Pulpa sin magnetizar			Pulpa magnetizada y floculada		
	Densidad (g/L)	% de sólidos	Velocidad de sedimentación (m/h)	Densidad (g/L)	% de sólidos	Velocidad de sedimentación (m/h)
Media	1,138	12,341	1,158	1,137	12,191	1,318
Mediana	1,139	12,494	1,098	1,137	12,201	1,298
Desviación estándar	0,006	0,724	0,212	0,006	0,740	0,248
Varianza de la muestra	0,000	0,524	0,045	0,000	0,547	0,061
Mínimo	1,123	10,580	0,750	1,118	10,011	0,624
Máximo	1,148	13,422	1,680	1,150	13,648	1,760
Cuenta	22	22	22	29	29	29

Al comparar los resultados mostrados en las tablas 7 y 8, se refleja que los mejores resultados se lograron para la dosis de 4,0 g/t, la velocidad de sedimentación fue mayor incluida la correspondiente a la pulpa sin magnetizar. Las velocidades para ambas dosis son superiores a la alcanzada en la etapa en la que no se aplicó floculante, incluida la pulpa sin magnetizar.

La densificación de la pulpa en la que se aplicó 4,0 g/t fue de 1,501 kg/L, mientras que para la etapa de 6,0 g/t se logró 1,767 kg/L.

3.2.4 Resultado del esfuerzo cortante y viscosidad de la pulpa obtenido sin aplicar floculante.

El esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa del fondo del sedimentador de primera etapa de Lixiviación se determinaron a través de un Viscosímetro Rotacional Rheotest 2, aplicando el procedimiento referido en el acápite 2.4-b).

En la tabla 9 se muestra el esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa para la etapa en la que no se aplicó floculante; los valores fueron superiores a los determinados a escala de Laboratorio con la aplicación de floculante. El % de sólidos en la pulpa tomada para determinar el esfuerzo cortante en la pulpa sin floculante se comportó en valores bajos, 42,755 %, no hay correspondencia con la densidad reportada por la Planta Piloto en la tabla 5 de 1,741 kg/L, equivalente a 53,94 %.

Tabla 9. Esfuerzo cortante y viscosidad de la pulpa durante la evaluación operando sin floculantes.

Gradiente de Velocidad (s ⁻¹)	Promedio	
	t (Pa)	μ (Pa*s)
7,04	6,414	0,911
12,35	8,195	0,664
20,71	10,369	0,501
36,65	15,536	0,424
62,41	22,626	0,363
112,95	36,523	0,323
185,94	49,707	0,267
336,62	60,396	0,179
560,04	71,086	0,127
1015,83	87,298	0,086
1677,16	110,816	0,066
3009,6	135,152	0,045
Sólidos en la pulpa (%)	42,755	

El esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa, valores medios, para la etapa en la que no se aplicó floculante en Lixiviación, fueron mucho más altas que las que se lograron durante la experimentación en el Laboratorio, que se muestra en la

estadística descriptiva de la tabla 10, el esfuerzo cortante medio fue de 46,18 Pa y la viscosidad alcanzó valor medio de 0,015 Pa*s.

Tabla 10. Estadística descriptiva para el esfuerzo cortante y la viscosidad para la experimentación en el Laboratorio

	% de sólidos	Esfuerzo cortante (Pa)	Viscosidad (Pa*s)
Media	47,284	46,180	0,015
Mediana	47,550	45,430	0,015
Desviación estándar	1,295	7,787	0,003
Varianza de la muestra	1,677	60,632	0,000
Mínimo	44,250	34,740	0,012
Máximo	49,480	62,360	0,021
Cuenta	25	25	25

El % de sólido que se determinó en la evaluación a escala de Laboratorio, alcanzó mayor porcentaje de sólido, 47,284 %, que el % de sólidos determinado a las muestras tomadas durante la etapa de la evaluación sin aplicar floculante, 42,755 %.

El comportamiento de los valores medios del esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa, durante la evaluación del mineral en la que no se le aplicó floculante en Lixiviación se puede observar en la figura 17:

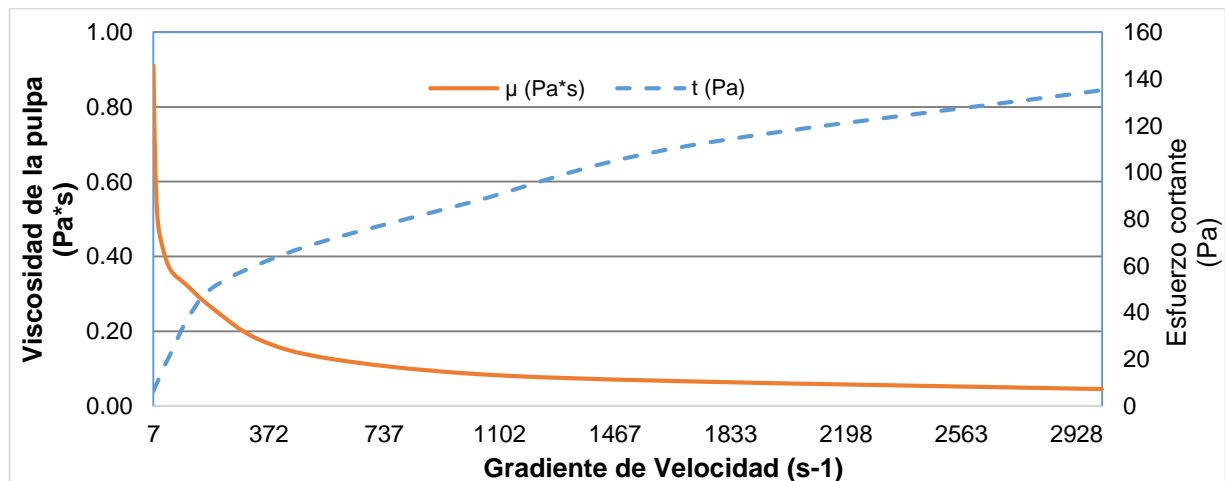


Figura 17: Esfuerzo cortante y viscosidad de la pulpa durante la evaluación sin floculante.

3.2.5 Resultados del esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa obtenidos aplicando floculante en Lixiviación.

En la tabla 11, se muestran los valores promedios del esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa para las dos etapas evaluativas, aplicando las dosis de floculante de 4 g/t y 6,0 g/t.

El valor medio del esfuerzo cortante y la viscosidad en la pulpa es superior al que se logró en el Laboratorio e inferior al que se alcanzó en la etapa en la que no se aplicó floculante.

Tabla 11. Esfuerzo cortante y viscosidad de la pulpa durante la evaluación con floculante en Lixiviación.

Gradiente de Velocidad (s ⁻¹)	Dosis de 4 g/t		Dosis de 6 g/t	
	τ 4 g/t (Pa)	μ 4 g/t (Pa*s)	τ 6 g/t (Pa)	μ 6 g/t (Pa*s)
7,04	2,369	0,336	3,213	0,456
12,35	4,009	0,325	5,186	0,420
20,71	5,932	0,286	8,813	0,426
36,65	9,677	0,264	13,171	0,359
62,41	15,164	0,243	18,261	0,293
112,95	20,464	0,181	27,742	0,246
185,94	24,080	0,130	42,504	0,229
336,62	28,331	0,084	47,212	0,140
560,04	32,879	0,059	56,629	0,101
1015,83	39,944	0,039	66,110	0,065
1677,16	50,897	0,030	76,991	0,046
3009,6	72,317	0,024	86,535	0,029
% de sólidos en la pulpa	48,886		44,995	

En la figura 18, se muestra el comportamiento del esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa, en la etapa en la que se aplicó floculante para las dosis de 4,0 g/t y 6,0 g/t. Ambas variables para la dosis de 6,0 g/t son superiores a la que se alcanzó cuando se aplicó la dosis de 4,0 g/t.

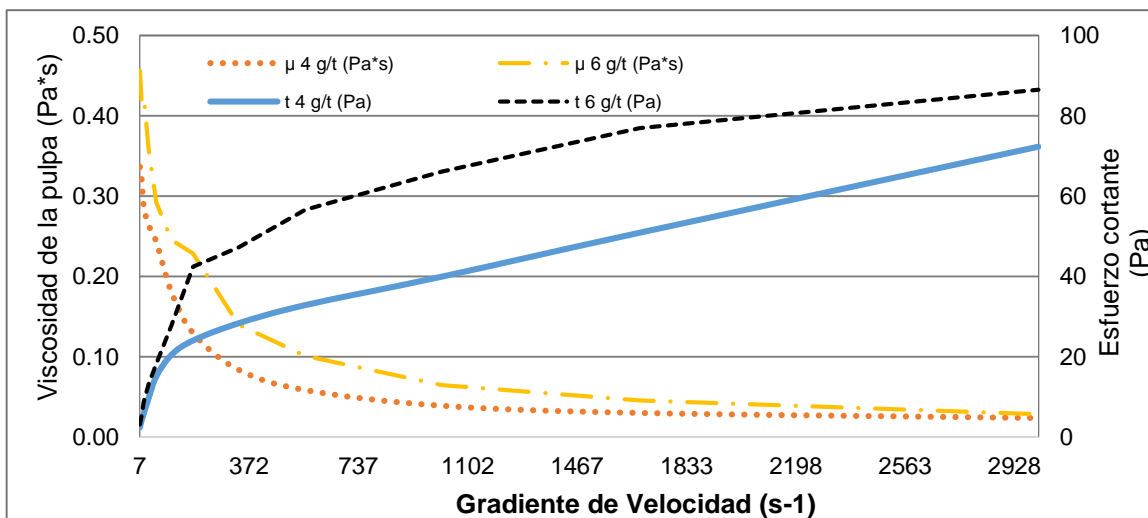


Figura 18: Esfuerzo cortante y viscosidad de la pulpa durante la evaluación con floculante. El % de sólido en las muestras a las que se les determinó el esfuerzo cortante y la viscosidad, de la tabla 11, fueron superiores al determinado en la etapa en la que no se aplicó floculante, tabla 9.

3.3 Evaluación económica

Al aplicarse la floculación química en la UBP Lixiviación y Lavado, mejora la eficiencia de la extracción de los metales valiosos, al lograrse la operación con densidades en valores de 1,70 g/L a 1,75 g/L de forma estable, se evita el corrimiento del níquel hacia las etapas posteriores; permitirá operar con un solo sedimentador en la primera etapa, en lugar de tres que operan actualmente, disminuyendo los inventarios pasivos de níquel y amoníaco en solución; por otra parte, disminuyen los sólidos en suspensión del licor de recirculación a los tanques de contactos, disminuyendo los ciclos de limpieza de los enfriadores de placas, empleados para el enfriamiento de estos licores.

El consumo de floculante aplicando la dosis de 4,0 g/t será tal y como aparece en la tabla 12:

Tabla 12. Cálculo del gasto de compra del ZUKERFLOC N-30M y la investigación a escala de laboratorio y Piloto.

	t/h	280
Mineral alimentado a Hornos de Reducción	t/a	2452800
	t/h	240,8
Mineral reducido	t/a	2109408
Dosis de floculante	g/t	4
	kg/h	0,963
Consumo	t/a	8,438
Cambio EUR/USD (Banco Central Europeo)	Tasa	1,1136
	€/kg	€ 3,40
Precio de compra	CUC/kg	\$3,79
Costo del floculante	CUC/a	\$31.946,90
Costo de la investigación en el CEDINIQ	CUC	\$14.918,13
Costo total en CUC	CUC	\$46.865,03
Costo total en CUP	CUP	\$45.171,58

Se tomaron los datos estadísticos de los reportes metalúrgicos antes de la operación en la UBP Lixiviación y Lavado con el sedimentador, SD-109 A, fuera de operación en el periodo correspondientes al año 2009 y en otra etapa en la que operó con este equipo en operación ya modernizado, desde marzo de 2010 hasta junio de 2011.

Tabla 13. Comportamiento de las pérdidas en el licor en cola con y sin operar el sedimentador modernizado SD-109A.

Periodo	Pérdidas de Ni en el licor en cola	
	%	kg/mes
2009	1,465	44231,3
Mar/10 hasta jun/11	1,217	36070,2
Diferencia	0,198	8161,1

En la tabla 13, se ilustra el comportamiento de las pérdidas por el licor en cola; para esta valoración se tiene en cuenta que el proceso tecnológico resulta complejo y las variables no se comportan de forma similar para evaluar con precisión el efecto de

un sedimentador en la cadena productiva. Por experiencia, se conoce que con la operación del sedimentador permitirá a la planta:

- Disminuir el inventario pasivo de Ni, Co, NH₃ y CO₂ al operar con un solo sedimentador en lugar de los tres que operan actualmente.
- Establecer condiciones favorables para incrementar el perfil de NH₃ y CO₂ en la primera etapa de Lixiviación, además de operar con una relación líquido-sólido estable evitando el corrimiento del Ni y el Co hacia las etapas posteriores, ambos elementos son importantes para incrementar la eficiencia metalúrgica en las extracciones del Ni y el Co.
- Disminuir los sólidos en suspensión hasta valores por debajo de 100 mg/L con efecto positivos en la disminución del ciclo de limpieza de los enfriadores de licor con mayor eficiencia de enfriamiento de los licores a tanques de contactos.

Conclusiones del capítulo 3

- Las variables: Concentración de la solución y Dosis de floculante, no fueron significativas, cuando se evaluó el comportamiento de la sedimentación para el esfuerzo cortante y la viscosidad de la pulpa; la concentración de la solución fue significativa para la velocidad de sedimentación.
- El esfuerzo cortante y la viscosidad de la solución de floculante disminuyeron con la disminución de la concentración de la solución, al aplicar concentraciones bajas de 0,2 g/L, incidiendo de forma favorable en el comportamiento de las características reológicas de la pulpa lixiviada y magnetizada.
- La sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada a escala de Planta Piloto en la que se aplicó una dosis de 4,0 g/t y 6,0 g/t alcanzó un esfuerzo cortante de 72,317 Pa y 86,535 Pa, la viscosidad de 0,024 Pa*s y 0,029 Pa*s y 48,886 % de sólidos y 44,995 % de sólidos en la pulpa respectivamente; valores inferiores al que se logró durante la etapa en la que no se aplicó floculante con un esfuerzo cortante de 135,152 Pa, la viscosidad de 0,045 Pa*s y menor % de sólidos en la pulpa con 42,755 %.

- El mejor resultado se alcanzó para la dosis de 4,0 g/t con menor esfuerzo cortante, menor viscosidad de la pulpa y un % de sólido superior a la etapa en la que se aplicó la dosis de floculante de 6,0 g/t.
- La operación en la planta con el sedimentador SD-109A modernizado con la aplicación del floculante ZUKERFLOC N-30M le permitirá a la UBP Lixiviación y Lavado, disminuir el inventario pasivo de Ni, Co, NH₃ y CO₂, al operar con un solo sedimentador en lugar de los tres que operan actualmente; se establecerán las condiciones favorables para incrementar el perfil de NH₃ y CO₂, en la primera etapa de Lixiviación, operar con una relación líquido-sólido estable, elementos importantes para incrementar la eficiencia metalúrgica en las extracciones del Ni y el Co.

CONCLUSIONES

El comportamiento de la sedimentación de la pulpa lixiviada y magnetizada de los minerales lateríticos del yacimiento Camarioca Este utilizando el floculante ZUKERFLOC N-30M fue mejor con la dosis de 4,0 g/t con la que se alcanzó el máximo gradiente de velocidad con un esfuerzo cortante de 72,317 Pa, una viscosidad de 0,024 Pa*s y mayor porcentaje de sólidos con 48,886 % comparado con la dosis de 6,0 g/t y para la etapa en la que no se aplicó floculante en las que se lograron: mayor esfuerzo cortante con valores de 86,535 Pa y 135,52 Pa, una viscosidad de 0,029 Pa*s y 0,045 Pa*s y menor porcentaje de sólidos con 44,995 % y 42,755 % respectivamente.

RECOMENDACIONES

- El floculante ZUKERFLOC N-30M se puede emplear a escala industrial para los minerales del yacimiento Camarioca Este, sin riesgos de alteraciones significativas en el esfuerzo cortante y en la viscosidad de la pulpa, que afecten el funcionamiento del sedimentador modernizado de la primera etapa de Lixiviación.
- Para la aplicación a escala industrial en su etapa de ajuste y puesta en marcha del sedimentador, la UBP Lixiviación y Lavado, debería establecer un control operacional, que le permita corroborar los resultados obtenidos durante este trabajo a escala Piloto y aplicar una dosis de 4,0 g/t, a una concentración de 0,2 g/L; utilizar el licor de reboso de la primera etapa de Lixiviación para la post dilución de la solución madre en el mezclador estático previa a su dosificación al sedimentador.
- Incluir en los programas de evaluación de los nuevos yacimientos a explotar en la industria, la sedimentación a escala Piloto con la utilización de floculantes, que permitan predecir su comportamiento a escala industrial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALAVÉS BOLAÑO, M, Pruebas de laboratorio para la primera etapa de Lixiviación con diferentes floculantes, Reporte Técnico, Producción, ECG, 2005.
2. AMES RAMÍREZ, C; LOVERA DÁVILA, D, Control de variables en el espesador de cono profundo en la recuperación de relaves altamente fluibles, http://www.google.com/cu/url?url=http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/671&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwjF1_6q6MDLAhUCuYMKHWpeDoAQFggTMAA&usg=AFQjCNFFfcF0vKyqxckbC6BrTlmtQUjAXw visitado 2015.
3. BEYRIS, M, P, Mejoramiento del proceso de sedimentación de la pulpa de mineral laterítico de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba”, Moa Nickel S.A, Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, ISMM, 1997.
4. BEYRIS, M, P y FALCÓN, H, J; Sedimentación de pulpas minerales lateríticas en la tecnología de lixiviación ácida a presión: incidencia de la composición mineralógica, Minería y Geología / v. 23 No. 1, 2007.
5. CAMP, T. R. y STEIN, P. C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol. 30, 1943.
6. CEDINI, Q, Evaluación de diferentes floculantes en pulpas del proceso carbonato amoniacal, SERVICIO CIENTÍFICO TECNOLÓGICO, 2009.
7. CHANG CARDONA A. R, TOIRAC SUÁREZ M. M, ARCE MOLINA J., Modelos multivariados para predecir el extractable de níquel por la composición química de la mena tecnológica en el proceso Carón. Minería y Geología v. 22 n. 2, 2006. ISSN 0258 5979, 2006.

8. CHANG CARDONA, A. R, ROJAS PURÓN A, ARCE MOLINA J., Metodología para pronosticar el extractable de Níquel por la mineralogía computacional. Trabajo presentado en la IV Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales y el desarrollo sostenible, CINAREM`2004. Moa. [Memorias en CD-Rom]. ISBN: 959-16-0258-4, 2004.
9. CHAVIANO, L; Reducción del mineral en el proceso carbonato amoniacal. Reporte Técnico, Producción, ECG, 2001.
10. CHAVIANO, L.; Consideraciones sobre la sedimentación de las pulpas lixiviadas en la Planta Lixiviación y Lavado de la Empresa “Ernesto Che Guevara”, Reporte Técnico, Producción, ECG, 2002.
11. CHEMATEK S,p,A, Evaluación del efecto de los aditivos floculantes sobre el proceso de sedimentación de los sólidos, a escala de laboratorio en el proceso de obtención del Níquel en la Empresa Ernesto Che Guevara, Reporte Técnico, 2007.
12. Coagulación y floculación, <https://www.google.com.cu/search?q=coagulaci%C3%B3n+y+floculaci%C3%B3n&hl=es-419&gbv=2&prmd=ivnsb&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwi144-c68DLAhVCuIMKHQnCAaYQsAQIHQ>, consultado 2015.
13. Coagulación y floculación, <https://www.google.com.cu/url?url=https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation.html&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwi144-c68DLAhVCuIMKHQnCAaYQFggTMAA&usg=AFQjCNG0NyUyY6daocXZEK1MHnpWXLyQ1w>, consultado 2015.
14. Coagulación y floculación, http://www.google.com.cu/url?url=http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file%3Fuuid%3D2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8%26groupId%3D10154&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwi144-c68DLAhVCuIMKHQnCAaYQFghLMAw&usg=AFQjCNGE9paKYOkaltK6Q_CKQAV0gDnTA, consultado 2015.

15. CUBILLET, S. M, CHAVIANO, R. L, ESPINOSA, E, Evaluación a escala de laboratorio de la poliacrilamida en forma de gel para pulpas de mineral de la primera etapa de Lixiviación en la Empresa “Ernesto Che Guevara”, Informe Técnico, Producción, 1990.
16. DE VARGAS, L, Capítulo 6: Floculación. http://www.google.com.cu/url?url=http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/MANUALI/TOMOI/seis.pdf&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwjU8a-g6cDLAhXozoMKHbaxAOMQFggTMAA&usq=AFQjCNGhXtvh_Brf3Hrm6rzBtCIOBudXoA, consultado 2014.
17. ESPINOSA, E, Evaluación del floculante QUIMIFLOC N-30 a escala industrial en la planta Lixiviación y Lavado. Informe Técnico, Producción, 2003.
18. ESPINOSA E, BEYRIS P, Comportamiento de la sedimentación utilizando floculantes a escala de Laboratorio en pulpas lixiviadas de la Empresa “Ernesto Che Guevara”, <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/author/submission/1242>, 2016.
19. FAIR, G. M. y GEMMELL, R. S. A mathematical model of coagulation. Journal of Colloid Science, abril, 1964.
20. FRISCH, H. L. Turbulent coagulation of colloids. Journal of Physical Chemistry, vol. 60, abril, 1956.
21. GARCÍA P, A; ROJAS, V, A, Comparación de los floculantes CHEMADD A-41, 42 Y 43 de la Firma CHEMATEK, el IP-600 de la Firma ZAR CIA y el PERCOL, versión canadiense del MAGNAFLOC R-155, TECNOLOGÍA QUÍMICA Vol, XXVI, No, 3, 2006.
22. GRAVE DE PERALTA, M, MÉNDEZ C, Prueba industrial de floculante. Informe Técnico de la Empresa “Comandante Pedro Sotto Alba (ECPSA, Moa, 1971.
23. GRAVE DE PERALTA, M, Sedimentación de la pulpa cruda. La Minería en Cuba, La Habana, 2: 36-50, 1975.
24. HARRIS, H. S.; KAUNFMAN, W. J. y KRONE, R. B. Orthokinetic flocculation in water purification. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings, ASCE, diciembre 1966.

25. JIMÉNEZ, N, W, Evaluación del floculante PICIZ 7010 en la operación del SD 109 A, Reporte Técnico, Dirección Técnica, ECG, 2012
26. LALANDE, R; ESPINOSA, E, Evaluación de muestras de floculante de la firma CIBA para muestras de pulpas lixiviadas de la ECG, Producción, ECG, 1995;
27. LANDRAU, C; MARTÍN, Y; ESPINOSA, E, Evaluación de muestras de floculantes de la firma SNF en la Empresa “Ernesto Che Guevara”, Dirección Técnica, ECG, 2001.
28. LEVICH, V. G. Physicochemical hydrodynamics. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1962.
29. MALDONADO YACTANO, V, Capítulo 7 Sedimentación. http://www.google.com.cu/url?url=http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomoll/ma1_tomo2_cap7.pdf&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwi6rtvJ6cDLAhXGuoMKHTV4D70QFggTMAA&usq=AFQjCNHLd_RLEI9CNFt4gKGWuh_OPdCOcg, visitado 2014.
30. MORALES, S; GANZÓ, O; ESPINOSA, E, Evaluaciones a escala de laboratorio de muestras de floculantes para pulpas magnetizadas de la planta de Lixiviación y Lavado de la Empresa “Ernesto Che Guevara”, Producción, ECG, 2000.
31. MOP, 238-MOP Manual de operaciones de la Unidad Básica de producción Lixiviación y Lavado, 96 p, software ISOExpert, ECG, 2008.
32. NEBOT, M, Pruebas de sedimentación con los diferentes tipos de floculantes Magnafloc. Trabajo de investigación, ECPSA, 1969.
33. NEBOT, M, Nuevas pruebas de sedimentación y uso del floculante BURTONITE para acelerar dicho proceso. Trabajo de investigación, ECPSA, 1969.
34. NICOLINI, D, Pruebas de laboratorios con muestras de la primera etapa de Lixiviación, tercera etapa de Lixiviación y última de Lavado, SNF do Brasil Ltda, Informe Técnico, Dirección Técnica, 2004.
35. NRBI, Norma NRBI-579: Pruebas de Sedimentación, Grupo Normalización, ECG, 2008.
36. RIVAS, S, Evaluación de nuevos floculantes a escala de laboratorio, Agosto 2012, CEDINIQ, Reporte Técnico, Biblioteca, ECG, 2012.

37. RIVAS, S, Evaluación de nuevos floculantes a escala de Laboratorio, Septiembre 2012, CEDINIQ, Reporte Técnico, Biblioteca, ECG, 2012.
38. SAFFMAN, P. G. y TURNER, J. S. On the collision of drops in turbulent clouds. Journal of Fluid Mechanics, mayo, 1956.
39. SAM POLANCO, C, Estudio del comportamiento de la sedimentación a escala de miniplanta, Proyecto 1266: Sedimentación y Lixiviación ácida a presión de muestras de mineral de diferentes frentes mineros, Informe Técnico etapa 04. Biblioteca, ECG, 2007.
40. SMOLCHOWSKI, M. Drei Vorträge über Diffusion, Brownische Molekular Bewegung und Koagulation von Kolloidteilchen. Physik. Z., vol. 17, 1916.
41. SNEL, H. y ARBOLEDA VALENCIA, J. Influencia de la escala de turbulencia en el proceso de floculación del agua. Separata de la revista ACODAL, Bogotá, 1982.
42. SWIFT y FRIEDLANDER. The coagulation of hydrosols by Brownian motion and laminar shear flow. Baltimore, Department of Chemical Engineering, The Johns Hopkins University, 1963.
43. TAMBO, N. A fundamental investigation of coagulation and flocculation. Sapporo, Department of Sanitary Engineering, Hokkaido University, 1964.
44. TREJO DE HITA, R, Determinación de la combinación y dosis óptimas de Policloruro de aluminio y polímero floculante para el tratamiento del efluente de la Planta Potabilizadora Los Berros Tesis para optar por el grado Maestría en Ingeniería, http://www.google.com/cu/url?url=http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/5173&rct=j&frm=1&q=&esrc=s&sa=U&ved=0ahUKEwiZvry2mcPLAhVDkoMKHT5oDPsQFggTMAA&usq=AFQjCNF1VSj6gKca8ImJ_WDe0TB9jzkSew, consultado 2015.
45. TURRO BREFF, A, Estudio del hidrot transporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002.

ANEXO:

