



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**  
**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**  
**FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**  
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

# **INCREMENTO DEL PORCENTAJE DE SÓLIDO EN LA PULPA DE CIENOS CARBONATADOS CON UN HIDROCICLÓN**

**Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Metalúrgico**

**YONELIS CABOVERDE MAYAN**

**MOA/2014**



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**

**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

**FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**

**DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

# **INCREMENTO DEL PORCENTAJE DE SÓLIDO EN LA PULPA DE CIENOS CARBONATADOS CON UN HIDROCICLÓN**

**Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Metalúrgico**

**Autor: YONELIS CABOVERDE MAYAN**

---

**Tutores: Msc. Ariel Breff Azahares**

---

**Ing. Nadielza Góngora Fonseca**

---

**MOA/2014**

# DEDICATORIA

Al creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado, por ello, con toda la humildad que de mi corazón pueda emanar, dedico primeramente mi trabajo a Dios. De igual forma dedico esta tesis con todo mi amor y cariño a esas personas importantes en mi vida, que siempre estuvieron listas para brindarme todo su apoyo y yo pudiera lograr mis sueños, gracias por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, ahora me toca regresar un poquito de todo lo inmenso que me han otorgado, a ustedes por siempre, mi corazón y mi agradecimiento.

# RESUMEN

Los constantes aumentos en los costos de operación que genera la importación del floculante (Magnaflow 750) para lograr el porcentaje de sólido requerido en la pulpa de cienes carbonatados (40 %), condujo a la realización del presente trabajo, en el mismo se desarrollaron corridas experimentales con la finalidad de demostrar como con un hidrociclón de laboratorio se pudo alcanzar el porcentaje de sólido deseado en esta pulpa. Los parámetros sometidos a estudios fueron porcentaje de sólido a la entrada del hidrociclón y presión de trabajo, analizando su influencia sobre el porcentaje de sólido a la salida del hidrociclón, los experimentos se realizaron a dos niveles de modo que al aplicar un diseño de experimento factorial completo resultaron cuatro experimentos, más uno a nivel central con dos réplicas cada uno para un total de 15 corridas experimentales garantizando la fiabilidad de los resultados. Se determinaron las condiciones de operación del hidrociclón a las que se alcanza el porcentaje de sólido deseado. Con ayuda del programa profesional **STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14**, se determinó que de las variables medidas, la única que influyó de manera positiva y significativamente en el porcentaje de sólidos a la descarga del hidrociclón fue la presión de trabajo. Los resultados finales de los experimentos demostraron que para una presión de 89,63 kPa se alcanza el porcentaje de sólido requerido por el proceso tecnológico de un 40 %, además, se obtuvo el modelo estadístico matemático ajustado que denota en términos de cuantía la influencia de las variables medidas, donde: Porcentaje de sólido final =  $3,0485 + 1,70017 * \text{Presión} + 0,348333 * \text{porcentaje de sólido a la entrada} + 0,0162333 * \text{presión} * \text{porcentaje de sólido a la entrada}$ .

## ABSTRACT

This investigation was carried out due to constant increase in operating costs resulting from the purchase of (Magnaflow 750) flocculant agent to achieve the required percent solids (40 %) in the calcium carbonate mud. Test works were conducted to prove that the required percent solids in the slurry can be achieved with the operation of a hydrocyclone. The parameters under study were: percent solids at the hydrocyclone inlet and operating pressure. The effects on the percent solids at the hydrocyclone outlet were also analyzed. The experiments were conducted at two levels to obtain four experiments when applying a full factorial design in addition to one central level with two replicates for each one totaling fifteen experimental runs; which guarantees the reliability of the test results. The required operating conditions of the hydrocyclone to achieve the desired percent solids were identified By using the STATGRAPHICS Centurion XV v15.2 14 professional software, it was concluded that of the total measured variables, the operating pressure was the only one having a significant positive influence on the percent solids at the hydrocyclone outlet. The final test results indicated that the 40 % percent solids required by the technological process is achieved at a pressure of 89,63 kPa. The modified statistical model was produced; which reveals the effects of the measured variables in terms of quantity, where:

Final percent solids= 3,0485 + 1,70017 \* Pressure + 0,348333 \* percent solids + 0,0162333 \* pressure \* percent solids.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
1 ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO .....	5
1.1 Fundamentación teórica .....	5
1.2 Características del Proceso Tecnológico de la planta de beneficio de cienos carbonatados.....	7
1.2.1 Descripción del proceso tecnológico de la planta de Cienos Carbonatados .....	8
1.3 Características del yacimiento de cienos carbonatados de la Bahía de Moa	10
1.4 Trabajos precedentes sobre los cienos carbonatados .....	10
1.5 Problema a resolver .....	12
1.6 Fundamentos teóricos sobre hidrociclones .....	12
1.6.1 Características del hidrociclón.....	12
1.6.2 Clasificación de los hidrociclones de acuerdo a sus diferencias constructivas y campos de aplicación .....	13
1.6.3 Elección del hidrociclón como método de separación de partículas ..	17
1.7 Descripción del funcionamiento de un hidrociclón.....	17
1.8 Eficiencia del hidrociclón .....	19
2 MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
2.1 Toma y preparación de la muestra de cienos carbonatados para realizar las corridas experimentales .....	22
2.2 Caracterización química y física de la pulpa de cienos carbonatados .....	22
2.3 Descripción de la instalación experimental .....	23
2.4 Características de los equipos de la instalación .....	24
2.5 Diseño de experimentos. Metodología experimental .....	25
2.5.1 Diseño de experimentos.....	25
2.5.2 Método volumétrico .....	28
2.6 Método empleado para la valoración económica .....	29
2.6.1 Periodo de Recuperación .....	29
2.6.2 Valor Presente Neto .....	30
2.6.3 Tasa Interna de Rendimiento.....	31
2.6.4 Estimado de costo capital .....	31

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
3.1	Resultados de las corridas experimentales.....	33
3.2	Análisis estadístico de los resultados.....	35
3.3	Dimensiones de los equipos que conformaran la nueva instalación en la planta de espesadores de cienos carbonatados .....	39
3.4	Valoración – económica para la utilización de hidrociclones.....	39
	CONCLUSIONES .....	42
	RECOMENDACIONES .....	43
	BIBLIOGRAFÍA .....	47
	ANEXOS .....	47





## INTRODUCCIÓN

Cuba posee una de las mayores reservas de menas lateríticas, en las que se utiliza la vía hidrometalúrgica y pirometalúrgica para la extracción de níquel más cobalto, en las empresas productoras Pedro Sotto Alba y Ernesto Che Guevara, ubicadas en Moa, al noreste de la provincia de Holguín.

La empresa mixta cubano canadiense, Comandante Pedro Sotto Alba - Moa Nickel SA, procesa lateritas níquelíferas mediante la tecnología de lixiviación ácida a presión, única en su tipo en el país y líder en rendimiento en el mundo. Por su eficiencia representa un baluarte de la economía cubana.

Los licores de este proceso contienen ácido sulfúrico libre, que deben neutralizarse parcialmente para que, con posterioridad, ocurra la precipitación selectiva del níquel y el cobalto con ácido sulfhídrico. En la empresa Pedro Sotto Alba la neutralización se realiza con cienos carbonatados (coral)<sup>1</sup>, extraídos de un yacimiento situado en la Bahía de Moa y muy rico en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )<sup>2</sup>. Para su uso como neutralizante, los cienos carbonatados deben prepararse convenientemente. Estos se clasifican, primeramente, para lograr una materia prima con la granulometría requerida por el proceso, luego se les disminuye el contenido de cloruros lavando las partículas con agua de proceso y determinando el porcentaje de sólido exigidos por el proceso tecnológico, por lo que en el año 2004 se implementó una planta de preparación de floculante en la planta de espesadores de cienos carbonatados de la empresa Pedro Sotto Alba, con el objetivo de alcanzar un porcentaje de sólido de 40 %, de la pruebas realizadas con diferentes tipo de floculante se eligió (Magnafloc 750), el cual es importado con un costo de \$ 3 000 USD la tonelada, y se consume 20 kg al día, lo que representa un consumo anual de 7 300 toneladas, con un importe monetario de \$ 22 000 USD.

---

<sup>1</sup>Esta es la única planta industrial del mundo que utiliza este tipo de neutralizante. Las otras plantas con similar tecnología de lixiviación ácida a presión (Murrin – Murrin, Cawse y Bulong, todas en Australia) utilizan calizas beneficiadas o un producto llamado calcreta (La Calcreta, de acuerdo con la Enciclopedia Británica (2014): capa sólida rica en calcio, capa endurecida en o sobre el suelo. Se forma en los materiales calcáreos, como resultado de las fluctuaciones climáticas en las regiones áridas y semiáridas).

<sup>2</sup>Además del mineral laterítico, la utilización del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) constituye una materia prima imprescindible para la producción, el cual es empleado en la planta de Neutralización para lograr el pH óptimo del licor lixiviado, obtenido a partir de la lixiviación del mineral níquelífero.

El problema tecnológico más importante en la preparación de la pulpa de los cienos carbonatados radica en lograr alimentar al proceso tecnológico una pulpa con las características de sólido exigidas por el proceso industrial, de esto resulta la necesidad de buscar alternativas que posibiliten lograr el porcentaje de sólido deseado.

Esto incluye, perfeccionar el sistema de preparación de la pulpa en la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados de la empresa Pedro Sotto Alba, para lo cual puede ser esencial la selección del equipamiento tecnológico que brinde resultados adecuados. Los trabajos investigativos /11/ sobre cienos carbonatados hasta el presente confirman que la mayor atención se ha centrado en las características del material existente en la Bahía de Moa para su utilización como neutralizante. Sin embargo, no se ha estudiado con igual intensidad el uso de hidrociclones para incrementar el porcentaje de sólido en la pulpa que se alimenta a la planta de neutralización, algunos de ellos (/8/, /10/, /13/) solamente han abordado la temática para el tratamiento del rechazo y el comportamiento reológico de la pulpa de cienos carbonatados. En la búsqueda bibliográfica realizada no se encontraron trabajos de investigación sobre la utilización de hidrociclones para espesar pulpa de cienos carbonatados, aunque si se utilizan para otros tipos de materiales.

Breff y Góngora 2014, realizó corridas experimentales con esta misma pulpa de cienos carbonatados utilizando un hidrociclón de laboratorio con el fin de lograr una pulpa con la granulometría exigida por el proceso industrial para lo cual analizó la influencia del porcentaje de sólido y arena en la pulpa alimentada así como la presión de trabajo del hidrociclón lo que posibilitó establecer los regímenes de operación del mismo.

Como vía de solución, el presente trabajo propone realizar corridas experimentales utilizando un hidrociclón de laboratorio con la finalidad de lograr el porcentaje de sólido deseado en la pulpa de cienos carbonatados.

### **Situación problémica**

En el presente trabajo se consideró la necesidad de sustituir el floculante Magnafloc 750, debido al elevado costo de importación y de operación que representa, por una nueva alternativa que garantice la obtención del porcentaje de sólido deseado, para esto se propone la utilización de un hidrociclón.

### **Problema de la investigación**

Desconocimiento del porcentaje de sólido que se puede lograr en la pulpa de cienos carbonatados al utilizar un hidrociclón de laboratorio.

### **Campo de acción**

Transformaciones físicas que experimenta la pulpa de cienos carbonatados utilizando un hidrociclón.

### **Objeto de estudio**

Pulpa de cienos carbonatados.

### **Objetivo general**

Alcanzar el porcentaje de sólido requerido en la pulpa de cienos carbonatados mediante la utilización de un hidrociclón de laboratorio.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar experimentalmente las condiciones a las que se alcanza el porcentaje de sólido deseado con la utilización de un hidrociclón de laboratorio.
2. Analizar la influencia de las variables utilizadas para incrementar el porcentaje de sólido a la salida del hidrociclón.
3. Obtener el modelo estadístico matemático del proceso estudiado con el uso de hidrociclones.

## **Hipótesis**

Si se demuestra experimentalmente el incremento en el porcentaje de sólido con la utilización de hidrociclones, se lograría disminuir el costo de operación por la compra de floculante y se alimentaría una pulpa con los parámetros requeridos para el proceso tecnológico.

## **Aportes esperados**

En el **aspecto económico** se prevé:

- La reducción del costo de operación de esta planta por la sustitución del floculante suministrado por compañías extranjeras.
- La elevación de la capacidad de producción de la planta de beneficio de cienos carbonatados con las especificaciones requeridas.
- Incremento en la capacidad de almacenaje de la planta de beneficio de cienos carbonatados.

## **Tareas de la investigación**

- ✓ Toma de una muestra representativa de pulpa de cienos carbonatados.
- ✓ Ajuste y puesta en marcha de la instalación experimental.
- ✓ Desarrollo de las corridas experimentales de clasificación.
- ✓ Aseguramiento de los datos para el desarrollo del diseño de experimentos en el programa profesional **STARGRAPHIS**.
- ✓ Selección y tipo de hidrociclones requeridos para satisfacer el porcentaje de sólidos en el proceso industrial.
- ✓ Evaluación técnico – económica de la propuesta tecnológica.

# 1 ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

## 1.1 Fundamentación teórica

La empresa Pedro Sotro Alba de Moa fue diseñada para la obtención de sulfuros mixtos de níquel y cobalto, a partir de un material laterítico que contiene alrededor de 1,30 % de níquel y 0,14 % de cobalto.

La obtención de esta pulpa se realiza sometiendo el mineral laterítico a diversos procesos físicos y químicos a través de siete plantas de proceso continuo. (Figura 1)

1. Planta de Preparación de Pulpa.
2. Planta de Espesadores de Pulpa.
3. Planta de Lixiviación.
4. Planta de Lavaderos.
5. Planta de Neutralización.
6. Planta de Precipitación de Sulfuros.
7. Planta de Envase y Secado.

Para llevar a cabo estos procesos y responder a las exigencias o necesidades de las materias primas fundamentales se utilizan siete plantas auxiliares:

8. Planta de Tratamiento de Agua.
9. Planta de Ácido Sulfúrico.
10. Planta de Hidrógeno.
11. Planta Termoeléctrica.
12. Planta de Sulfuro de Hidrógeno.
13. Planta de beneficio y espesadores de cienos carbonatados.
14. Área de derretimiento de azufre.

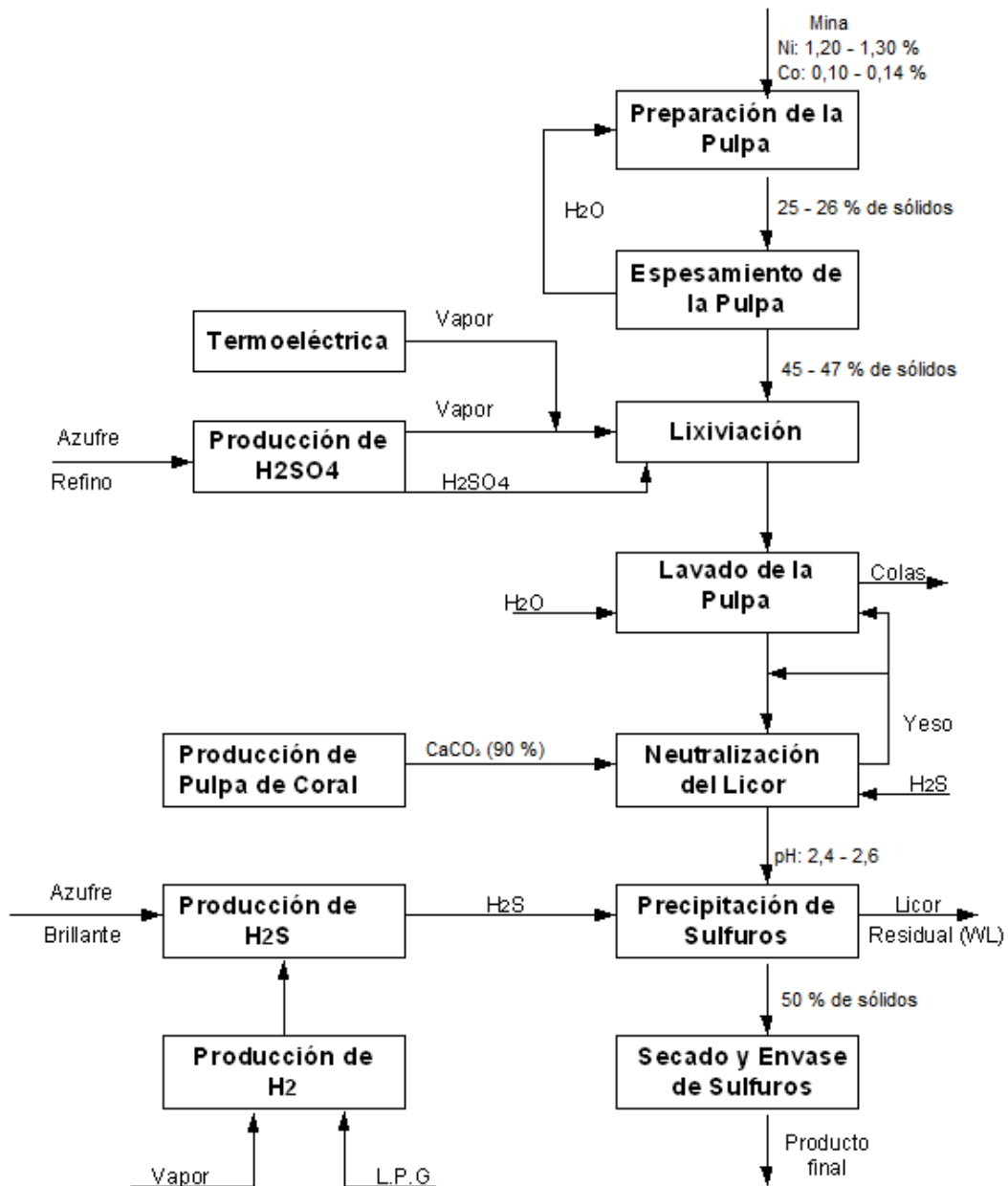


Figura 1 Esquema Tecnológico de la empresa Pedro Sotto Alba

El proceso de neutralización del licor ácido que contiene níquel y cobalto con cenos carbonatados (90 % de  $\text{CaCO}_3$ ) se realiza con el objetivo de eliminar el ácido sulfúrico libre contenido en esta pulpa o licor. De esta forma se logra en un proceso posterior la precipitación del níquel y cobalto en forma de sulfuros.

Actualmente, los yacimientos que contienen los cienos carbonatados con las especificaciones requeridas para el proceso, se han ido agotando y el alto consumo de esta materia prima ha provocado notables desviaciones en el comportamiento de sus principales parámetros de calidad. Entre estos problemas podemos señalar:

1. Elevación del índice de consumo de cienos carbonatados.
2. Incremento en los costos de operación por consumo de floculante.

La solución de estos problemas, desde el punto de vista económico, tiene gran importancia, lo cual se puede valorar por la información que a continuación se muestra:

1. El consumo de cienos carbonatados representa el 45 % del costo de producción de la Planta de Neutralización. Es por eso que debe evitarse su empleo en exceso.
2. La pulpa de cienos carbonatados con porcentajes de sólidos bajos provoca alto consumo de floculante y por ende altos costos de operación.
3. Recuperación de producción debido a pérdidas provocadas por inclemencia del tiempo o por mala sedimentación de la pulpa de cienos carbonatados.

La exploración de diferentes variantes de operación permite la eliminación de las dificultades existentes. Estas se podrían materializar al introducir un hidrociclón al esquema tecnológico en la planta de espesadores de cienos carbonatados para enviar al proceso una pulpa con las especificaciones requeridas y eliminar las deficiencias relacionadas anteriormente.

## **1.2 Características del Proceso Tecnológico de la planta de beneficio de cienos carbonatados**

La caracterización del proceso brinda los elementos primarios utilizados para el desarrollo de la estrategia de análisis, la cual está compuesta por:

- Descripción del proceso tecnológico de la Planta de Beneficio.
- Características generales del equipamiento.

### 1.2.1 Descripción del proceso tecnológico de la planta de Cienos Carbonatados

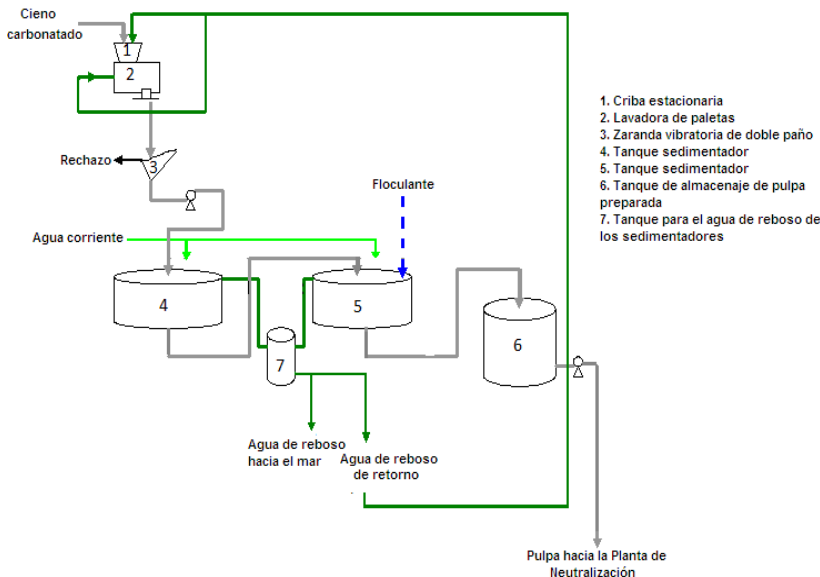
La preparación de la pulpa se realiza por medio de un esquema clásico de clasificación y lavado. El objetivo final es obtener una pulpa con aproximadamente 40 % de sólido y una granulometría inferior a 0,83 mm, con predominio de la fracción – 0,044 mm y que prácticamente no posea cloruros.

**Tabla 1. Característica de la pulpa de cienos carbonatados**

Parámetros	Diseño
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1 320 – 1 340
Porcentaje de sólidos (%)	25
Porcentaje de arena (%)	≤10
Concentración de Cloruros (ppm)	500 - 600
Porcentaje de carbonato de calcio (%)	≥87
Composición granulométrica (-325 mesh) %	≤76
pH	8,0 – 9,0

Fuente: Datos técnicos planta de Cienos Carbonatados

Los cienos carbonatados son minados por dragas (grúas con jaibas) y se transportan en patanas hasta el área de la Planta de Beneficio, situada en un lugar aledaño al Puerto de Moa. En la figura 1.1 se muestra el esquema tecnológico de la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados de la empresa Pedro Sotro Alba.



**Figura 1.1 Esquema tecnológico de la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados**



Cuando llegan las patanas al área de la planta, se descarga el material en un depósito destinado para este fin. Desde el mismo, por medio de grúas, el material es alimentado a una criba estacionaria que posee raíles situados paralelamente a 152,4 mm de separación, donde se le inyecta agua de reboso procedente de los espesadores de pulpa de la propia planta.

Las partículas que pasan a través de los raíles caen por gravedad a una lavadora de paletas y desde ésta, a una zaranda vibratoria de doble malla (la superior con orificios de 6,35 mm y la inferior de 0,83 mm). A esta zaranda se le inyecta agua atomizada a una presión de 206,8 – 275,8 kPa procedente también del reboso de los espesadores de la planta.

Las partículas que pasan por la malla de 0,83 mm forman la pulpa producto con aproximadamente 25 % de sólido, que cae en un pozo de almacenaje. Desde este pozo la pulpa se bombea al primer sedimentador (espesador), el cual también recibe agua corriente para el lavado de los cienos carbonatados.

Cuando la concentración de cloruros es inferior a 700 ppm (0,7 mg/L), la pulpa se transfiere al segundo sedimentador junto con otra inyección de agua cruda a contra corriente y una dosis de floculante. Aquí continúa el lavado y el espesamiento. Una vez que la pulpa alcanza entre 40 - 45 % de sólido, se transfiere a un tanque agitado más pequeño, desde donde se bombea a la Planta de Neutralización. Jiménez (2005), caracterizó esta pulpa y evaluó la instalación existente para su transferencia hasta la Planta de Neutralización. En la caracterización que realizó Caballero (2008) se demostró que más del 70 % de las partículas son inferiores a 0,044 mm y que el comportamiento reológico de la pulpa se corresponde con el de flujo plástico de Bingham.

Es importante señalar que en la literatura no se reporta ningún trabajo dirigido a incrementar el porcentaje de sólido de los cienos carbonatados utilizando hidrociclones.

En tal sentido el **objetivo** de este capítulo es:

Establecer los fundamentos teóricos necesarios para el estudio experimental de la pulpa de cienos carbonatados con el fin de incrementar el porcentaje de sólidos aplicando la técnica de hidrociclones.

### **1.3 Características del yacimiento de cienos carbonatados de la Bahía de Moa**

Los cienos carbonatados (cienos coralinos) del yacimiento de la Bahía de Moa, al igual que los de otras partes del mundo, son sedimentos que se forman como resultado de la abrasión sistemática de las barreras de arrecifes coralinos por parte de las olas del mar. Estos depósitos están situados a no más de 40 metros de profundidad y ocupan una amplia zona marítima de aguas tranquilas entre la costa y la barrera de arrecifes coralinos cercanos a Cayo Moa.

En condiciones naturales estos cienos contienen aproximadamente 80 % de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), pero después de ser beneficiados se eleva a más de 88 %. Dentro del yacimiento el contenido de este compuesto aumenta de arriba hacia abajo, alcanzando los valores máximos entre los tres y cinco metros de profundidad. Luego, a profundidades mayores su contenido decrece, donde predominan los materiales arcillosos.

Los contenidos de otros óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) son variables. Ellos dependen de la cercanía o no de la costa, es decir, de la mayor o menor influencia de los arrastres terrígenos. Los óxidos más abundantes son de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

### **1.4 Trabajos precedentes sobre los cienos carbonatados**

El antecedente más lejano acerca de este yacimiento se remonta a la década del 50 del pasado siglo, los norteamericanos dragaron el área con el objetivo de abrir el canal que facilita la entrada y salida de los barcos de carga al Puerto de Moa. La mayor parte de esta información debió atesorarse en los archivos del entonces Servicio Geológico Norteamericano, donde es obvio que se debió haber realizado una valoración geólogo – económica que permitiera tomar la decisión de crear y emplazar una tecnología de tal magnitud y complejidad, (hasta décadas recientes única de su tipo en el mundo) y que hasta la actualidad se haya sostenido una explotación continuada del yacimiento de cienos carbonatados. Los primeros estudios referenciados, se remontan a Correa (1957) quien realizó una investigación sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande para realizar corridas experimentales de neutralización de licores ácidos.

En la década del 60 se inicia la extracción de los cienos carbonatados (denominados en esa época “coral” o “fangos coralinos”). En 1964 el Centro Coordinador para el Desarrollo del Norte de Oriente solicitó al Instituto Cubano de Recursos Minerales (ICRM) la realización de estudios de localización y ubicación de las reservas de cienos carbonatados que permitieran tomar decisiones respecto a la tecnología del proceso de refinación del níquel.

Como resultado de esos estudios, Nedved (1996) presentó el informe final, que concluyó que estos cienos carbonatados tienen alto contenido de carbonato de calcio, siendo un material muy bueno para los fines propuestos. Según este estudio, estos depósitos carecen de una verdadera estratificación. En ellos predominan los cambios granulométricos en sentido vertical y horizontal, existiendo dos tipos litológicos útiles para la finalidad de la neutralización de los licores ácidos.

El primero es de color gris claro y poco arenoso, que posee un fuerte olor a H<sub>2</sub>S. Y un 50 % - 90 % de partículas menores de 0,08 mm. El segundo tipo es de color gris oscuro, no tiene olor a H<sub>2</sub>S y es mayor el contenido de material grueso.

Castillo (1988), reportó las dificultades que se presentan para la extracción y utilización de este material, sobre todo en lo referente a su composición granulométrica. Fue el primero en recomendar la conveniencia del uso de la fracción gruesa (mayor de 0,83 mm) para los fines de la neutralización debido al alto contenido de carbonato de calcio.

Nápoles (1992), calculó las reservas con categoría industrial y evaluó el contenido de CaCO<sub>3</sub> en las fracciones de + 0,83 mm, + 0,15 mm, + 0,044 mm y – 0,044 mm.

En los trabajos realizados por Campos (2001), se refleja el carácter natural de los sedimentos que conforman el depósito, su composición química y mineralógica. También se establece la exclusión de los sedimentos que proceden de la formación de las rocas de la asociación ofiolítica y de la corteza de intemperismo laterítico vinculados a la misma.

La concesión minera de cienos carbonatados de la empresa Pedro Sotto Alba abarca una extensión de 8,05 km<sup>2</sup>.

En la foto aérea se muestra la región de Moa y de la concesión minera de cienos carbonatados perteneciente a la empresa Pedro Sotto Alba. (Anexo 5).

La concesión limita por el oeste con Punta Cabagán, por el este con las proximidades del canal de entrada de barcos al Puerto de Moa, por el sur con la línea costera y por el norte con Cayo Moa.

Breff y Góngora (2014), en su tema de investigación sobre el tratamiento del rechazo de los cienos carbonatados, propone la utilización de hidrociclones para el circuito de molienda y para la clasificación de partículas

## **1.5 Problema a resolver**

Con el objetivo de disminuir los costos de operaciones y la importación de materias primas en la empresa Pedro Sotto Alba, se propone realizar corridas experimentales con hidrociclón de laboratorio para cuantificar el porcentaje de sólido que se alcanza a diferentes presiones.

La variante propuesta consiste en instalar un hidrociclón para eliminar el consumo de floculantes.

La pulpa que sale del fondo del tanque 1 se alimentará a un hidrociclón, el reboso del mismo retornará al tanque 1 y el fondo con un contenido de sólido superior al 40 % se alimentará a la planta de neutralización con las especificaciones requeridas por el proceso. (Anexo 6)

## **1.6 Fundamentos teóricos sobre hidrociclones**

### **1.6.1 Características del hidrociclón**

Los hidrociclones son equipos de separación de fases, clasificación de partículas y/o beneficio de minerales que realizan sus operaciones en un campo centrífugo, en el cual, la forma y dimensiones del equipo, los orificios de alimentación y descarga, además de otros factores, juegan un papel importante en la eficiencia de la operación para la que se utilice. Su trabajo resulta eficiente con partículas menores del milímetro y hasta menores del micrómetro en casos especiales.

La separación de partículas en campo centrífugo se diferencia del campo gravitacional, en que la fuerza actuante sobre las partículas se puede incrementar

hasta en miles de veces, lo que incrementa proporcionalmente el desplazamiento relativo de la partícula en el líquido y por tanto, los procesos de separación ocurren con mayor rapidez.

En la bibliografía especializada se puede hallar una gran cantidad de expresiones y métodos para determinar su trabajo y como aspecto importante resulta que al tratar una pulpa o suspensión puede realizar la separación de las fases sólidas y líquidas.

Los hidrociclones son, sin lugar a dudas, junto con las bombas centrífugas, los equipos más difundidos en la industria del tratamiento de minerales, principalmente en los circuitos de molienda de rocas minerales.

El hidrociclón se caracteriza por su precio competitivo, instalación práctica, mantenimiento sencillo, alta capacidad de tratamiento en la separación de partículas finas, alto rendimiento, etc. Es apto para la clasificación de la pulpa de mineral. La granularidad y la cantidad de tratamiento están afectadas por el diámetro de la sección cilíndrica, presión de la entrada de pulpa de mineral y la densidad de la pulpa de mineral. /21/

### **1.6.2 Clasificación de los hidrociclones de acuerdo a sus diferencias constructivas y campos de aplicación**

Los hidrociclones constituyen uno de los medios menos costosos, tanto desde el punto de vista operacional como inversionista. Estos son básicamente construcciones simples que no cuentan con partes móviles, lo cual facilita las operaciones de mantenimiento; pueden ser hechos de una amplia gama de materiales y pueden ser diseñados para altas temperaturas (que ascienden incluso a 1 000 °C) y presiones de operación. (Fig.1.2). /7 sitios de Internet/



**Figura. 1.2 Hidrociclones en varios materiales constructivos**

Las diferentes necesidades han obligado a los investigadores y constructores a desarrollar equipos que en ocasiones, guardan poco parecido con la imagen de un hidrociclón convencional.

Por ello parece necesario intentar clasificarlos, detallando sus diferencias constructivas y campos de aplicación. De acuerdo a su geometría podrían clasificarse en dos grandes grupos: Cónicos y Cilíndricos.

Dentro del primer grupo se incluirían los cónicos de cono pronunciado y los de cono tendido. El segundo grupo recogería los cilíndricos de fondo plano y descarga periférico, y los cilíndricos con descarga central.

### **Hidrociclones cónicos**

Como anteriormente se mencionó los hidrociclones cónicos, o convencionales, podrían subclasificarse de acuerdo al ángulo de su parte cónica.

#### **Cono pronunciado, convencionales**

Este grupo recoge los hidrociclones con ángulo menor de  $20^{\circ}$ , caracterizados por un cuerpo relativamente largo debido a su conicidad. Este tipo de diseño se acompaña con partes cilíndricas de gran longitud (mayor que una vez el diámetro), y toberas de alimentación y reboso de pequeñas dimensiones, para aumentar el tiempo de residencia. En general, solamente los hidrociclones de pequeño y medio diámetro, hasta 250 mm, se construyen con conicidad pronunciada. Suelen operar a presiones medias, entre 150 y 400 kPa, obteniendo tamaños de corte entre 2 micras y 30 micras.

Este tipo es el más difundido, especialmente en el tratamiento de minerales industriales donde a menudo se requieren clasificaciones más finas.

#### **Cono tendido**

Los hidrociclones de cono tendido o ancho, mayor de  $20^{\circ}$ , son usados principalmente para clasificar tanto por tamaño como por densidad (clasificación selectiva). El ángulo de su parte cónica varía entre  $20^{\circ}$  y  $45^{\circ}$ , aunque excepcionalmente pueden encontrarse hidrociclones de hasta  $60^{\circ}$ .

Se construyen en diámetros comprendidos entre 250 mm y 1 250 mm, algunos fabricantes construyen modelos de hasta 2 000 mm (Fig. 1.4).



**Figura. 1.3 Hidrociclón de cono tendido ( $\varnothing$  750 mm) en lavado de arenas**

Una aplicación muy conocida de este tipo de hidrociclones es el lavado de carbón con los llamados "hidrociclones de agua", "water-only hydrocyclones", y los hidrociclones operando en medio denso, bien para tratamiento de minerales pesados o en lavado de carbón. /7 sitios de Internet/

### **Hidrociclones cilíndricos**

Podrían incluirse dentro de la clasificación anterior, como hidrociclones de cono tendido, pero debido a que exteriormente no se aprecia nada más que su cuerpo cilíndrico por su ángulo de  $180^\circ$ , es decir, fondo perpendicular a la pared lateral, y también porque su campo de aplicación difiere notablemente de aquellos, merecen un tratamiento diferenciado.

No suponen realmente una nueva teoría, pues ya a principios de siglo pueden encontrarse las primeras aplicaciones de este tipo de hidrociclones.

### **Con descarga periférica**

Consisten, básicamente, en un hidrociclón convencional del cual se ha eliminado su zona cónica, reemplazándola por una parte cilíndrica de similar longitud. El fondo del hidrociclón es plano y la extracción del producto grueso se realiza tangencialmente por la zona baja de la pared cilíndrica.

Hace poco más de 30 años KREBS, uno de los principales fabricantes de hidrociclones, comercializó un tipo de hidrociclón, conocido como EE que, basándose en este diseño de descarga tangencial, conectó dos unidades: una primera de gran diámetro y pared cilíndrica y una segunda convencional, cónica, de menor diámetro. Este diseño no tuvo mucha aceptación al menos a escala industrial, quizás debido a los elevados desgastes que podrían esperarse en la zona de transición debido a la alta concentración de sólidos (Fig. 1.5).



**Figura. 1.4 Hidrociclón cilíndrico KREBS tipo EE de dos etapas**

### **Cilíndricos con descarga central. Fondo plano**

Difiere este diseño del anterior en que la descarga se realiza de modo convencional, es decir, a través de un orificio central.

Con el fin de ampliar el campo de trabajo de los hidrociclones hacia tamaños de corte, por encima de las 150 micras surgió, basándose en la cama de sólidos que se crea en los hidrociclones de cono obtuso, el desarrollo de los llamados hidrociclones de fondo plano, mejor llamados por su inventor el Prof. Dr. Helmut Trawinski de Amberger Kaolinwerke GmbH Ciclonas CBC (Circulating Bed Hydrocyclone) o (Circulating Bed Classifier), hidrociclones de lecho circulante o clasificadores del lecho circulante. /18/

Los hidrociclones son adecuados para separar partículas con diámetros mayores de 5  $\mu\text{m}$ ; aunque partículas muchos más pequeñas, en ciertos casos, pueden ser separadas. /10/

A pesar de que la primera patente sobre ellos se registró a principios del siglo pasado, no fue hasta la década del 50 que se tuvo un verdadero significado tecnológico. En la actualidad, los hidrociclones se han convertido para los procesos de beneficio y en muchas otras ramas industriales en equipos de gran utilidad e imprescindibles para la



clasificación, concentración y clarificación. /1 Sitios de Internet/

### **1.6.3 Elección del hidrociclón como método de separación de partículas**

Por experiencia en trabajo precedente /5/ con la pulpa de cienos carbonatados se observó cómo incrementaba el porcentaje de sólido con la utilización de hidrociclones. Por este motivo, tal y como lo indica la práctica, lo más conveniente para esa finalidad es la utilización de la técnica de los hidrociclones. Su función es separar, mediante la acción de la fuerza centrífuga, la parte sólida de la fluida (líquido, gas) en mezclas bifásicas, donde una de las fases está formada por partículas sólidas.

Justificación de selección:

1. Puede producirse bajo especificaciones del cliente.
2. El material del hidrociclón es de fundido gris. Si no hay explicación especial.
3. Otros materiales a elegir: poliuretano, goma abrasiva, material KM, carburo de silicio, cerámica de aluminio, aleación de cromo. El tipo de material debe indicarse en el momento de requisición del equipo.

Los proveedores y productores principales de estos equipos son Australia, Chile, USA y Japón. /15/

El diámetro del hidrociclón puede variar desde 2,5 cm hasta dimensiones que pueden alcanzar 1,8 m. Los hidrociclones de mayor diámetro producen separaciones gruesas y los de menor diámetro producen separaciones finas.

### **1.7 Descripción del funcionamiento de un hidrociclón**

La figura 1.5 muestra una descripción gráfica de un hidrociclón común. Este equipo está constituido por un cono en la parte inferior y en la parte superior por un cilindro.

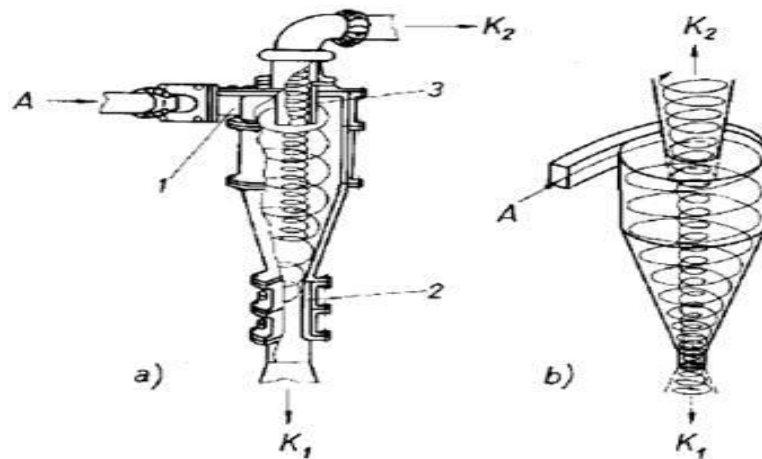


Figura 1: Hidrociclón  
 a) Diseño clásico: (1) Boquilla de entrada; (2) boquilla de descarga (ápex); (3) boquilla de salida (vórtices)  
 b) Corrientes de torbellino en Hidrociclón. A acometida;  $K_1$  producto grueso;  $K_2$  producto fino.

#### Figura.1.5 Descripción del funcionamiento de un hidrociclón

La suspensión sólido-líquida es introducida a presión en el interior del hidrociclón por la boquilla de entrada (1) por la parte cilíndrica superior lateral y sometida a formar una corriente externa circulatoria (torbellino o remolino externo). A causa del efecto de reducción (estrechez) de la parte cónica inferior de la boquilla de salida (2) se transforma a partir de una parte del remolino exterior dirigido hacia abajo una corriente circulatoria interna (remolino interno) dirigida hacia arriba (figura 1.7 b).

El ángulo de la parte cónica del hidrociclón tiene un significativo efecto en los patrones de los flujos internos. Con ángulos mayores se logran altas eficiencias de separación de las partículas más gruesas. Generalmente el ángulo de esta parte cónica oscila entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$ .

El balance de extracción de las partes del remolino exterior del hidrociclón se efectúa de la siguiente manera: la parte que continúa en el hidrociclón avanzando hacia abajo lo abandonará por la boquilla inferior, mientras la parte que asciende del remolino interior será extraída por la boquilla exterior (3) (captador de remolino).

Debido a la fuerza centrífuga ( $F_c = m\omega^2/R$ ), donde:  $\omega$  – velocidad del flujo de entrada (en dirección tangencial), m/s; R – distancia entre el centro del equipo y el centro de la partícula m; m – masa de la partícula, g. La fase sólida es lanzada hacia las paredes exteriores del equipo, desciende y es recogida en la parte inferior, que frecuentemente

acaba en un cono. La fase fluida, una vez en el fondo, asciende rotando y es recogida mediante una tubería situada en el centro del hidrociclón. En el centro del hidrociclón se produce un fuerte vórtice y la baja presión impulsa la fase fluida hacia arriba. /10/

Regulando la aceleración del torbellino y variando la geometría y toberas del hidrociclón puede ajustarse el tamaño de separación entre 0,005 y 0,6 mm. Para partículas menores compite con las centrífugas y para partículas mayores con los tamices.

La clasificación de los hidrociclones ha sido tratada de forma exclusiva desde sus inicios y actualmente también ha sido abordada por algunos autores, pero dirigido a los efectos de corrientes transversales y también a las contracorrientes. /7 Sitios de Internet/

Los datos necesarios para la elección de un tipo y tamaño de un hidrociclón son los siguientes: /18/

- Naturaleza del sólido.
- Distribución granulométrica y forma de las partículas.
- Densidades específicas del sólido y el líquido.
- Contenido de sólidos.
- Viscosidad de la pulpa.
- Caudal (flujo) a tratar.
- Tamaño de corte (Separación deseada).
- Condicionantes propios de la operación (entre otros: concentración de sólidos en la descarga y en el rebose, contenido de finos en gruesos y de gruesos en finos, presión recomendada).

## **1.8 Eficiencia del hidrociclón**

No existe un método teórico sencillo que permita el cálculo de la eficiencia (definiendo como el porcentaje de la masa entrante de partículas que es separado en el hidrociclón) de forma exacta. Esto es en parte debido a que, en la práctica, partículas pequeñas que teóricamente deberían salir con el líquido, debido a la aglomeración, barrido y choque con partículas mayores, serán capturadas; mientras, partículas grandes que deberían ser retenidas rebotarán contra las paredes o serán capturadas

por turbulencias, escapándose del hidrociclón. /18/

La eficiencia o rendimiento de un hidrociclón depende del tamaño de las partículas. En general, cuantas más pequeñas sean las partículas, mejor será el rendimiento. Este parámetro puede definirse como la relación entre el flujo másico de las partículas más gruesas separadas por el cono ( $m_{pc}$ ) y el flujo másico de esas partículas en el flujo de entrada ( $m_{pe}$ ).

$$\eta = m_{pc}/m_{pe} \quad (1.1)$$

En la práctica existen hidrociclones de diferentes dimensiones, eficiencias y capacidades. La eficiencia aproximada de los distintos hidrociclones se muestra en la Tabla 1.1. /17/

<b>Tabla 1.1 Eficiencia aproximada de los distintos tipos de hidrociclones</b>	
<b>Tipos</b>	<b>Eficiencia de remoción (%)</b>
Convencionales	70 - 90
Alta eficiencia	80 - 99
Alta capacidad	80 - 99

Los hidrociclones de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor remoción de las partículas pequeñas que los hidrociclones convencionales. Además, pueden remover partículas de 5  $\mu\text{m}$  con eficiencias de hasta un 90 %, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Estos tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere mayores costos de energía. Por lo general, el diseño del hidrociclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada.

Los hidrociclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20  $\mu\text{m}$ , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Se ha reportado que los multihidrociclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95 % para partículas de 5  $\mu\text{m}$ . /10/

## **Conclusiones parciales del capítulo**

- El análisis de los trabajos precedentes reportan las características del yacimiento y de la pulpa de los cienos carbonatados, que servirán de base para conclusiones posteriores.
- En este capítulo se dieron a conocer algunas características del hidrociclón, que permiten utilizarlo para incrementar el porcentaje de sólidos en este tipo de pulpa.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el desarrollo de toda investigación se necesitan herramientas para poder arribar a buenos resultados. La correcta selección de los métodos y materiales empleados validan los resultados obtenidos, y es por eso que resulta indispensable una correcta toma de muestra, así como la aplicación de los métodos adecuados en aras del cumplimiento del objetivo propuesto.

En tal sentido el **objetivo** de este capítulo es:

Presentar los materiales, equipos y metodologías utilizadas para las corridas experimentales usando hidrociclones para la separación sólido líquido. También se describe la técnica de presupuesto capital para demostrar la factibilidad económica de la instalación propuesta.

### **2.1 Toma y preparación de la muestra de cienos carbonatados para realizar las corridas experimentales**

Para las corridas experimentales se tomaron 100 L de pulpa que se alimenta al primer sedimentador de la Planta de Lavado de los cienos carbonatados. Esta pulpa fue trasladada en tanquetas plásticas hasta la instalación experimental donde se encuentra el tanque agitado, situada en el perímetro interno de la empresa Pedro Sotto Alba. Se estudiaron diferentes combinaciones de pulpa para diferentes porcentajes de sólidos, variando la presión de trabajo.

### **2.2 Caracterización química y física de la pulpa de cienos carbonatados**

#### **Caracterización química de la pulpa de cienos carbonatados**

La tabla 2.0, muestra el porcentaje de cada elemento presente en la pulpa de cienos carbonatados, resaltando en primer lugar, el calcio con 36,95 % lo que destaca a este material como adecuado para los fines de neutralización, en segundo lugar el magnesio con 1,68 % y los restantes elementos con proporciones similares.

Tabla 2.0 Resultados de la caracterización química de la pulpa de cienos carbonatados

Código	Fecha	% Ni	% Co	% Fe	% Mg	% Mn	% Cu	% Zn	% Ca	% Al	% Cr	% Si	% Na	% K
Coral	20/05/14	0,39	0,00	0,92	1,68	0,09	0,00	0,00	36,95	0,30	0,02	0,07	0,22	0,02

En la tabla anterior resulta significativo el alto contenido del níquel, comparado con otros elementos como: aluminio, silicio; lo que indica la contaminación de la Barrera Coralina, por el arrastre de minerales lateríticos y residuales de las plantas de procesamiento hacia el mar.

### Caracterización física de la pulpa de cienos carbonatados

1. La realización del análisis granulométrico. Ver anexo 4
2. La determinación de la densidad de la pulpa.
3. La determinación del contenido de sólidos.

La densidad de la pulpa en g/ml se obtiene por la siguiente expresión:

$$\rho \text{ de la pulpa} = \frac{M \text{ de la pulpa}}{V \text{ de la pulpa}}, \text{ g/mL} \quad (2.1)$$

El porcentaje de sólido se determina por la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de sólidos} = \frac{\rho_{\text{pulpa}} - \rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{pulpa}}} \times \frac{G_{\text{cc}}}{G_{\text{cc}} - \rho_{\text{agua}}} \times 100, \% \quad (2.2)$$

Dónde:

$G_{\text{cc}}$ : Gravedad específica del cieno coralino - 2,58,  $\text{g/cm}^3$

$\rho_{\text{pulpa}}$ : Densidad de la pulpa,  $\text{g/cm}^3$

$\rho_{\text{agua}}$ : Densidad del agua - 0,9962  $\text{g/cm}^3$

### 2.3 Descripción de la instalación experimental

La figura 2.1 muestra la instalación experimental. La misma cuenta con un tanque agitado, una bomba centrífuga encargada de impulsar la suspensión de cienos

carbonatados hacia el hidrociclón, a la entrada del mismo está ubicado un equipo medidor de presión (manómetro), encargado de determinar la presión de operación y las mangueras que cierran el circuito, estas son engomadas.

A continuación se presentan las características de los equipos que conforman la instalación experimental.

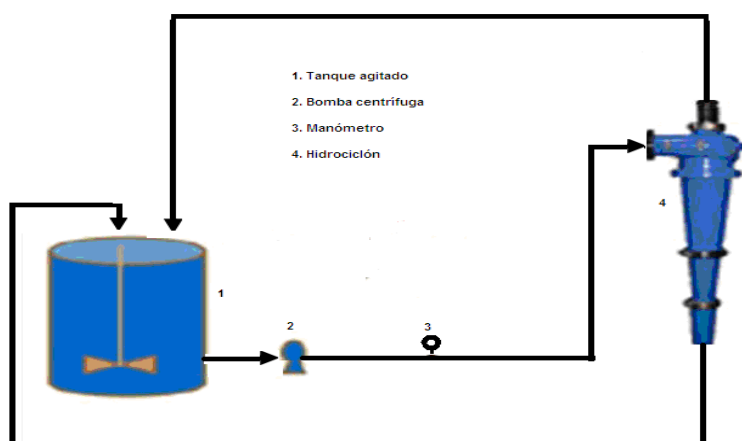


Figura 2.1. Instalación experimental para la separación de partículas por medio del hidrociclón

## 2.4 Características de los equipos de la instalación

Las características de los equipos de esta instalación son los siguientes:

### Hidrociclón:

Altura: 42,00 cm

$D_{\text{entrada}}$ : 3,88 cm

$D_{\text{salida superior}}$ : 4,07 cm

$D_{\text{salida inferior}}$ : 1,20 cm



Figura 2.2 Hidrociclón de laboratorio para la corrida



### **Características de la Bomba utilizada:**

Tipo: centrífuga

Flujo: 3,42 – 254,40 m<sup>3</sup>/h

Material de construcción: acero al carbono

Presión de descarga: 796,34 kPa

Altura de descarga: 35,21 m

Potencia: 5 kW

Frecuencia: 60 Hz

Voltaje: 440 Volt



Figura 2.3. Bomba centrífuga de laboratorio

### **Tanque agitado:**

Capacidad: 250 L

Altura: 1,10 m

Diámetro: 0,60 m

Baffles deflectores. 4



Figura 2.4 Tanque de almacenaje de la pulpa

## **2.5 Diseño de experimentos. Metodología experimental**

### **2.5.1 Diseño de experimentos**

Para el desarrollo de las corridas experimentales de este trabajo, se procedió primeramente a determinar las variables que influyen en la preparación de la pulpa de

cienos carbonatados para lograr un incremento en el porcentaje de sólido a la salida de la planta de espesadores: presión de bombeo y porcentaje de sólido alimentado.

Para obtener el modelo estadístico matemático se utilizó el programa profesional **STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14.**

Los experimentos se desarrollaron a dos niveles, de modo que al aplicar un diseño factorial  $2^k$  con dos factores experimentales resultaron cuatros experimentos con dos réplica cada uno. Se realizaron además tres réplicas en el nivel central para un total de quince experimentos. La Tabla 2.0 muestra los niveles fijados de cada factor. La matriz del diseño de experimentos se aprecia en la Tabla 2.1.

Tabla 2.0 Matriz Experimental

Experimentos	Variables Codificadas	
	Presión	Porcentaje de sólidos
1	+1	-1
2	+1	+1
3	-1	+1
4	0	0
5	-1	-1
6	+1	-1
7	+1	+1
8	-1	+1
9	0	0
10	-1	-1
11	+1	-1
12	+1	+1
13	-1	+1
14	0	0
15	-1	-1

Tabla 2.1 Niveles experimentales de los factores

Experimentos	Presión de Bombeo (kPa)	Porcentaje de Sólido (%)
1	137,89	25
2	137,89	35
3	68,94	35
4	103,42	30
5	68,94	25
6	137,89	25
7	137,89	35
8	68,94	35
9	103,42	30
10	68,94	25
11	137,89	25
12	137,89	35
13	68,94	35
14	103,42	30
15	68,94	25

**Diseño Base**

Número de factores experimentales: 2

Número de bloques: 3

Número de respuestas: 1

Número de corridas: 15, incluyendo 1 punto central por bloque

Grados de libertad para el error: 10

Aleatorizar: Sí

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Presión	68,94	137,89	kPa	Sí
Porcentaje de sólido	25	35	%	Sí

Respuestas	Unidades
Porcentaje de sólido final	%

En el desarrollo de los experimentos se mantuvieron fijos los parámetros experimentales siguientes: densidad del carbonato de calcio 2,58 g/cm<sup>3</sup>; densidad del agua 0,996 g/cm<sup>3</sup>, viscosidad del agua; distribución granulométrica y forma de las partículas; dispersión de la suspensión y uniformidad.

### **2.5.2 Método volumétrico**

Los experimentos que se realizaron en esta investigación tuvieron la finalidad de obtener el comportamiento de la variable respuesta (Porcentaje de sólido a la salida del hidrociclón).

Determinación del porcentaje de sólido de la pulpa de cienos carbonatados (%) volumétricos a partir de la masa de un volumen conocido. /24/

Para la determinación del porcentaje de sólido en la Planta de Beneficios de Cienos Carbonatados se utilizó el método volumétrico que consiste en la determinación de la masa de un volumen conocido de pulpa y la relación de este con la densidad.

#### **Procedimiento**

1. Homogenizar la muestra mediante agitación y transferir 1 000 mL de pulpa a una probeta previamente tarada.
2. Pesar la probeta con la pulpa y descontarle la tara, obteniéndose el peso de la pulpa, en gramo.
3. Con el peso de la pulpa en gramos y el volumen fijado se determina la densidad de la pulpa por la ecuación 2.1 y el porcentaje de sólido por la ecuación 2.2.

Se trabajó con tres contenidos de sólidos diferentes, por las siguientes razones:

- La experiencia práctica indica que los hidrociclones trabajan mejor y más establemente mientras menor sea el porcentaje de sólidos en la pulpa de alimentación.

Por las causas anteriores, la pulpa objeto de estudio para este trabajo se tomó a la entrada del sedimentador 1 de la Planta de Beneficio de Cienos Carbonatados. En ese punto la pulpa se espesa hasta aproximadamente 25 % de sólidos. (Figura 1.2)

La pulpa contenida en el tanque 1 de la instalación experimental se agita intensamente durante 20 minutos antes de comenzar el bombeo para las corridas experimentales.

Los porcentajes de sólidos estudiados fueron los siguientes: 25 %, 30 % y 35 % para las distintas presiones prefijadas, primero 68,94 kPa (mínima), luego 103,42 kPa (Intermedia) y 137,89 kPa (máxima).

## 2.6 Método empleado para la valoración económica

Como parte de la evaluación del flujo tecnológico propuesto para el tratamiento de los cienos carbonatados, también se realizó el análisis técnico económico de la propuesta de instalación. A continuación se brindan los elementos considerados para ese análisis.

Para la mayoría de los autores el problema fundamental que se presenta en toda inversión está relacionado con la determinación de la rentabilidad del proyecto. A su parecer al disponer de una medida de la rentabilidad de proyecto, se puede decidir si este conviene o no llevarlo a cabo.

En 2006, Gitman L en su libro Fundamentos de Administración Financiera, Capítulo 13, denominado Conceptos y Técnicas de Presupuesto de Capital, clasificó tres técnicas en dos grupos, denominándolas técnicas sofisticadas y no sofisticadas. En el primer grupo se encuentra el Periodo de Recuperación de la Inversión (PR); y en el segundo el Valor Presente Neto (VPN), y Tasa interna de rendimiento (TIR).

Con motivo de brindar una mayor coherencia y objetividad al estudio de las técnicas expuestas, se detallan las mismas.

### 2.6.1 Periodo de Recuperación

Es la primera técnica planteada por el autor y lo define como el plazo de tiempo que se requiere para que los ingresos netos de una inversión recuperen el costo de la misma. Esta se determina sumando los flujos futuros de efectivo de cada año hasta que el costo inicial del proyecto de capital quede por lo menos cubierto, por lo que la cantidad total del tiempo que se requiere para recuperar el monto original invertido, que incluye la fracción de un año en caso de que sea apropiada, es igual al periodo de recuperación. Para su cálculo, Gitman propuso la ecuación siguiente:

$$PR = \frac{\text{Año anterior a recuperación} + \text{Costo no recuperado al princ. de año}}{\text{Flujo de efectivo durante el año}} \quad (2.3)$$

## 2.6.2 Valor Presente Neto

A medida que se reconocieron los defectos en el método del Periodo de Recuperación y en estos otros métodos iniciales, las personas empezaron a buscar otras formas de mejorar la efectividad de las evaluaciones de proyectos.

Uno de estos métodos que marcó pauta dentro de las Técnicas de Presupuesto de Capital es el **Valor Presente Neto**, conocido por sus siglas en inglés como NPV (Net Present Value), el cual se basa en las técnicas de flujo de efectivo descontado y se define como un método para evaluar las propuestas de inversión de capital mediante la obtención del valor presente de los flujos netos de efectivo en el futuro, descontado al costo de capital de la empresa o a la tasa de rendimiento requerida.

La fórmula de cálculo del valor presente neto (NPV) es la siguiente:

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \frac{CF_n}{(1+k)^n}$$

*o*

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_n}{(1+k)^t}$$

(2.4)

Dónde:

NPV: Valor presente Neto

CFn: Flujo de caja en los diferentes años del proyecto

K: Tasa de descuento, %

T: Cantidad de años

El criterio para la toma de decisiones de aceptación o rechazo cuando se utiliza esta técnica es el siguiente: Si el VPN  $\geq 0$ , se acepta el proyecto, de lo contrario es rechazado. Si el VPN es mayor o igual a cero, la empresa obtiene un rendimiento igual o mayor que el rendimiento requerido o el costo de capital.

### 2.6.3 Tasa Interna de Rendimiento

La **Tasa Interna de Rendimiento (TIR)** se define como aquella Tasa de Descuento que es igual al valor presente de un proyecto con el valor presente de los costos esperados, esta tasa se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$CF_0 + \frac{CF_1}{(1+TIR)^1} + \frac{CF_2}{(1+TIR)^2} + \frac{CF_n}{(1+TIR)^n} = 0$$

*o*

$$\sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} = 0 \tag{2.5}$$

Dónde:

CF<sub>n</sub>: Flujo de caja en los diferentes años

TIR: Tasa interna de Rendimiento

n: Cantidad de años que dura la inversión

Para que un proyecto sea aceptable, la TIR debe ser mayor o por lo menos igual a la tasa de oportunidad de la empresa (TOE). Esto garantiza que la empresa gane más que el rendimiento requerido.

TOE = 15 %

### 2.6.4 Estimado de costo capital

Para realizar el costo capital, se procedió a utilizar el software (Cleopatra), implementado actualmente en la empresa Pedro Sotto Alba.

A través del mismo se pueden realizar estimados estándares para construcción de planta de proceso.

Los estimados de costo capital normalmente incluyen:

- Equipamiento de proceso.
- Utilidades.
- Equipamiento auxiliar.
- Mano de obra.
- Costos indirectos tales como fletes, ingeniería, seguro, etc.
- Asignación para contingencia.

## **Conclusiones del capítulo**

Se relacionaron los equipos con sus características, utilizadas para realizar las corridas experimentales correspondientes al diseño de experimento.

Se relacionó la metodología empleada para realizar las corridas experimentales.

Se describieron las técnicas de presupuesto capital para demostrar la factibilidad económica de la instalación propuesta.



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de los experimentos, aplicando la técnica de los hidrociclones, los cuales fueron desarrollados de acuerdo al diseño experimental propuesto tipo 2<sup>2</sup>. Se presentan también los resultados del procesamiento estadístico y la discusión de los mismos; se analizará la influencia de las variables sometidas a estudio a través del procesamiento estadístico; asimismo se obtendrá el modelo estadístico matemático, que describe el proceso.

En tal sentido el **objetivo** de este capítulo es:

- Analizar los resultados obtenidos en el desarrollo de las corridas experimentales con la utilización de un hidrociclón de laboratorio.
- Analizar la influencia de las variables sometidas a estudio sobre el porcentaje de sólidos a la salida del hidrociclón.
- Obtener el modelo estadístico matemático y su evaluación técnico - económico preliminar.

#### 3.1 Resultados de las corridas experimentales

Los resultados experimentales desarrollados para cada una de las corridas, variando la presión de trabajo y el porcentaje de sólido a la entrada del hidrociclón, se muestran en la tabla 3.1. El porcentaje de sólido fue calculado por la ecuación 2.2.

Tabla 3.1 Resultados experimentales

Corrida	Bloque	Presión (kPa)	Porcentaje de sólido (entrada)	Porcentaje de sólido (Salida)
1	1	137,89	25	57,18
2	1	137,89	35	67,00
3	1	68,94	35	43,48
4	1	103,42	30	38,25
5	1	68,94	25	36,32
6	2	137,89	25	57,53
7	2	137,89	35	63,59
8	2	68,94	35	40,80
9	2	103,42	30	29,00
10	2	68,94	25	35,37
11	3	137,89	25	56,42
12	3	137,89	35	60,73
13	3	68,94	35	38,99
14	3	103,42	30	33,67
15	3	68,94	25	36,26

La figura 3. en forma de diagrama de barras, destaca el margen de operación del hidrociclón para alcanzar el porcentaje de sólido requerido (40 %), el cual se obtuvo en las corridas 3 y 8 para las condiciones anteriormente descritas en la tabla 3.1. Se muestra el incremento en el porcentaje de sólido a la salida del hidrociclón a medida que aumenta la presión de operación y manteniendo fijo el porcentaje de sólido a la entrada del mismo, hasta alcanzar la presión de 137,89 kPa, donde el porcentaje de sólido es muy alto y no fluye por el fondo del hidrociclón.

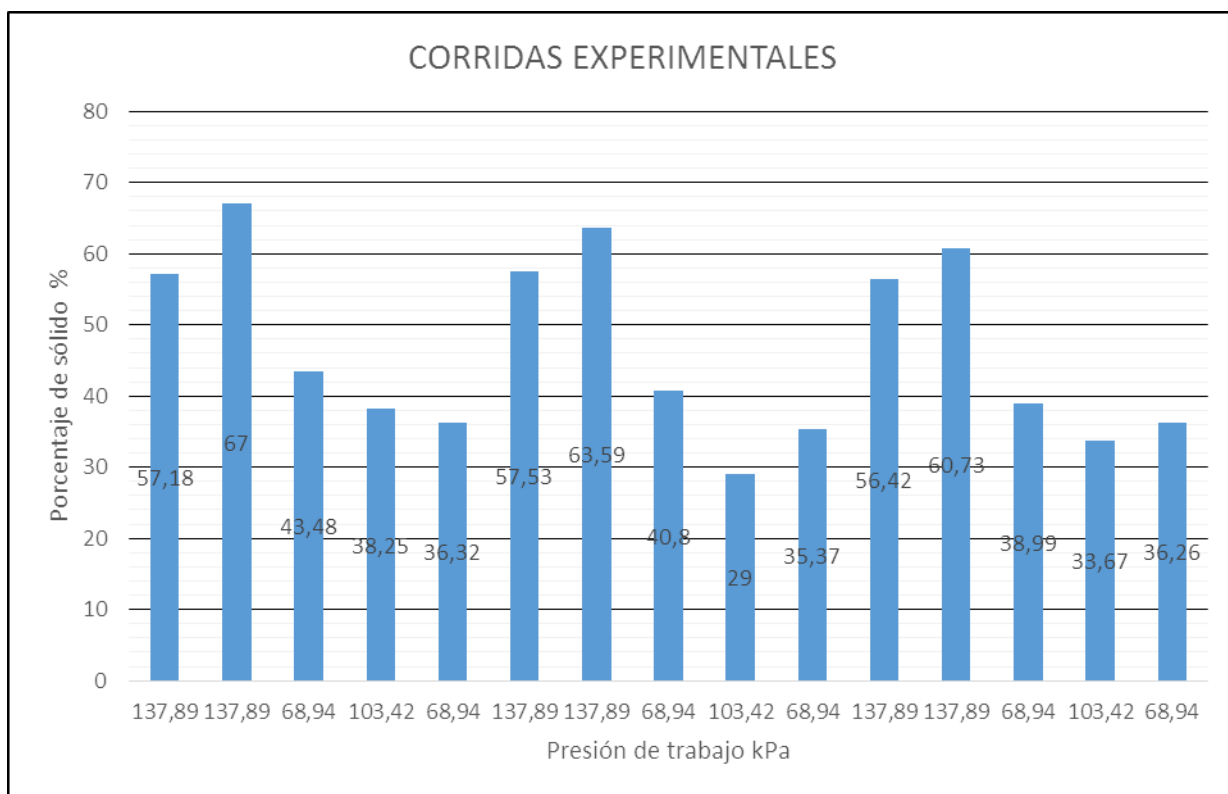


Figura 3. Gráfica de los resultados de las corridas experimentales

### 3.2 Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los resultados de variable respuesta (porcentaje de sólido) de la pulpa de cienos carbonatados a la descarga del hidrociclón fue realizado aplicando el programa profesional **STATGRAPHICS.Centurion.XV.v15.2.14.**

El análisis se desarrolló con el fin de evaluar el efecto en el incremento del porcentaje de sólido considerando los siguientes factores: presión y porcentaje de sólido en la alimentación.

A continuación se muestra la matriz experimental y los resultados para la variable respuesta (porcentaje de sólido a la salida). Los resultados corresponden al diseño factorial  $2^2$  con 15 experimentos, tal y como se planteó en la planificación presentada en el capítulo anterior.

El diseño de experimento deberá ser corrido en 3 bloques. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

A continuación se realiza un análisis de la variable respuesta (porcentaje de sólido a la salida), para una mejor comprensión de cómo influyen las variables que muestran los diagramas de Pareto y los gráficos de los efectos principales.

Tabla 3.2 Efectos estimados para porcentaje de sólido final (%)

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	46,30	2,17	-
A: Presión	21,87	4,87	1,00
B: porcentaje de sólido	5,91	4,87	1,00
AB	0,81	4,87	1,00
Bloque	-2,09	6,16	1,33
Bloque	-2,18	6,16	1,33

La tabla 3.2 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. También muestra que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,33. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de Pareto y el gráfico de los efectos principales para la variable respuesta (porcentaje de sólido en el fondo del hidrociclón). De estos resultados se puede resumir lo siguiente:

El factor que influyó de manera positiva y significativamente en el incremento del porcentaje de sólido a la descarga del hidrociclón fue la presión de trabajo.

DIAGRAMA DE PARETO ESTANDARIZADA PARA PORCENTAJE DE SÓLIDOS FINAL

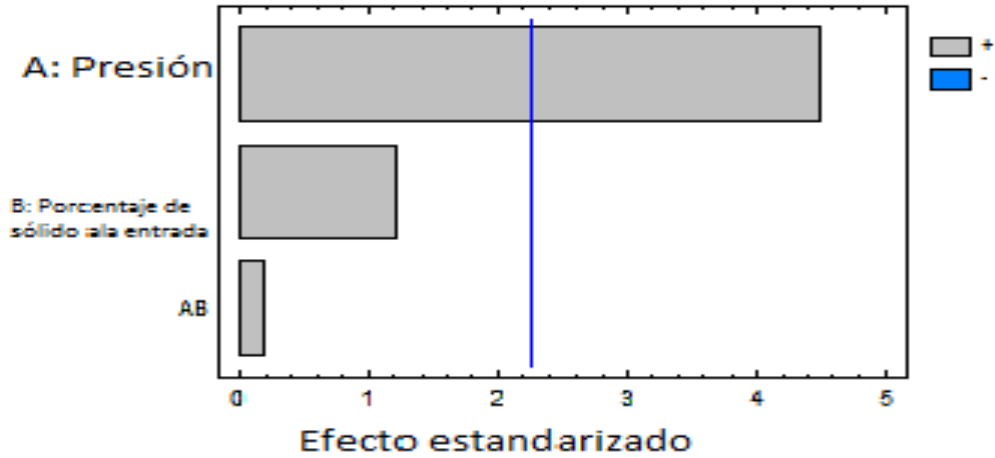


Figura 3.1 Diagrama de Pareto

En el procesamiento estadístico se fijó un nivel de confianza de 95 %.

Gráfica de efectos para porcentaje de sólido final

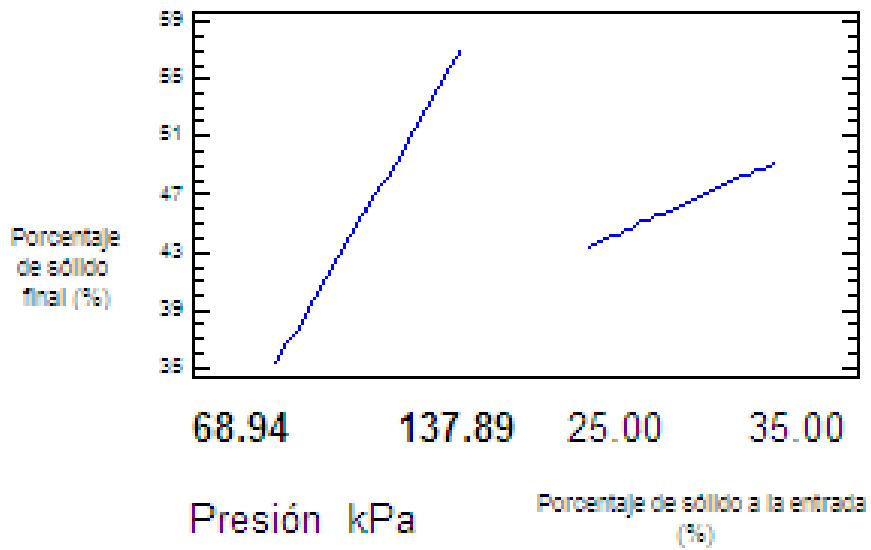


Figura 3.2 Gráfica de efectos principales

### Modelo estadístico matemático obtenido

A continuación se presenta el modelo estadístico matemático obtenido, en el cual se evidencia que las variables que se estudiaron, así como la combinación de ambas tienen efectos positivos, pero sólo la presión de operación de alimentación al hidrociclón influyó significativamente.

Porcentaje de sólido final =  $3,0485 + 1,70017 * \text{Presión} + 0,348333 * \text{porcentaje de sólido a la entrada} + 0,0162333 * \text{Presión} * \text{porcentaje de sólido a la entrada}$ .

(3.1)

En la gráfica 3.3 se muestra que se alcanza un 40 % de sólido en la descarga del hidrociclón, cuando se opera la bomba con una presión de trabajo 89,63 kPa y 25 % de sólidos en la alimentación. También se muestra la presión a la cual se alcanza diferente porcentaje de sólido cuando cambian las condiciones de operación.

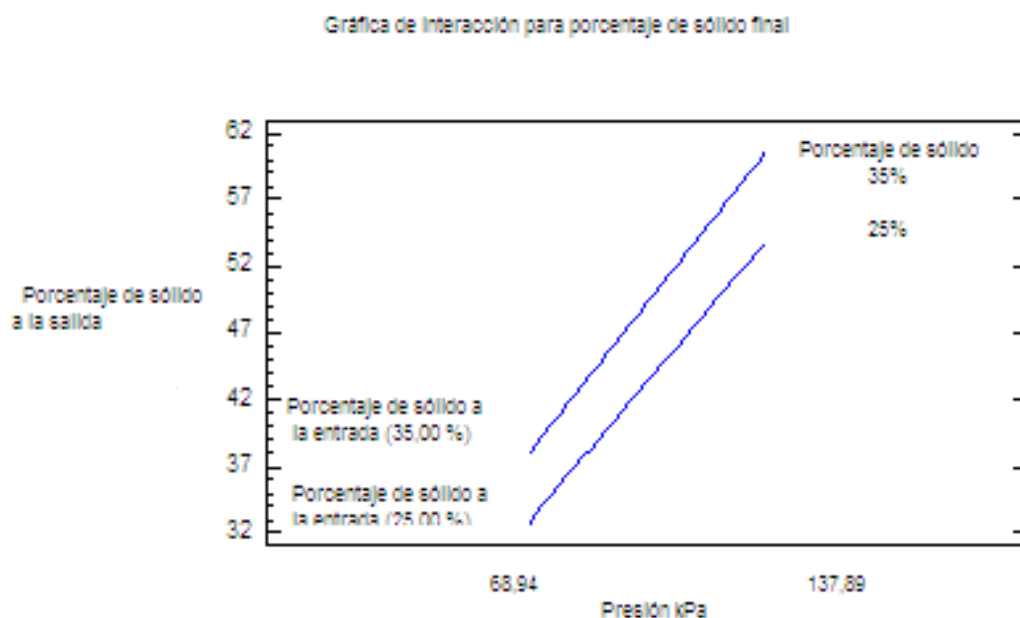


Figura 3.3 Gráfica de Interacción entre los porcentajes de sólido

En este gráfico se muestra la interacción entre los porcentajes de sólido

### 3.3 Dimensiones de los equipos que conformaran la nueva instalación en la planta de espesadores de cienos carbonatados

Las características del hidrociclón seleccionado aparecen descritas en la tabla 3.4 que se presenta a continuación. Para la selección del mismo se utilizó la tabla propuesta en el anexo 1, de acuerdo a la capacidad real de la planta de beneficios de cienos carbonatados (450 m<sup>3</sup>/h), se va a la tabla anteriormente mencionada y se escoge el hidrociclón que garantice este flujo. Luego de haber estudiado varias propuestas se escogió un hidrociclón con las características siguientes:

Tabla 3.4 Características del Hidrociclón seleccionado

Parámetros	Dimensiones
Capacidad	450 m <sup>3</sup> /h
Diámetro del hidrociclón	0,710 m
Angulo de conicidad	20°
Diámetro orificio alimentación	0,150 m
Diámetro orificio reboso	0,200 m
Diámetro toberas de arena	0,100 m
Material	Acero al carbono engomado
Altura	1 m
Cantidad	2 Unidades

### 3.4 Valoración – económica para la utilización de hidrociclones

#### Resumen del Estimado del Costo Capital

El estimado se realizó con un orden de magnitud del 30 %, debido a que no se tiene una ingeniería detallada y ofertas firmes para compra.

Para realizar el costo capital, se procedió a utilizar el software (Cleopatra), el cual arrojó los resultados siguientes, presentes en la tabla 3.5

Tabla 3.5 Costo capital

<b>Denominación</b>	<b>Costo unitario (\$)</b>
Equipos	23 000
Tuberías	1 000
Instrumentación	500
Eléctrica	-
Trabajo civil en el área	-
Estructura	2 000
Edificación	-
Insulación y pintura	-
<b>Total de costo directo</b>	<b>26 000</b>
Ingeniería	-
Flete y construcciones indirectas	-
Costo del dueño	-
<b>Total de costo indirecto</b>	<b>-</b>
Otros	-
Contingencia y escalamiento	1 000
<b>Total de otros costos</b>	<b>2 000</b>
<b>Total de gastos capitales</b>	<b>29 000</b>

Como se puede apreciar el costo total de capital asciende a \$ 29 000 USD, resultando ser los equipos los que mayor costo representan.

### **Cálculos de los indicadores de rentabilidad**

Los indicadores de rentabilidad (TIR, VPN y PR) se realizan en una hoja de cálculos en Excel (Anexo 4), la misma está programada con los precios del níquel y el cobalto. En caso de equipos dinámicos veinte años, en caso de edificaciones treinta y tres años, equipos ligeros y automotor cinco años.

### **Cálculo del periodo de recuperación de la inversión (PR)**

El tiempo de Recuperación de la inversión se calculó por la ecuación 2.3, y el valor obtenido fue de 2,3 años.



### **Cálculo del Valor Presente Neto (VPN)**

Para el cálculo del Valor Presente Neto se utilizó la ecuación 2.3, para un 15 % el valor del VPN fue de \$ 50 000 USD y para un 25 % fue de \$ 21 000 USD, siendo ambos valores mayores que cero lo que demuestra que es factible la inversión.

### **Cálculo de la Tasa Interna de Rendimiento (TIR)**

Para el cálculo de la tasa interna de rendimiento se utilizó la ecuación 2.5 arrojando un valor de 43,9 %.

Los parámetros anteriormente calculados permiten justificar la propuesta estudiada, al ahorrar \$ 22 000 USD cada año, por la compra y exportación del floculante.

## CONCLUSIONES

1. Los resultados experimentales obtenidos con la utilización de la técnica de hidrociclón, demostraron que este equipo puede ser utilizado para incrementar el porcentaje de sólido en la pulpa de cienos carbonatados con las especificaciones requeridas por el proceso. Con una presión de 68,94 kPa y 25 % de sólido en la alimentación del hidrociclón se alcanza el porcentaje de sólido deseado en el proceso industrial (40 %).
2. Se demostró estadísticamente que la variable que influyó de manera positiva y significativamente en la obtención del porcentaje de sólido requerido a la descarga del hidrociclón fue la presión de trabajo.
3. Los resultados de un programa de experimentos considerando como factores: la presión de la bomba (A) y el porcentaje de sólido (B) en la pulpa alimentada al hidrociclón, brindó el siguiente modelo estadístico matemático:

Porcentaje de sólidos final =  $3,0485 + 1,70017 * \text{presión} + 0,348333 * \text{porcentaje de sólido a la entrada} + 0,0162333 * \text{presión} * \text{porcentaje de sólido a la entrada}$ .

## RECOMENDACIONES

1. Aplicar la técnica de hidrociclones para disminuir el costo de operación en la planta de espesadores de cienos carbonatados.
2. Realizar un estudio detallado del ahorro energético que se lograría una vez implementado el circuito de clasificación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Anon, The Sinzing of hidrociclones, Krebs Engeneering, California, 1977.
2. Arterburn, R.A. , Chapter 32, Design and Installation of Comminution Circuits, A. Mular and G. Jergersen, eds. , SME-AME, New York, NY, (1982) 592-607.
3. Blanco-Margota, E., Fernández-Francos,J., Larrondo-Gayo, J.L., Santolaria-Morros, C. "Numerical Simulation of Centrifugal Pumps". ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting, Boston, Massachusetts. FEDSM 200 - 11162, 2000.
4. Bradley, D. J. Pulling, Flow patterns in the hydraulic cyclone and their interpretation in terms of performance Trans. Inst. Chem. Engrs. 37 (1959) 34/35.
5. Breff, Ariel, Propuesta tecnológica para lograr el máximo aprovechamiento de los cienos carbonatados en la empresa comandante Pedro Sotto Alba. Trabajo de Maestría 2014, Universidad de Oriente.
6. Brennen, Christopher E. Hydrodynamics of pumps, Oxford University Press, Inglaterra, 1994.
7. Brunet, P. Diseño gráfico y modelado geométrico, pp. 55 - 66. Sistemas CAD/CAM/CAE. Diseño y fabricación por computador. Serie Mundo electrónico. Marcombo Boixareu editores, 1986.
8. Caballero, Y. Caracterización de las pulpas de Cieno Carbonatado para su utilización como neutralizante. 2008. Archivos de CEPRONIQUEI.
9. Campos, G.M. Nuevos datos acerca de la naturaleza y génesis de los sedimentos del yacimiento de Cieno Carbonatado en la bahía de Cayo Moa Grande. Holguín. 2001. Archivo Pedro Sotto Alba
10. Castillo. D. Informe sobre problemas de extracción y utilización de la materia prima de Cieno Carbonatado. 1988. Archivo Empresa Pedro Sotto Alba.
11. CEPRONIQUEL. Proyecto de extracción del fango coralino al sur de Cayo Moa Grande. 1997.
12. Correa. F. Estudio sobre extracciones experimentales de fangos carbonatados al oeste de Cayo Moa Grande. 1957. Nedved. M.

13. Carlos M. Perfeccionamiento en el hidrot transporte. Trabajo de Diploma 2008. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico.
14. Captación de polvos y gases, King P, 2001, 2006; Austin y Concha, 1994.
15. Contreras E, y Fernández V. “Una Nueva Metodología Para La Evaluación de Proyectos de Inversión: Las Opciones Reales”. *Revista de Ingeniería de Sistemas*. 2003, Volumen XVII:(1), Julio de 2003.
16. Del Toro, A, Dania. Modelo para un proceso de neutralización “Fluido –Sólido” en una batería de reactores continuo con agitación. *Revista Tecnología Química* 2014, Volumen 1, Enero 2014.
17. Diseño de Planta de Proceso de Minerales. A.L. Mular y R.B. Bhappu. Editorial Rocas y Minerales. Segunda Edición. 1986
18. Echeverría Londoño, C. A, Medellín, 2006 “Diseño óptimo de hidrociclones”.
19. E. Roberts Alley & Associates, Inc. Manual de control de la calidad del aire. McGraw-Hill. México, 2001.
20. González, J., Santolaria, C., Blanco, E. The Effect of the volute tongue on the pressure oscillations inside a centrifugal pump. *Proceedings of the hydraulic machinery and systems 21st IAHR Symposium*. Lausanne 9 - 12, 2005.
21. Gómez, H. Modelación de la clasificación de minerales en hidrociclones de diámetro pequeño, 2005
22. Gitman L. Fundamentos de Administración Financiera capítulo 13 denominado, Conceptos y técnicas del presupuesto de capital. 2006
23. Hernández, L., Cálculo verificativo y propuesta de modificación para la ampliación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa. 2003.
24. Jiménez. D.Y. Cálculo verificativo y propuesta de modificación de la instalación de bombeo de Cieno Carbonatado desde el puerto hasta la planta de Neutralización de la empresa Pedro Soto Alba. Tesis de Diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 2005.
25. Juan Luis Bouso, presidente de ERAL Equipos y Procesos. Publicado en *Américas Mining* (Mayo 1998).
26. King P., Principles of Flotation, Institute of Mining and Metallurgy South African, (1982) 215-224.

27. Lynch A., Rao T., Bradley C., "The influence of design and operating variables on the capacities of hidrociclones classifiers", int. j. min. Proc. 2, (1986).
28. Manual Mosley, 2002; Anon, 1977, 1983, (Lynch et al., 1986; Arterburn, 1982)
29. Manual de operaciones de la Planta de cienos carbonatados. Archivo Empresa Pedro Sotto Alba.
30. Nápoles. E. Informe exploración orientativa de Cienos Carbonatados al Sur de Cayo Moa Grande. 1992. Archivo Empresa Pedro Sotto Alba.
31. Nedved. M. Informe final sobre los trabajos de búsqueda de fangos coralinos al sur de Cayo Moa Grande. 1966. Biblioteca Moa Nickel.
32. Norma 44. Determinación del porcentaje de sólidos volumétricos y porcentaje de arenas .Edición A. Archivo Empresa Pedro Sotto Alba.
33. Pierson, H.G.W. The selection of solid-liquid separation equipment. En: solid-liquid separation (Ed. L. Svarovsky) 4ª ed., Butterworth – Heinemann, Oxford, 512 – 525, 2000.
34. Rosabal, V. J. Hidrodinámica y separaciones mecánicas. Editorial Pueblo y Educación, 1988.
35. Stermole F. J, John. Economic Evaluation and Investment Decision Methods. 11 ed. USA: 2006.
36. Taggart, A. F. Elementos de Preparación de Minerales. Archivo de Moa Nickel. 1972.
37. Viera, L.C. y A. Pons. Introducción a la ingeniería Química. T I y II. Editorial pueblo y educación. La Habana, 1985.

## Sitios de Internet

1. <http://www.todomarino.com>. (5/3/2013)
2. <http://www.cribacero.com/hidrociclones.html>. (3/3/2013)
3. <http://taniquelinos.tripod.com/hidrociclon.htm>. (7/3/2013)
4. <http://www.fundacite.arg.gov.ve>. [http](http://www.fundacite.arg.gov.ve). (7/3/2013)
5. <http://www.monografias.com/trabajos87/hidrociclones.shtml> (5/3/2013)
6. [http://es.weirminerals.com/productservices/hydrocyclones/cavex\\_model\\_400cvx\\_hydrocyclon.aspx](http://es.weirminerals.com/productservices/hydrocyclones/cavex_model_400cvx_hydrocyclon.aspx) (5/3/2013)
7. [www.qsmachinery.es/4-hydrocyclones-2.html](http://www.qsmachinery.es/4-hydrocyclones-2.html) (5/3/2013)

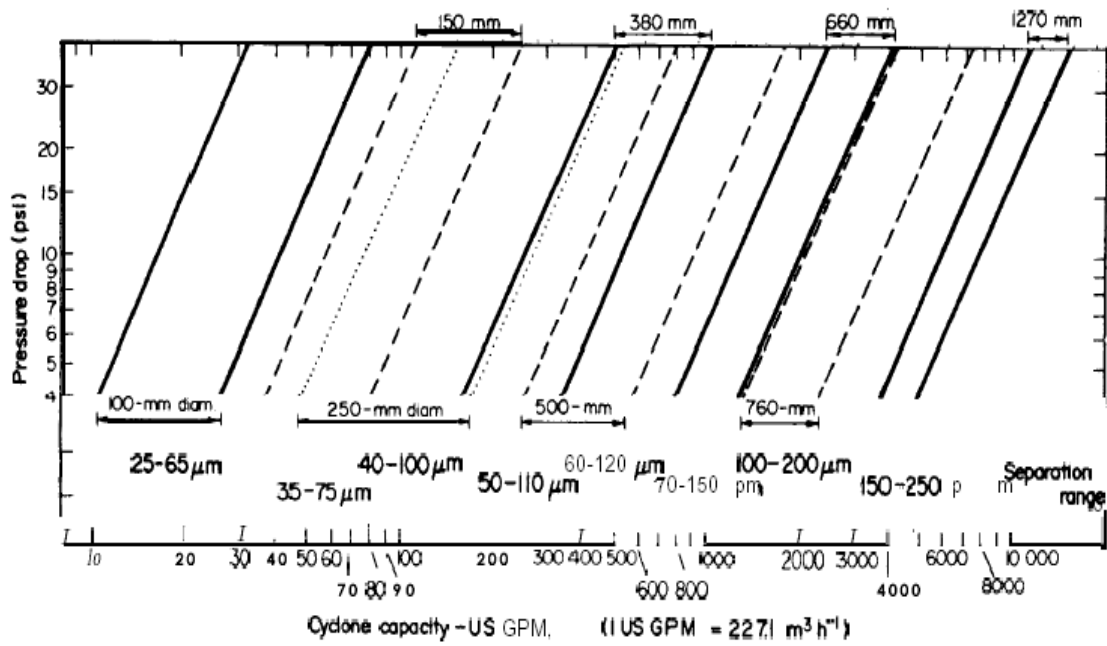
## ANEXOS

### Anexo 1 Tabla para la selección de hidrociclones

Diámetro del hidrociclón D, mm	Ángulo de conicidad $\alpha$ , grados	Rendimiento con $P_o = 0,1$ MPa, V, m <sup>3</sup> /h	Grosor nominal de reboso, $\mu\text{m}$ ( $\rho = 2,7$ ) g/cm <sup>3</sup>	Diámetro orificio de alimentación $d_{al}$ , cm	Diámetro orificio de reboso d, cm	Diámetro tobera de arenas $\Delta$ , en los límites
25	10	0,45-0,9	8	0,6	0,7	0,4-0,8
50	10	1,8-3,6	10	1,2	1,3	0,6-1,2
75	10	3-10	10-20	1,7	2,2	0,8-1,7
150	10; 20	12-30	20-50	3,2-4,0	4-5	1,2-3,4
250	20	27-70	30-100	6,5	8	2,4-7,5
360	20	50-130	40-150	9,0	11,5	3,4-9,6
500	20	100-260	50-200	13	16	4,8-15
710	20	200-460	60-250	15	20	6,8-20
1 000	20	360-900	70-280	21	25	7,5-25
1 400	20	700-1 800	80-300	30	38	15-36
2 000	20	1 100-3 600	90-330	42	52	25-30



**Anexo 2** Diagrama para determinar la caída de presión del hidrociclón



(b)

Figure 12.3. Performances of screens and hydrocyclones. (a) Capacities of screens for various products (*Denver Equipment Co.*). (b) Capacity, separation range and pressure drop of hydrocyclones (*Krebs Engineers*). Example: A 380 mm dia vessel has a separation range of 50-110  $\mu\text{m}$ , and can handle between 200 and 450 gpm at a pressure drop of 7.5 psi.

### Anexo 3 Representación de un hidrociclón instalado



#### Anexo 4 Análisis granulométrico

Tamaño (μm)	Contenido (%)	Tamaño (μm)	Contenido (%)
0,131	0	13,246	1,472
0,15	0,102	15,172	1,551
0,172	0,172	17,377	1,645
0,197	0,313	19,904	1,759
0,226	0,584	22,797	1,902
0,259	1,043	26,111	2,077
0,296	1,596	29,907	2,258
0,339	1,95	34,255	2,403
0,389	1,91	39,234	2,49
0,445	1,56	44,938	2,508
0,51	1,192	51,471	2,462
0,584	0,95	58,953	2,348
0,669	0,805	67,523	2,17
0,766	0,815	77,339	1,958
0,877	0,971	88,583	1,747
1,005	1,119	101,46	1,572
1,151	1,287	116,21	1,451
1,318	1,484	133,103	1,391
1,51	1,391	152,453	1,357
1,729	1,322	174,616	1,454
1,981	1,418	200	1,675
2,269	1,522	229,075	2,008
2,599	1,449	262,376	2,438
2,976	1,409	300,518	2,858
3,409	1,337	344,206	3,077
3,905	1,264	394,244	3,033
4,472	1,231	451,556	2,658
5,122	1,231	517,2	2,055
5,867	1,242	592,387	1,507
6,72	1,28	678,504	0,837
7,697	1,324	777,141	0,465
8,816	1,355	890,116	0
10,097	1,379	1019,52	0
11,565	1,411	1020	0

**Anexo 5** Foto aérea del área de la región de Moa, incluyendo de la concesión minera de cienos carbonatados de la empresa Pedro Sotto Alba



# ANEXO 6 DIAGRAMA DE FLUJO PROPUESTO

