

BENEFICIO DE MINERALES DE YESO PROVENIENTES DE LA MINA
LA NACUMA "MUNICIPIO DE LOS SANTOS"

OSCAR AUGUSTO OREJUELA PARRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA AGOSTO DE 2006

BENEFICIO DE MINERALES DE YESO PROVENIENTES DE LA MINA
LA NACUMA "MUNICIPIO DE LOS SANTOS"

OSCAR AUGUSTO OREJUELA PARRA

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director
Custodio Vásquez Quintero
MSc. Ingeniero Metalúrgico

Codirector
Walter Pardavé Livia
MSc. Ingeniero Metalúrgico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA AGOSTO DE 2006

Doy gracias a DIOS, por darme la oportunidad de haber llegado a esta estancia y haberme dado la fortaleza de seguir adelante sin importar los obstáculos. A mi familia y especialmente a mis padres Nelly Parra y Vicente Orejuela, que son mi ejemplo de vida a seguir; a mis hermanas, que de cada una de ellas he aprendido lecciones de vida importantes. A mis sobrinas Yiyi y Sofi que las Amo y son el motor de mi existencia. Gracias a todos ellos por intentar amarme.

Gracias a la UIS por haberme cuidado y enseñado durante tanto tiempo y por haber formado a un individuo integro con pensamientos sociales definidos.

Gracias a este hermoso País, por darme la oportunidad de que se puede creer en una mejor Nación.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Los profesores Custodio Vásquez y Walter Pardavé por su colaboración y apoyo para la realización del presente trabajo de grado.

Al Ingeniero Mauricio Mantilla, Gerente de la planta de Cemex Colombia S.A. en Ibagué y Al Ingeniero Guillermo Hernández, Gerente de la planta de Cemex Colombia S.A. en Bucaramanga. Por darme la oportunidad de trabajar en esta investigación.

Al Ingeniero Rafael Rincón, Geólogo de la Empresa Cemex Colombia S.A.

A la Ingeniera Maria Claudia Carvajal, Jefe de laboratorio Químico de la Empresa Cemex Colombia S.A. Bucaramanga, por el apoyo incondicional en todo momento.

A los técnicos de la Planta de Aceros: Daniel, Javier, Mario y Ambrosio.

A todas aquellas personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo.

RESUMEN

TITULO: BENEFICIO DE MINERALES DE YESO PROVENIENTES DE LA MINA LA NACUMA "MUNICIPIO DE LOS SANTOS" *

AUTOR: OSCAR AUGUSTO OREJUELA PARRA **

PALABRAS CLAVES: Mineral de Yeso, Procesos de beneficio, % SO₃, %Recuperación y flotación de minerales.

DESCRIPCIÓN.

La investigación tiene como objetivo aumentar el %SO₃ en el mineral de yeso a partir de la eliminación de las impurezas presentes en el mineral, aplicando cuatro procesos de beneficio (Mesa Wilfley, Espiral Humphreys, Hidrociclón y flotación), y analizando los resultados obtenidos en estos, se selecciono el proceso de beneficio con el mejor índice de concentración representado por el % Recuperación y % SO₃.

El proceso seleccionado fue el de flotación, en el cual se analizaron las principales características del mineral y se determinaron las variables que intervienen en el proceso de flotación, empleando el diseño experimental 2³ en el que se analizan tres variables de entrada (Tiempo de acondicionamiento, Cantidad de colector y pH) y donde las variables dependientes fueron: la temperatura de flotación, el diámetro de partícula, el % sólidos en la pulpa, el tiempo de residencia y la agitación de la pulpa, esto con el propósito de determinar las mejores condiciones del proceso empleado.

Los mejores resultados se encontraron en la mezcla de los mantos (Churca y Enchaquetada) en proporción (2:1) respectivamente, con un pH de flotación de 9, 1350 gr. Colector / ton mineral y un tiempo de acondicionamiento de 6 minutos, obteniendo una % Recuperación del 70% y una ley del 40 %SO₃.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director Ing. Custodio Vásquez Quintero, Codirector Ing. Walter Pardavé Livia. (UIS).

ABSTRACT

TITLE: BENEFIT OF MINERALS COMING FROM THE NACUMA MINE "MUNICIPIO DE LOS SANTOS" *

AUTHOR: OSCAR AUGUSTO OREJUELA PARRA **

KEY WORDS: Gypsum Mineral, Benefit processes, % SO₃, Recovery ratio y mineral flotation.

DESCRIPTION.

The aim of this research is increase the SO₃ percentage into Gypsum mineral beginning with the elimination of mineral impurities, applying four benefit processes (Wilfley table, Humphreys spiral, Hydrociclone, and flotation), and analyzing the results of them, it was selected the benefit process with the best concentration index represented by the percentages of recuperation and SO₃.

The selected process was flotation, it was analyzed the main mineral characteristics and the variables of the flotation process were determined using 2³ experimental desing analyzing three income variables (Conditioning time, Collector amount and pH), where the dependent variables were: flotation temperature, particle diameter, pulp percentage, residence time and pulp agitation, all this in order to determine the best process conditions.

The best results were found in the mix of mantles (Churca and Enchaquetada) in 2:1 proportion respectively, with pH value of 9, collector value of 1350 gr. Collector / ton mineral, and 6 minutes of conditioning time, obtaining a percentage recovery of 76%, and % SO₃ law of 40%.

* Degree Work.

** Faculty of Physiochemical Engineering. School of Engineering Metallurgical and Science of Materials. Director Eng. Custodio Vásquez Quintero, Codirector Eng. Walter Pardavé Livia. (UIS).

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	18
1. FUNDAMENTO TEORICO	21
1.1 GENERALIDADES SOBRE EL YESO	21
1.1.1 Definición	21
1.1.2 Características	21
1.1.3 Aplicaciones Industriales	22
1.1.4 Tipos de Depósito	23
1.1.5 Análisis Geológico de la Mina	25
1.2 PROCESOS DE BENEFICIO DE MINERALES	31
1.2.1 Eficiencia de separación	32
1.3 PROCESOS DE CONCENTRACION	34
1.3.1 Mesa de Sacudimientos Wilfley	36
1.3.2 Espiral Humphreys	43
1.3.3 Hidrociclón	45
1.3.4 Flotación	50
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	60
2.1 MUESTREO DE LA MINA EN ESTUDIO	62
2.2 CARACTERIZACION DEL MINERAL EN ESTUDIO	63
2.2.1 Caracterización Geoquímica y Mineralogía	63
2.2.2 Caracterización Fisicoquímica	64
2.3 Formación y Clasificación de las Muestras	64
2.4 Ensayos Preliminares de los Métodos Concentración	65
2.4.1 Mesa de Sacudimientos Wilfley	65
2.4.2 Espiral Humphreys	70
2.4.3 Hidrociclón	73
2.4.4 Flotación	75
2.5 SELECCIÓN DEL METODO MÁS ADECUADO PARA LA CONCENTRACION	80

2.6 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LOS ENSAYOS FINALES DEL METODO SELECCIONADO.	80
2.7 PROPUESTA DE UN DIAGRAMA DE FLUJO	81
3. RESULTADOS EXPERIMENTALES	82
3.1 CONOCIMIENTO GEOLOGICO DEL YACIMIENTO	82
3.2 CARACTERIZACION DEL MINERAL	84
3.2.1 Análisis Geoquímico y Mineralógico	84
3.2.2 Distribución granulométrica de los mantos	84
3.2.3 Caracterización Fisicoquímica	87
3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE CONCENTRACIÓN DEL YESO	89
3.3.1 Concentración del Yeso Empleando la Mesa de Sacudimientos Wilfley.	89
3.3.2 Concentración del Yeso Empleando el Espiral Humphreys	95
3.3.3 Concentración del Yeso Empleando el Hidrociclón	100
3.3.4 Concentración del Yeso Empleando Flotación	104
3.4 SELECCIÓN DEL METODO MÁS ADECUADO PARA LA CONCENTRACION	113
4. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO SELECCIONADO	115
4.1 SELECCIÓN DE VARIABLES	115
4.1.1 Variables de Entrada	115
4.1.2 Variables de Salida	116
4.2 ENSAYOS PLELIMINARES DE FLOTACION	116
4.3 DISEÑO CENTRAL	117
4.4 ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO	118
4.4.1 Muestreo	119
4.4.2 Análisis Fisicoquímico	119
4.4.3 Proceso de Conminución	119
4.4.4 Tamizado	120
4.4.5 Flotación	120
4.4.6 Filtración y Secado	123
4.4.7 Análisis de SO ₃	124
4.4.8 Análisis de Recuperación y Pureza	124

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO SELECCIONADO	124
5.1 RESULTADOS DE ENSAYOS PRELIMINARES	125
5.1.1 Determinación de las variables fijas del proceso de flotación	125
5.2 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	127
5.3 ANALISIS ESTADISTICO DE LOS RESULTADOS Y AJUSTE DEL MODELO MATEMATICO	127
5.3.1 Análisis de Varianza	127
5.3.2 Determinación del polinomio respuesta	131
5.4 DISCUSION DE LOS RESULTADOS	132
5.5 ELECCION DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO	133
6. CONCLUSIONES	135
7. RECOMENDACIONES	137
8. BIBLIOGRAFIA	138

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades químicas.	22
Tabla 2. Propiedades físicas.	23
Tabla 3. Coordenadas de la mina la Nacuma.	26
Tabla 4. Clasificación de las muestras.	65
Tabla 5. Peso específico de las especies mineralógicas.	66
Tabla 6. %SO ₃ en los mantos.	84
Tabla 7. Distribución granulométrica del manto 1.	85
Tabla 8. Distribución granulométrica del manto 2.	85
Tabla 9. Distribución granulométrica del manto 3.	86
Tabla 10. % SO ₃ del manto 1 (Churca).	86
Tabla 11. % SO ₃ del Manto 2 (Lajeo).	87
Tabla 12. % SO ₃ del Manto 3 (Enchaquetada)	87
Tabla 13. Contenido de humedad de las muestras.	88
Tabla 14. Valores de la densidad real del mineral.	88
Tabla 15. Influencia del ángulo de inclinación en el manto 1.	89
Tabla 16. Influencia del ángulo de inclinación en el manto 1. Sobre el indicador de concentración.	90
Tabla 17. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1.	91
Tabla 18. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2.	91

Tabla 19. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3.	92
Tabla 20. Indicador de concentración para el mineral. Utilizando la mesa Wilfley.	94
Tabla 21. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1.	96
Tabla 22. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2.	97
Tabla 23. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3.	98
Tabla 24. Indicador de concentración para el mineral. Utilizando el espiral.	99
Tabla 25. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1.	100
Tabla 26. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2.	101
Tabla 27. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3.	101
Tabla 28. Indicador de concentración para el mineral. Utilizando el hidrociclón.	103
Tabla 29. Influencia de la dosificación del colector en el manto 1.	105
Tabla 30. Influencia del pH en el manto 1.	106
Tabla 31. Influencia del tiempo de acondicionamiento en el manto 1.	107
Tabla 32. Influencia de la cantidad de reactivo sobre el indicador de concentración	108
Tabla 33. Influencia del pH sobre el indicador de concentración (manto 1).	108
Tabla 34. Influencia del tiempo de acondicionamiento sobre el indicador de concentración	109
Tabla 35. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1.	110
Tabla 36. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2.	111
Tabla 37. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3.	112

Tabla 38. Indicador de concentración para el mineral.	113
Tabla 39. Influencia del método de concentración en el indicador de concentración.	114
Tabla 40. Valores de niveles para cada variable estudiada en el diseño experimental.	117
Tabla 41. Valores de las variables para cada ensayo y sus respectivas combinaciones de nivel.	118
Tabla 42. Influencia de la mezcla entre los mantos 1 y 3, en el % recuperación y ley del concentrado.	126
Tabla 43. Determinación del polinomio respuesta.	128
Tabla 44. Variable respuesta para los ensayos de flotación.	129
Tabla 45. Análisis de varianza para los ensayos de flotación.	130
Tabla 46. Análisis de varianza para el % Recuperación.	131

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización Geográfica de la zona.	25
Figura 2. Geomorfología de la Zona.	29
Figura 3. Esquema de flujo de materiales en una separación.	34
Figura 4. Mesa Wilfley.	37
Figura 5. Esquema y zonas de acción de la Mesa de sacudimientos Wilfley.	38
Figura 6. Espiral Humphreys.	43
Figura 7. Esquema de un hidrociclón.	46
Figura 8. Regiones de distribución de tamaño dentro del hidrociclón.	47
Figura 9. Celda de flotación Denver.	51
Figura 10. Formación del ángulo de contacto (Burbuja adherida a un sólido).	52
Figura 11. Formación del ángulo de contacto	53
Figura 12. Metodología experimental utilizada.	61
Figura 13. Frente de explotación.	62
Figura 14. Montaje en la mesa Wilfley.	67
Figura 15. Diagrama de flujo del procedimiento de mesa Wilfley.	69
Figura 16. Montaje del espiral Humphreys.	71
Figura 17. Diagrama de flujo del procedimiento para el Espiral Humphreys.	72

Figura 18. Montaje del hidrociclón.	74
Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento para el Hidrociclón.	75
Figura 20. Montaje de la celda de flotación.	76
Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento para la Celda de Flotación.	79
Figura 22. Frente de explotación.	82
Figura 23. Columna estratigráfica de la mina la nacuma.	83
Figura 24. Influencia del ángulo de inclinación en el manto 1. (M. Wilfley)	90
Figura 25. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (M. Wilfley)	92
Figura 26. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (M. Wilfley)	93
Figura 27. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (M. Wilfley)	93
Figura 28. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Espiral)	96
Figura 29. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Espiral)	97
Figura 30. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Espiral)	98
Figura 31. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Hidrociclón)	102
Figura 32. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Hidrociclón)	102
Figura 33. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Hidrociclón)	103
Figura 34. Influencia de la dosificación del colector en el manto 1.	105
Figura 35. Influencia del pH en el manto 1.	106
Figura 36. Influencia del tiempo de acondicionamiento en el manto 1	107
Figura 37. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1.	110
Figura 38. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2.	111

Figura 39. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3.	112
Figura 40. Molino de bolas marca Denver.	120
Figura 41. Tamizador de laboratorio marca Deco.	121
Figura 42. Celda de flotación con espumas obtenidas, marca Denver.	122
Figura 43. Prensa filtro utilizada en pruebas, marca Deco.	123
Figura 44. Influencia de la mezcla entre los mantos 1 y 3, en el % recuperación Y ley del concentrado %SO ₃ .	126
Figura 45. Diagrama de flujo del proceso de concentración.	134

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: ANÁLISIS Y ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL.	140
ANEXO B: DIFRACTÓGRAMAS DE LA MENA DE LOS MANTOS (CHURCA, LAJEO Y ENCHAQUETADA).	141
ANEXO C: MANEJO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL.	145
ANEXO D: FICHA TÉCNICA DEL REACTIVO USADO.	151

IINTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades colombianas, obras civiles e infraestructura vial, ha incentivado el campo de la construcción, el cual depende en gran parte de la industria cementera.

Una materia prima importante para la fabricación del cemento es el yeso, mineral explotado en algunos lugares del país como Tolima, Cundinamarca, Boyacá y Santander. En este último departamento la zona del cañón del Chicamocha es la región que tiene los mejores yacimientos de yeso; Esta área es labrada por los ríos Chicamocha y Sogamoso, aledaña al municipio de los Santos, departamento de Santander, 62 Km. Al sur de Bucaramanga, la cual posee yacimientos yesíferos, con altos porcentajes de SO_3 , con lo cual se mide la pureza del yeso. La mina “la nacuma” ubicada en esta región presenta afloramientos de yeso en la base de la formación Rosablanca, con una reserva aproximada de 650.000 toneladas para una vida útil de 21 años.

Las impurezas presentes en el yeso, deterioran la calidad de este y aumentan los costos de transporte, elevando el valor del flete hasta la empresa cementera, además altera el proceso en la fabricación del cemento, debido que los porcentajes de SO_3 no son constantes sino fluctuantes, dificultando el cálculo fijo de yeso por tonelada de cemento producido.

El valor de la tonelada de yeso, depende del $\%SO_3$, y a su vez influye en el costo del flete; entonces el costo promedio del transporte del yeso se incrementa

aproximadamente entre un 10 a 15 % del costo total, lo cual significa una pérdida significativa, además del tiempo adicional invertido para corregir los %SO₃ requeridos en el proceso de producción de cemento.

Este proyecto busca seleccionar las variables más importantes del proceso de beneficio de yeso en la mina la Nacuma, y tentativamente, aplicarlo a todas las minas de la región, con lo cual se generaría un avance apreciable en las técnicas rudimentarias de explotación de mineral de yeso en la zona.

Se tomaron muestras representativas de los 3 mantos a estudiar (Churca, Lajeo y Enchaquetada), las cuales se analizaron cualitativa y cuantitativamente, encontrando las fases y porcentajes de los minerales que contiene cada manto.

A las muestras obtenidas, se hizo un análisis granulométrico, encontrando el tamaño de partícula adecuado con mayor porcentaje de yeso para cada manto.

Se hicieron pruebas de beneficio a los 3 mantos por separado, utilizando 4 técnicas de concentración (Mesa Wilfley, Espiral Humphreys, Hidrociclón y Flotación); las cuales indicaron que el manto 2 (Lajeo), no era adecuado para practicarle un proceso de beneficio por vía húmeda debido a su alto %SO₃ (anhidrita, yeso deshidratado), lo que conlleva a que este se hidrate y reduzca levemente su % SO₃.

A los otros dos mantos (churca y enchaqueta) se le aplicaron los 4 procesos de concentración; se seleccionó el proceso con mayor %recuperación y mayor ley de concentrado.

Se definieron las variables en el proceso de concentración seleccionado, dando como resultado una mezcla de los dos mantos (churca y enchaqueta) en proporción (2:1) respectivamente, obteniendo una recuperación del 76% y un

concentrado del 40% de SO_3 . Finalmente se propone un diagrama de beneficio de acuerdo a las condiciones más favorables obtenidas en este trabajo de investigación.

1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES SOBRE EL YESO

1.1.1 Definición. El yeso es un sulfato de calcio dihidratado y su estructura cristalina esta constituida por dos moléculas de agua y por una de sulfato de calcio “ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ”.

Presenta exfoliación perfecta {010} dando hojas delgadas, con superficie concoidea {100} y con fractura fibrosa {011}, generalmente con brillo vítreo, también perlado o sedoso, incoloro, blanco y gris, lo hay en diversas tonalidades de amarillento, rojizo y castaño, como consecuencia de impurezas “óxidos”. Cristaliza en el sistema monoclinico, los cristales son de habito simple tabular sobre {010}, de forma rómbica con aristas biseladas, presenta maclas frecuentes a menudo en forma de cola de golondrina ¹.

En la naturaleza el yeso se presenta en varias formas llamadas:

- ▶ El Espato satinado es un yeso fibroso de brillo sedoso.
- ▶ El Alabastro es una variedad en masa de grano fino.
- ▶ La Selenita es una variedad que produce hojas de exfoliación incolora y transparente.

¹ HURLBUT, C. Manual de Mineralogía de Dana. Segunda Edición. Editorial Reverte S.A. España. 1977.

1.1.2 Características. Del nombre Griego "gyps" que significa "mineral calcinado"; El yeso se originó hace 200 millones de años como resultado de depósitos marinos cuando parte de lo que ahora son nuestros continentes eran inmensas extensiones oceánicas. Durante este período algunos mares se secaron dejando lechos de yeso que se recubrieron para ser descubiertos posteriormente por el hombre. Desde épocas memoriales el yeso ha convivido con la humanidad y constituye uno de los más antiguos materiales de construcción. Durante el período neolítico se usó para realizar cimientos y muros. Los asirios empleaban un yeso conocido como alabastro.

Hace 6000 años los egipcios preparaban argamasa a partir del yeso y 1500 años después utilizaron estuco de yeso en el revestimiento interior de las pirámides. El yeso puro es un mineral blanco, pero debido a impurezas puede tornarse gris, castaño o rosado. Las características más importantes del yeso son las siguientes. (Ver Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Propiedades químicas.

PROPIEDADES QUÍMICAS				
Peso molecular	172,17 gr./mol			
Composición	Ca	23.28%	CaO	32.57%
	H	2.34%	H₂O	20.93%
	S	18.62%	SO₃	46.5%
	O	55.76%	Total	100%
	Total	100%		
Formula empírica	CaSO ₄ ·2(H ₂ O)			
Nombre del compuesto	Sulfato de calcio dihidratado			
Reactividad	Sal poco soluble en agua. Soluble en ácido			

Fuente: CEMEX COLOMBIA S.A.

Tabla 2. Propiedades físicas.

PROPIEDADES FÍSICAS	
Brillo	Vítreo y sedoso en los cristales. Nacarado o perlado en las superficies de exfoliación.
Color	Incoloro, blanco, gris; diversas tonalidades de amarillo a rojo castaño por causa de impurezas. De transparente a translúcido.
Densidad	2.32 g/cm ³
Transparencia	Desde Transparente a traslucido.
Dureza	2. (puede ser rallado con la uña).
Fractura	Fibrosa o en finas laminas coincidiendo con los planos de exfoliación y las formas del cristal.
Exfoliación	Perfecta en una dirección y regular en las otras dos.
Luminiscencia	No (aunque raramente algunas muestras pueden ser fluorescentes).
Raya	Blanca.
Otras	Tiene una baja conductividad térmica.

Fuente: CEMEX COLOMBIA S.A.

1.1.3 Aplicaciones Industriales. El yeso es uno de los minerales mas ampliamente utilizados en el mundo. Se obtiene directamente de la naturaleza por extracción en forma de roca de yeso (mineral de sulfato de calcio dihidratado) en canteras o minas y se procesa industrialmente con poca alteración. En la actualidad existe una amplia gama de aplicaciones:

- En construcción debido a sus excelentes propiedades bioclimaticas, de aislamiento y regulación higrométrica, mecánicas y estéticas se utiliza en guarnecidos, enlucidos, prefabricados y relieves arquitectónicos, proporcionando bienestar y comodidad. Esencial como agente retardante en la producción de cemento.

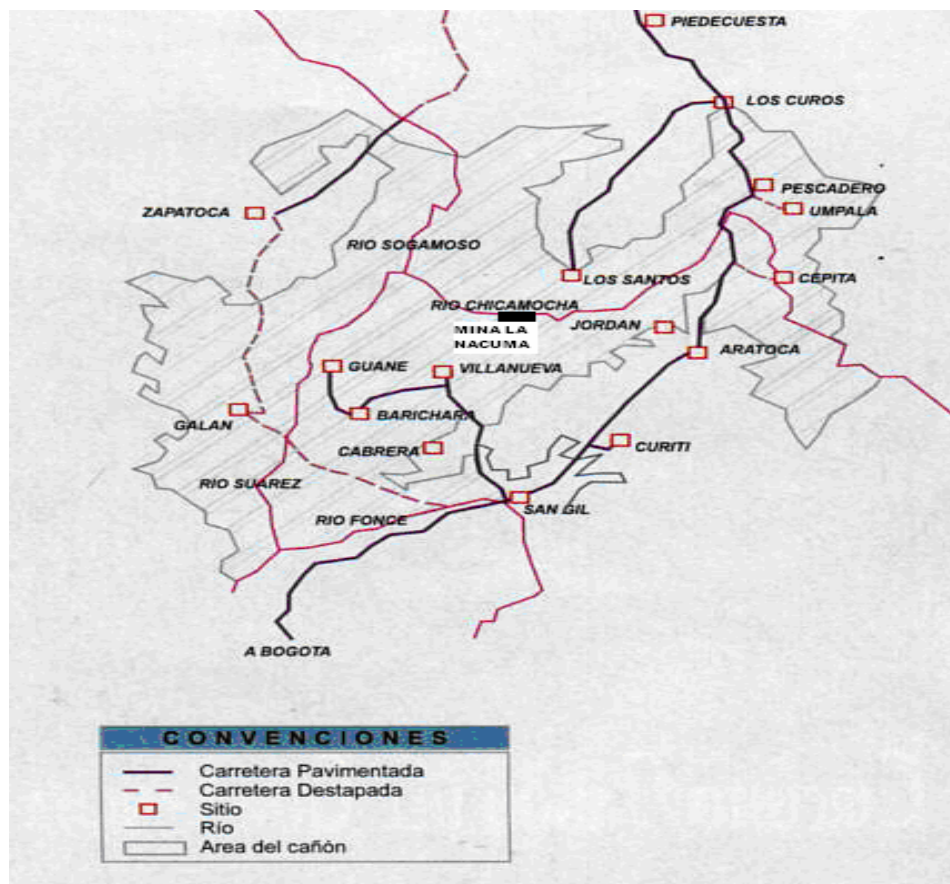
- En cerámica para la elaboración de moldes, aparatos sanitarios, tiza y esculturas artísticas.
- En agricultura para mejorar las tierras de cultivo, como abono y desalinizador.
- En medicina se utiliza en traumatología para elaborar vendas de yeso, en la fabricación de moldes quirúrgicos y odontológicos y en la producción de pasta dentífrica.
- En la industria química y farmacéutica como fuente de calcio, componente en medicamentos y lápices labiales.

1.1.4 Tipos de Depósito. El Yeso es un mineral común y frecuente en las rocas sedimentarias, muchas veces formando capas gruesas. Con frecuencia intercalado en calizas y lutitas, y generalmente en capas bajo los depósitos de sal, por haber sido depositado como uno de los primeros minerales que cristalizaron por la evaporación de aguas salinas.

Puede recristalizar en venas, formando el espato satinado. También en forma de masas lenticulares o cristales esparcidos en arcillas y pizarras. Formado frecuentemente por la alteración de anhidrita, en estas circunstancias suele mostrar pliegues debido al incremento de volumen. Se halla en regiones volcánicas, especialmente si las calizas han sido afectadas por la acción de vapores sulfurosos. También común como ganga en filones metálicos. Asociado a minerales muy diferentes, siendo los más corrientes la halita, anhidrita, dolomita, caliza, azufre, piritita y cuarzo.

1.1.5. Análisis geológico de la mina. En los alrededores del sitio denominado las Juntas, punto de confluencia de los ríos Suárez y Chicamocha, es donde se localizan la mayoría de las minas de yeso reportadas en Santander. La mina la Nacuma se encuentra en esta zona; aledaña al municipio de los Santos, Departamento de Santander, 78 Km. Al sur de Bucaramanga. Ver Figura 1.

Figura 1. Localización Geográfica de la zona.



Fuente: <http://www.calabria.nu/Colombia/Santander/contchicamo.html>.

El registro minero corresponde a la licencia 2491 ubicada en las planchas 120-IV-C-4 y 135-II-A-2 del IGAC, con punto arcifinio: Desembocadura de la quebrada La

Caldera en el río Chicamocha, de coordenadas N: 1.239.400 y E: 1.098.530 y alinderada de la siguiente forma (Ver Tabla 3).

Tabla 3. Coordenadas de la mina la Nacuma.

LADO		RUMBO					DISTANCIA	
DE	A	N/S	GRADO	MINUTO	SEGUNDO	E/W	m	Cm
PA	1	N	36	0	0	E	1.050	0
1	2	S	64	0	0	E	1.330	0
2	3	S	36	0	0	W	1050	0
3	PA	N	64	0	0	W	1330	0

Fuente: CEMEX COLOMBIA S.A.

El acceso a la mina se realiza por la vía pavimentada Bucaramanga-San Gil a lo largo de unos 31 Km. hasta un poco mas adelante del sitio Los Curos, desviando hacia el Sur-Occidente se toma la carretera pavimentada de unos 35 Km, hasta el municipio de Los Santos, continuando después de este unos 12 Km por carretera destapada hasta la mina. En total son unos 78 Km al sur de Bucaramanga.

La secuencia expuesta en esta área corresponde a sedimentos del Cretáceo Inferior a Medio, los cuales no han sufrido mayor tectonismo como lo sugiere los buzamientos suaves (4 a 12 grados) y la ausencia de plegamientos significativos. Los mayores accidentes estructurales lo constituyen fallas normales menores y de rumbo de poco desplazamiento.

A continuación se expone la secuencia estratigráfica presente en el área de una manera generalizada:

- **Formación Los Santos (Tambor):** Esta representada por areniscas claras, cuarzosas de grano fino, en bancos masivos de espesor variable. Hacia la base de la sección expuesta allí, se presentan areniscas finas arcillosas, verdosas con algunas intercalaciones de lutitas. Hacia el contacto con la Formación Rosa Blanca se presentan intercalaciones de lutitas azulosas. El espesor expuesto en esta área es de 150 metros. Según Cruz y Vargas, 1968.

- **Formación Rosablanca:** Suprayaciendo concordantemente a la Formación Los Santos, se presenta una secuencia de 300 metros de espesor, compuesta de una serie alternante de calizas grises azulosas en parte marrones, en bancos masivo de espesor variable, la mayoría de ellas fosilíferas y lutitas grises azulosas y lutitas arenosas grises.

- **Nivel Yesífero:** El nivel Yesífero de interés económico, se presenta hacia la base de la Formación Rosa Blanca con un espesor promedio de 12 metros y aproximadamente 20 metros por encima del contacto de esta Formación con la Formación Los Santos. Allí se observan una serie de bancos masivo lenticulares de yeso gris, de espesores variables, que van de 16 centímetros a 2,10 metros con intercalaciones menores de lutitas grises, calcáreas, yesíferas, algunas lutitas grises arenosas y calizas dolomíticas azulosas de grano fino. Costras, relleno de fisuras y capitas concordantes de yeso fibroso blanco son frecuentes no solo en este nivel sino también a través de toda la secuencia de las Formaciones Rosa Blanca, La Paja y en los niveles arenosos de la Formación Los Santos. Hacia el tope de la Formación Rosa Blanca, se observa un nivel potente de calizas grises azulosas, duras las cuales hacia su base presentan nódulos de chert. Este nivel calcáreo, por su resistencia a la erosión, forma repisas que sobresalen en las paredes de los cañones siendo posible localizarlas a la distancia a través de toda el área

- **Formación La Paja:** Está constituida por una serie monótona de 300 metros de espesor, de lutitas grises verdosas, azules a negras, fosilíferas y yesíferas, las cuales al meteorizarse adquieren un color rojo violáceo.

En Santander se reportan 14 manifestaciones, de las cuales 10 están en los Municipios de Los Santos, Zapatoca, Villanueva y Barichara, municipios ubicados en los alrededores del sitio denominado las juntas, en donde actualmente se extrae el 62 % del yeso que se produce en el país. Los restantes 4 reportes están en los Municipios de Capitanejo, Barrancabermeja, Bolívar y Enciso, de estos el reporte más importante es el de Capitanejo pero por lo distante a los centros de consumo y el mal estado de las vías locales es poco rentable su explotación por los altos costos de transporte.

Los Departamentos ubicados sobre la Cordillera Oriental son los que tienen mayores reportes de yeso, y se encuentran ubicados en la cuenca del Valle del Río Magdalena, con sedimentos marinos. En el Censo Minero elaborado por el DANE en 1988, están reportadas 24 minas productoras de yeso en toda Colombia, todas son de tipo estratiforme, 22 minas están explotadas a cielo abierto como canteras y solo 2 son de minería subterránea con el método de cámaras y pilares, la producción esta englobada en los llamados minerales no metálicos ¹.

A. Geomorfología de la zona. Desde el punto de vista morfoestructural, el área forma parte de una estructura tabular (Mesa de Los Santos), profundamente disectada por los ríos Chicamocha, Sogamoso y Suárez, los cuales han labrado profundos cañones de hasta 600 m de profundidad, con flancos escarpados, como se observa en la fotografía de la Figura 2.

¹ Plan de desarrollo minero ambiental para Santander. Gobernación de Santander.1995.

Figura 2. Geomorfología de la Zona.



Fuente: CEMEX COLOMBIA S.A.

La mina de yeso objeto del presente estudio, se encuentra en el escarpe correspondiente al flanco derecho del Cañón del Chicamocha, a la altura de su confluencia con el Suárez.

En la zona se observan los siguientes conjuntos geomorfológicos:

- El escarpe del Cañón del Chicamocha, de relieve subvertical, donde los afloramientos de las capas acusan nítidamente la estructura tabular. La parte más abrupta del escarpe, hacia el curso del río, está constituida por las areniscas de la

Formación Tambor. Hacia la parte superior del escarpe afloran capas de calizas intercaladas con capas de lutitas (Formación Rosablanca). En este conjunto, los procesos dominantes son los desplomes o desprendimientos de gravedad, ayudados o preparados por el escurrimiento difuso intenso y el escurrimiento concentrado que actúa en las paredes. Sin embargo, estos procesos tienen poco poder morfogénico, debido a la resistencia de las rocas que constituyen el escarpe (areniscas y calizas).

- Inmediatamente por encima del escarpe viene un conjunto de topografía relativamente suave (dentro del contexto) correspondiente a los depósitos de vertiente ya mencionados. Estos depósitos se encuentran en muy buena parte cubiertos por rastros. En ellos actúa el escurrimiento difuso intenso y localmente el escurrimiento concentrado, sobre todo donde la cubierta vegetal ha sido destruida.

- Por encima de estos depósitos viene un segundo escarpe, aunque menos pronunciado que el del cañón, conformado por capas de calizas y lutitas de la parte superior de la Formación Rosablanca. Al interior del conjunto aparecen no obstante algunos coluviones menores. Los procesos predominantes aquí son el escurrimiento difuso intenso y el escurrimiento concentrado, con presencia ocasional de desprendimientos.

- Finalmente, la parte superior de la vertiente, hacia la cuchilla de La Loma, constituida por lutitas, presenta un relieve más suave que el anterior conjunto. Aquí el proceso dominante es el escurrimiento difuso intenso. Sin embargo, se observan fenómenos localizados de sufosión y algunas cicatrices de deslizamientos.

Podría agregarse un quinto conjunto constituido por las vegas y conos localizados al pie del escarpe principal, a lo largo del río Chicamocha. Estos depósitos, sin

embargo, tienen poca superficie en la zona. Ellos son arrastrados por el río durante sus crecidas. En síntesis, se puede decir que el área presenta un grado de inestabilidad y erosión actuales relativamente alto, debido tanto al clima seco y agresivo, como a su topografía abrupta. En igual forma, por su posición al borde de la mesa y por la presencia de capas gruesas de lutitas altamente erosivas, la zona ofrece una inestabilidad potencial alta.

1.2 PROCESOS DE BENEFICIO DE MINERALES

La industria moderna requiere de productos, químicos o metalúrgicos, cada vez de mayor calidad, y cuyas materias primas se obtienen de yacimientos cada vez de menor ley y más complejos. Así, para la explotación económica de estos minerales de baja ley, se requiere de procesos de beneficio de minerales, que separen las especies de interés de aquellas sin valor económico o que contaminen el producto final.

Las diferentes técnicas de separación de los minerales de la ganga se basan en un conjunto de propiedades individuales de los minerales, tales como gravedad específica, susceptibilidad magnética, características ópticas, propiedades superficiales o interfaciales, etc.

El procesamiento de minerales se ocupa primordialmente de la separación de las partículas minerales con base en variaciones de tamaño o de composición. La separación se lleva a cabo suspendiendo las partículas en un medio y haciendo pasar la suspensión a través de un equipo apropiado al que se llama separador. En el separador se aplica una fuerza adecuada a las partículas; y debido a que los materiales tienen diferentes propiedades dependiendo de su composición o tamaño, son afectados en grado variable por la fuerza aplicada. Los que son

movidos por la fuerza tiene una respuesta positiva, y los que no, una respuesta negativa. Obviamente la liberación es un prerequisite para la separación perfecta, aunque en la mayoría de los casos el ideal de la liberación completa puede no ser práctico.

En condiciones ideales, un proceso de separación es aquel que aprovecha una sola propiedad del mineral, si bien en la práctica no se logra tal situación, lo cual impone un límite a la separación.

A veces el elemento constitutivo deseado es un componente que ocurre en más de una forma mineralógica en el mineral, y puede ser necesario utilizar un separador diferente para recuperar cada mineral. Una partícula puede contener más de una fase, como por ejemplo varios minerales, grietas, cavidades y agua incorporada. Como las partículas se producen normalmente por un proceso de reducción de tamaño, cualquier conjunto de partículas tendrá una gama de tamaños de partículas. Para obtener una medida cuantitativa de la propiedad que se esté aprovechando para fines de separación, al valor de la propiedad de una partícula individual se le denomina β .

1.2.1 Eficiencia de separación. El concepto de eficiencia en las operaciones de preparación mecánica de los minerales debe interpretarse con sumo cuidado. Aunque es válida y útil el uso cualitativo del término eficiencia, se originan dificultades al expresarlo cuantitativamente porque normalmente intervienen en su evaluación dos criterios en conflicto, la ley y la recuperación.

No es conveniente expresar la eficiencia como un solo valor, aun cuando esto se hace con frecuencia en la práctica, ya que estrictamente hablando hay un número infinito de combinaciones de ley y recuperación que pueden dar ese valor.

La elección de un procedimiento de tratamiento se hace en función de numerosos criterios, que transforman en cada caso un tipo de especie que puede ser tratada, en el sentido del análisis de los fenómenos pero sobre todo en un sentido empírico, teniendo en cuenta unas analogías que pueden existir con unos ejemplos industriales que presenten cierta similitud, estos criterios se muestran a continuación².

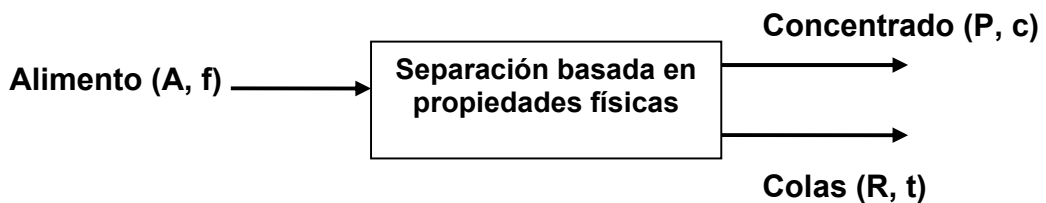
- **Criterio textural.** La mineralización puede presentarse bajo una forma masiva o bajo una forma diseminada. El criterio textural se encuentra a la base del establecimiento de la dimensión de molienda.
- **Criterio de contenido.** Este criterio se añade generalmente a las formas de mineralización diseminadas que se encuentran como base de la ley. Interviene en la elección del procedimiento de separación.
- **Criterio mineralógico.** Este criterio tiene en cuenta la complejidad de las asociaciones minerales. Determina en gran parte el procedimiento de separación. Su realización necesita examen microscópico de la roca en láminas delgadas y secciones pulidas.
- **Criterio físico y químico.** Estos criterios se definen en las Tablas 1 y 2; determinan la elección entre una o varias posibilidades del tratamiento.
- **Criterio económico.** La importancia de la planta a construir impone la elección entre los diferentes métodos, incluso a veces más allá de los resultados metalúrgicos que proporcionan ciertos métodos cuya aplicabilidad está ante todo ligada al tratamiento de los tonelajes restringidos cuyo precio de coste es muy elevado.

² WILLS, B. Tecnología de procesamiento de minerales.

1.3 PROCESOS DE CONCENTRACIÓN³

Una operación de concentración tiene por objetivo separar una mena compuesta por un conjunto de especies mineralógicas útiles y no útiles; en una fracción enriquecida de las especies útiles, llamado concentrado, y una fracción enriquecida de las especies no útiles, llamada colas o relaves. A continuación se describen indicadores metalúrgicos para ser utilizados en operaciones y/o procesos de separación de materiales que estén basados en propiedades físicas de acuerdo con el esquema planteado en la Figura 3.

Figura 3. Esquema de flujo de materiales en una separación.



A, P, R: Cantidad (t, t/h, t/d) de alimento, concentrado y colas respectivamente.

f, c, t: Proporción (% , g/t) de especie valiosa o recuperable en el alimento, concentrado y colas respectivamente.

Previamente se debe realizar los siguientes balances de materiales:

$$\text{Balance Global} \quad \mathbf{A = P + R}$$

$$\text{Balance Fino} \quad \mathbf{A*f = P*c + R*t}$$

³ PARDAVE, Walter. Reciclado industrial de metales. ECOE Ediciones. 2006.

Relacionando las dos ecuaciones anteriores obtenemos:

$$A (f - t) = P (c - t)$$

En una operación de concentración real se obtiene una mezcla de estas especies, en ambos flujos. Las razones de la no idealidad se encuentran en la naturaleza del sólido y en las condiciones de operación del evento de concentración. La naturaleza del sólido determina la magnitud de la propiedad que permite la separación de las especies; y el grado de diseminación y hábito de fractura, los que definen el grado de liberación como una función de la granulometría, y obviamente, la existencia de partículas de composición mixta. La naturaleza y condiciones de operación del método de concentración determinan la magnitud del arrastre de partículas no útiles al concentrado, y de partículas útiles al relave. Los índices que se utilizan para evaluar una operación de concentración son:

- **RECUPERACIÓN (R)**. Expresa la cantidad de material fino obtenido en el producto respecto a la cantidad de material fino que había en el alimento. Así:

$$R = \left(\frac{P}{A} \right) \left(\frac{c}{f} \right) * 100\%$$

- **RAZÓN DE CONCENTRACIÓN (K)**. Indica el número de partes que es necesario alimentar el proceso para obtener 1 t de concentrado. Así:

$$K = \left(\frac{A}{P} \right)$$

- **ÍNDICE DE SELECTIVIDAD (I.S).** Indica el grado de selectividad del proceso logrado en la separación. Así:

$$I.S. = \left\langle \frac{c}{t} \right\rangle^{\frac{1}{2}}$$

- **RAZÓN DE ENRIQUECIMIENTO (K.E).** Expresa el número de veces que aumenta la proporción o el tenor de la especie valiosa en el concentrado respecto al contenido que tenía el alimento.

$$K.E = \left(\frac{c}{f} \right)$$

- **INDICADOR DE CONCENTRACIÓN (I.C.).** Es un indicador importante para reunir los anteriores indicadores en uno sólo, para tener mayor representatividad de un dato con fines de compara 2 o más procesos de concentración y esta expresado por:

$$I.C = \left(\frac{R}{K} \right) \left(\frac{c}{t} \right)$$

En donde el I.C. debe ser lo mayor posible. Sin embargo, comúnmente un solo índice no caracteriza totalmente una operación de concentración, por lo cual se usan gráficos que relacionan dos o más factores.

1.3.1 Mesa de sacudimientos Wilfley. La concentración gravimétrica es un proceso de separación física aplicado a especies de minerales, que efectúa la separación de partículas por el diferencial en sus gravedades específicas y su movimiento relativo en función a la gravedad y algunas otras fuerzas como la resistencia al flujo viscoso.

Este método de concentración consiste en un plano o tablero, rectangular o romboidal ligeramente inclinado, que tiene pendiente ajustable. La superficie esta constituida usualmente de madera revestida con materiales de alto coeficiente de fricción, tales como linóleo, caucho, plástico o fibra de vidrio, ver la Figura 4.

Figura 4. Mesa Wilfley.

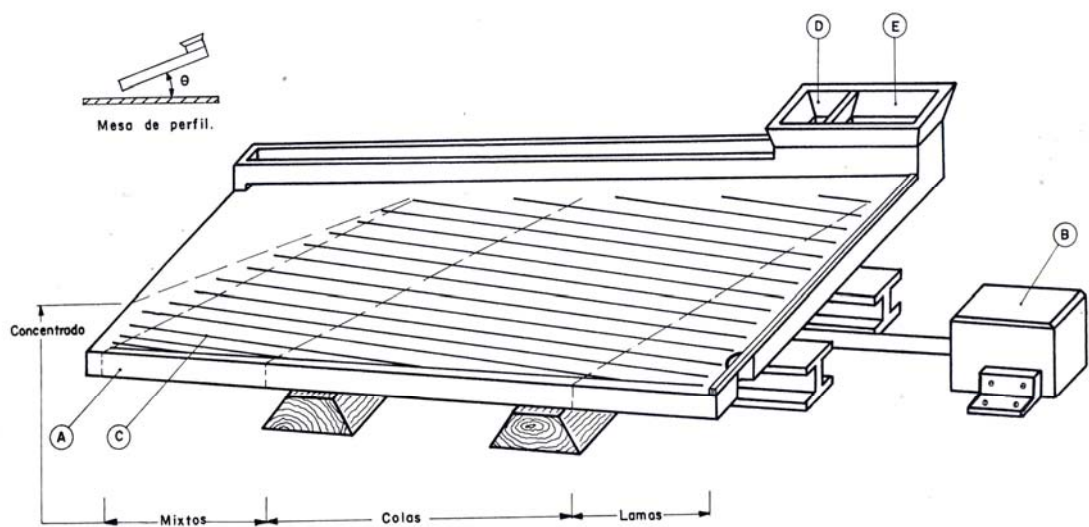


Fuente: Planta de Aceros “Álvaro Quiroga Correa”. U.I.S.

El tablero esta provisto de una serie de listones, resaltes o rifles generalmente paralelos entre si, en dirección paralela al movimiento de la mesa o formando un ángulo con respecto a este. Los rifles van disminuyendo de tamaño a lo largo del tablero ya que son más altos del lado de alimentación. A lo largo del borde

superior del tablero existe un distribuidor de agua de lavado, con dispositivos que permiten regular el reparto de agua para graduar junto con: el caudal de entrada y la inclinación; la intensidad de la corriente transversal de agua. La descarga de los productos son recogidos en canales paralelos a los bordes de la mesa. Ver la Figura 5.

Figura 5. Esquema y zonas de acción de la Mesa de sacudimientos Wilfley



- A. Tablero plano aproximadamente rectangular.**
- B. Cabezal de la mesa.**
- C. Rifles o listones.**
- D. Agua de lavado.**
- E. Caja de alimentación.**

Fuente: Conferencias Mesa de sacudimientos Wilfley. Pedraza Julio, U.I.S.

A. Variables del proceso. La mesa concentradora tiene un considerable número de variables de operación, las cuales se presentan a continuación:

➤ **Velocidad de trabajo:**

- Velocidad del motor.
- Tamaño de la polea.

➤ **Carrera:**

- Ajuste de la conexión articulada o vibrador.

➤ **Controles de operación:**

- Inclinación de la mesa.
- Densidad de la pulpa de alimentación.
- Agua de lavado.
- Posición de los partidores del producto.

➤ **Variables de diseño:**

- Forma de la mesa.
- Material de la superficie de la mesa.
- Forma de las tiras separadoras
- Patrón de distribución de las tiras.
- Aceleración y desaceleración.

B. Parámetros de la mesa.

➤ **Golpe:** (amplitud y frecuencia). Los golpes largos con velocidades relativamente bajas son mejores para alimentaciones gruesas, mientras que lo contrario se utiliza para alimentación fina.

➤ **Inclinación:** (lateral y longitudinal). La inclinación lateral es el desnivel que existe entre el extremo de alimentación hasta el extremo de descarga de colas, idealmente debe ajustarse al mínimo posible para tener una buena distribución del mineral de yeso. La inclinación longitudinal es el desnivel entre el extremo de

alimentación y el extremo de descarga de concentrados, esta inclinación debe ser moderada para que las partículas de mayor densidad escalen mas rápidamente que las livianas, de tal forma que halla una buena separación entre concentrados, mixtos y colas. Pero es indudable que las condiciones óptimas pueden únicamente ser determinadas en la práctica experimental. La inclinación de la mesa determina la fuerza de arrastre del líquido. La alimentación introducida contiene generalmente un 10% a 25% de sólidos en peso. La inclinación, la cantidad de agua de lavado y las características de la alimentación afectan la posición de las bandas, en que se descargan las varias fracciones.

La velocidad de impulso generalmente oscila entre 180 y 270 impulsos por minuto y la amplitud entre $\frac{1}{2}$ y $1 \frac{1}{2}$ pulgada. Estos dos parámetros, dependen del tamaño de las partículas en la alimentación: entre más finas las partículas de alimentación, más veloz y corto el impulso comunicado⁴.

C. Movimiento de partículas. La alimentación de partículas entra a la mesa por la esquina superior en forma de pulpa, sobre la superficie del tablero están expuestas a dos fuerzas: una debido al flujo de la película de agua y otra perpendicular a la anterior, debido a la vibración longitudinal. El flujo de la película de agua incide en los granos minerales que tienden a ser lavados en dirección de la pendiente, pero se les impide dicho movimiento por medio de los rifles. En los espacios inter-rifles, las partículas se estratifican de tal modo que las más finas y pesadas quedan en el fondo, mientras que las gruesas y livianas se colocan en la parte superior.

El movimiento vibratorio permite que las partículas avancen a lo largo del eje mayor de la mesa, este movimiento consiste en un golpe lento hacia delante y un movimiento rápido de retorno, sin embargo las partículas mas densas continúan

⁴ PEDRAZA, Julio Elías. Conferencias Mesa de sacudimientos Wilfley. U.I.S. 1985.

deslizándose y avanzando durante la mayor parte del golpe de retorno debido al momento ganado (en función de la masa de la partícula y la velocidad adquirida).

D. Ventajas del proceso. La mesa puede ser capaz mediante un buen funcionamiento de procesar un amplio rango de tamaños de partículas con una buena recuperación y rendimiento.

Es ideal para una concentración de menas de baja ley o minerales de bajo costo; y tiene las siguientes ventajas:

- Permite obtener una gama de productos (concentrados, mixtos, colas).
- Comportamiento visible del material sobre el tablero.
- Gran flexibilidad.
- Manejo y supervisión relativamente simple.
- Alto grado de enriquecimiento.
- Descarga de los productos en forma continua.
- Fabricación local posible en talleres experimentados.

E. Criterio de concentración⁵. Determina la capacidad que tienen dos minerales de separarse en función de la gravedad y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Criterio de concentración (C.C.)} = (\rho_1 - \rho) / (\rho_2 - \rho)$$

En donde:

ρ_1 = peso específico del mineral pesado.

ρ_2 = peso específico del mineral liviano.

ρ = peso específico del fluido, generalmente agua, ($\rho = 1$).

⁵ RODRÍGUEZ, W. Estudio mineralúrgico de concentración gravimétrica para la recuperación de oro a partir de arenas cianuradas. Escuela superior politécnica del litoral. Guayaquil. Ecuador. 1996.

- ▶ Cuando C.C. es mayor o igual a 2.5. La separación gravimétrica es realizable para todos los rangos granulométricos superiores a malla 200.
- ▶ Cuando C.C. esta entre 2.5 y 1.75. La separación es efectiva para granulometrías superiores a malla 100.
- ▶ Cuando C.C. esta entre 1.75 y 1.5. La separación es efectiva para granulometrías superiores a malla 10.
- ▶ Cuando C.C. esta entre 1.5 y 1.25. La separación es posible pero dificultosa, para granulometrías superiores a malla 10.
- ▶ Cuando C.C. es menor que 1.25. La separación gravimétrica no es aplicable económicamente, con la tecnología actual.

En general la mesa trabaja sobre unos productos bastante gruesos y proporcionan un concentrado definitivo y un estéril a retratar. El tamaño máximo de las partículas no debe exceder a los 2.5 mm y para medidas inferiores a 0.1 mm, los resultados son negativos.

La capacidad de una mesa Wilfley es:

- 4.17 t/h para partículas de 2.5 mm.
- 0.58 t/h para partículas de 0.8 mm.
- 0.42 t/h para partículas de 0.4-0.1 mm.

En resumen se puede recomendar:

- ▶ Alimentación Fina: poco agua, menos alimentación, mayor velocidad y menor amplitud.
- ▶ Alimentación Gruesa: más agua, más alimentación, menor velocidad y mayor amplitud.

1.3.2 Espiral Humphreys. Está constituida por una serie de elementos de sección elíptica ensamblados según una espiral. El sistema de concentración esta compuesto de una canoa helicoidal que forma el cuerpo principal. La pulpa es introducida en la Caja de alimentación por la parte superior del espiral, desciende bajo el efecto combinado de la fuerza de gravedad y la fuerza centrífuga, generada por el desplazamiento circular del fluido. En estas condiciones, se produce una clasificación por tamaño y densidad. Las partículas pequeñas y densas que sedimentan primero, son arrastradas hacia el centro del espiral, en tanto las partículas gruesas y livianas son mantenidas en los bordes, debido a los efectos de la fuerza centrífuga, la cual es más importante en la parte externa del espiral. Tiene un dispositivo llamado partidores o **splitters**, ajustables para controlar y recolectar los concentrados, mixtos y colas. Requiere una alimentación regular, con una baja proporción de lamas, en lo posible se requiere eliminarlas dado que aumenta la viscosidad de la pulpa, reduciendo la separación y eventualmente impide el adecuado control visual del proceso de concentración. Ver fotografía de la Figura 6.

Figura 6. Espiral Humphreys.



Fuente: Planta de Aceros “Álvaro Quiroga Correa”. U.I.S.

A. Ventajas del proceso. El tratamiento por separadores en espiral, implica el uso de gran número de unidades, la eficiencia de la separación es muy sensitiva al sistema de distribución de pulpa que se emplea. La falta de uniformidad en la alimentación da por resultado caídas sustanciales en la eficiencia de la operación y lleva severas pérdidas en la recuperación.

Estas son algunas ventajas operativas del proceso:

- Permite obtener una gama de productos (concentrados, mixtos, colas).
- Comportamiento visible del material.
- Manejo y supervisión simple.
- Descarga de los productos en forma continúa.
- Alta capacidad (hasta 50 t/d para un espiral simple).
- No requiere motor.

B. Parámetros del proceso⁶. Los espirales están hechos con pendientes de inclinación variable. Los ángulos poco profundos se usan para las operaciones más difíciles que implican pequeña diferencia en la gravedad específica, los ángulos más inclinados proporcionan mayores capacidades pero producen concentrados de grado relativamente bajo con alta recuperación.

▶ Variación de la pulpa de alimentación de entre 15% y 45% de sólidos en peso y con variaciones dentro de un tamaño de 3 mm. a 0.075 mm.

▶ La capacidad varía de 1 a 3 ton/h con espirales de baja pendiente, y de 2 a 6 ton/h con unidades más inclinadas.

▶ La longitud del espiral normalmente es de cinco o más vueltas para trabajo desbastador y tres vueltas para unidades de limpia.

⁶ WILLS, B. Tecnología de procesamiento de minerales.

Normalmente se usan porcentajes de pulpa entre 15% y 45% de sólidos, los rendimientos se ven fuertemente afectados cuando las pulpas son alimentadas en forma muy diluida. Existen espirales de 5 y 3 vueltas para el tratamiento de los minerales, y espirales de 6 vueltas para el tratamiento de los carbones. Una espiral puede actuar sobre partículas de dimensiones entre 3 y 0.075 mm. La capacidad de un aparato es de 0.500 a 2.500 Ton/h, las cantidades de agua varían de 3.5 a 7.5 m³/h, el consumo en agua de lavado es del orden de 0.7 a 1.5 m³/h.

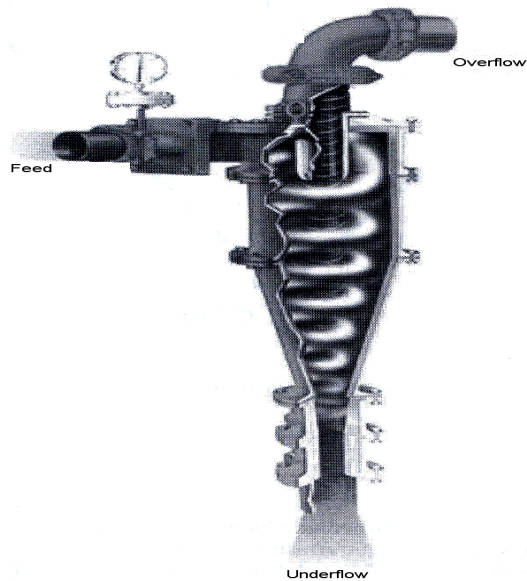
1.3.3 Hidrociclón. El principio de operación se basa en el concepto de velocidad terminal de sedimentación de una partícula sólida en un campo centrífugo. La manera mas simple de utilizar la fuerza centrífuga para la separación son los hidrociclones. En realidad no es un centrifugador; ya que la separación centrífuga es producida por el movimiento del lodo, inducido por la inyección del material de alimentación de manera tangencial.

El flujo de ingreso, entra tangencialmente (**inlet**) en la sección cilíndrica del ciclón que seguirá un camino circular con un flujo revertido de fluido desde afuera al eje del vortice (**vortex finder**). El campo centrífugo generado por las velocidades tan altas de circulación crea un cono de aire en el eje que normalmente se extiende hasta la apertura guía (**spigot**) en la base de la sección cónica (**air core**) a través del vortice y hasta la sección de reborde o rebosamiento en la parte superior (**overflow**). Para que esto ocurra la fuerza centrífuga debe ser mucho mayor que la gravitacional.

Las partículas que caen dentro del campo centrífugo tenderán a moverse hacia afuera en función de la mayor densidad. Las mayores, y más pesadas migran rápidamente a las paredes de fuera de la sección cilíndrica y posteriormente forzadas a caer al interior de la pared cónica. Las partículas pequeñas, serán sin

embargo atraídas hacia dentro por el fluido a medida que se mueven hacia el vortice. Ver la Figura 7.

Figura 7. Esquema de un hidrociclón.

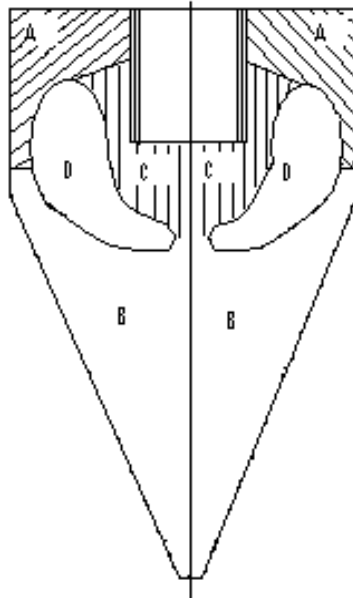


Fuente: Tecnología de procesamiento de minerales. B. A. Wills.

La separación sólida ocurrirá durante la suspensión a lo largo del recipiente del ciclón, de manera que genera lodo denso en la pared más externa, que permite el flujo continuo del ciclón en la boquilla de retraso.

El trabajo experimental realizado por Renner y Cohen ha mostrado que la clasificación no se presenta a través de todo el cuerpo del hidrociclón como lo postula el modelo clásico. Usando una prueba de alta velocidad, se tomaron muestras de varias posiciones seleccionadas. Los resultados mostraron que el interior del ciclón se puede dividir en cuatro regiones que contienen distribuciones de tamaño claramente diferenciadas. Ver Figura 8.

Figura 8. Regiones de distribución de tamaño dentro del hidrociclón.



Fuente: Tecnología de procesamiento de minerales. B. A. Wills.

La alimentación intrínsecamente no clasificada existe en una estrecha región **A** adyacente a la pared del cilindro y techo del ciclón. La región **B** ocupa una parte muy grande del cono del ciclón y contiene material grueso clasificado en su totalidad, es decir, la distribución de tamaño es prácticamente uniforme y se asemeja a la del producto de descarga grueso. En forma similar, el material fino completamente clasificado queda contenido en la región **C**; y la clasificación sólo ocurre en la región **D** en forma de toroide.

A. Variables del proceso. Las variables que afectan el rendimiento del hidrociclón pueden dividirse en dos grupos: las que dependen del tamaño y las proporciones del hidrociclón (variables de diseño), y las que son independientes del tamaño y las proporciones (variables de operación).

Las variables de diseño son los tamaños de alimentación, y las aberturas de derrame y de descarga inferior, el tamaño del hidrociclón y su forma. Las variables de operación dependen de la corriente de alimentación y comprenden:

- Caída de presión y rapidez de flujo de la alimentación.
- Concentración de los sólidos (pulpa % de sólidos).
- Tamaño y forma de los sólidos (granulometría).
- Densidades de los sólidos y Viscosidad media del líquido.

Debido a que muchas de estas variables ejercen interacción, no es posible considerarlas en forma individual. En vez de esto, se evalúa el rendimiento del hidrociclón en función de correlaciones aplicando tres criterios: la curva de rendimiento, la relación de derrame a descarga inferior y la caída de presión.

El significado de las correlaciones en el hidrociclón es obviamente muy complejo, a pesar de la simpleza mecánica del dispositivo. En general, sería de esperarse que las relaciones teóricas fueran inferiores a las empíricas, debido a las simplificaciones que deben hacerse.

Puesto que las variables de operación tienen un efecto importante sobre el rendimiento del ciclón, durante la operación es necesario evitar la fluctuación en la velocidad de flujo. La sobrepresión de la bomba se debe eliminar ya sea por control automático del nivel en el pozo colector o por un colector auto-regulado y se debe instalar una capacidad de compensación adecuada para eliminar las fluctuaciones en la velocidad de flujo.

B. Parámetros del proceso.

► **Presión.** Generalmente la caída de presión se determina mediante un medidor de la presión de alimentación, localizado sobre la corriente ascendente del ciclón

algo distante de la línea de admisión. Un incremento del caudal de alimentación, dentro de los límites, mejorará la eficiencia por el incremento de la fuerza centrífuga sobre las partículas. Siendo constantes todas las otras variables.

► **Porcentaje de sólidos en la pulpa**⁷. El efecto de aumentar la densidad en la pulpa de alimentación es complejo, ya que la viscosidad efectiva de la pulpa y el grado de asentamiento obstruido se incrementan dentro del ciclón. La claridad de la separación disminuye con el incremento de la densidad de la pulpa, y el punto de corte se eleva debido a la resistencia más grande al movimiento del remolino dentro del ciclón, lo cual reduce la caída de presión efectiva. La separación a tamaños más finos solamente se logra con alimentaciones de bajos contenidos de sólidos y una gran caída de presión.

Normalmente, la concentración de alimentación no es más grande que alrededor de 30% de sólidos en peso, pero para las operaciones de molienda en circuito cerrado, donde frecuentemente se necesitan separaciones relativamente gruesas, muchas veces se usan altas concentraciones de alimentación de hasta un 60% de sólidos en peso, combinados con bajas caídas de presión, muchas veces menores a 68.9 Kpa.

C. Ventajas del proceso. Las ventajas principales de un hidrociclón se centran en torno a su sencillez, su tamaño reducido y su bajo costo en comparación con el equipo competitivo. La sencillez se debe a sus formas rectas y a su carencia de partes en movimiento. En caso necesario pueden construirse hidrociclones eficaces a partir de tambores usados, extendiéndose la gama de fabricación hasta los hidrociclones perfectamente bien conformados con secciones interiores intercambiables para atender su alto desgaste. Si el hidrociclón es pequeño, son

⁷ WILLS, B. Tecnología de procesamiento de minerales.

pocas sus exigencias en cuanto a soportes reforzados. Además, las intensas fuerzas de separación que obran en su interior, permite que se le trabaje en cualquier posición, aunque normalmente se le instala con el ápice hacia abajo para permitir la libre descarga del producto inferior. El ahorro de espacio en el caso de la clasificación puede ser importante.

Los menores costos de inversión que resultan de esta simplicidad pueden ser parcialmente contrarrestados por la necesidad de una unidad de bombeo de mayor capacidad para vencer la pérdida de presión adicional causada por el hidrociclón. Como resultado, el hidrociclón utiliza mas energía que otros equipos, aunque la diferencia puede no ser tan grande como se espera, ya que la mayoría de los otros equipos requieren una bomba para transportar ya sea la alimentación o el producto. En términos generales, un hidrociclón es inflexible una vez que este en operación, ya que su rendimiento satisfactorio continuado requiere de una alimentación estable. En algunos casos, una alteración de la alimentación puede producir un cambio de comportamiento que agrava el efecto perjudicial de la alteración de la alimentación.

1.3.4 Flotación. Es una técnica que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales del mineral, o especie de valor, y la ganga. Específicamente, se basa en la naturaleza hidrofóbica (o aerofílica) de la superficie de las partículas, cuya magnitud permite que dichas superficies sean mojadas preferentemente por el aire o por el agua. Así, la técnica para lograr la efectiva separación, se basa en la adhesión de algunos sólidos a burbujas de gas (usualmente aire) generada en la pulpa por algún medio externo, en la celda de flotación, ver la Figura 9.

Las burbujas de aire transportan los sólidos a la superficie, donde son recolectados y recuperados como concentrado (**overflow**). La fracción que no se

adhiera a las burbujas permanece en la pulpa y constituye las colas o relave (**underflow**). De este modo, la condición de flotabilidad es una fuerte adhesión entre las partículas útiles y burbujas, que sea capaz de soportar la agitación y turbulencia en la celda. Estas partículas se dicen hidrofóbicas, o repelentes al agua, al contrario de las partículas que constituyen el relave o colas, que son hidrofílicas.

Figura 9. Celda de flotación Denver.



Fuente: Planta de Aceros “Álvaro Quiroga Correa”. U.I.S.

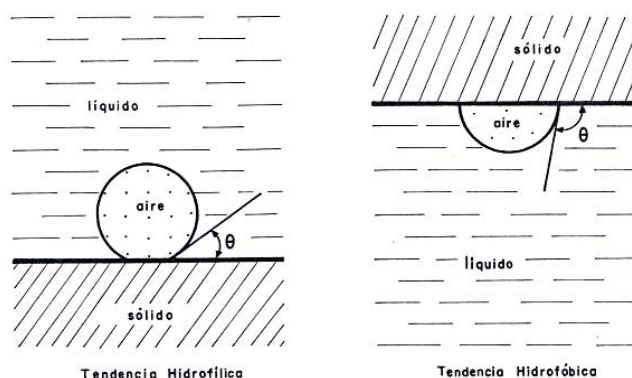
Para la mayoría de los minerales no metálicos, se logra un adecuado grado de liberación moliendo a tamaños cercanos entre 300 μm (48 mallas) y 180 μm (80 mallas). Partículas de mayor tamaño se sueltan de las burbujas portadoras, por su mayor peso; en tanto que las partículas muy finas no tienen el suficiente impulso para producir un encuentro efectivo partícula burbuja ⁸.

⁸ CONCHA, F. Avances de flotación. Escuela de minas, Universidad de Concepción, Chile..

En la flotación de minerales metálicos las partículas son mas pequeñas que en la de minerales no metálicos. El proceso de flotación, de esta manera, está gobernado por una gran cantidad de variables, las que interactúan entre sí, y cuyo conocimiento contribuirá a comprender mejor el proceso en sí, y obtener finalmente un mejor rendimiento en aplicaciones prácticas. Sea de una o de otra forma, el principio general de flotación siempre es el mismo y se trata fundamentalmente del comportamiento de los sólidos frente al agua, o sea mojabilidad de las materias. El fenómeno de flotación es un proceso teóricamente complejo, que ha sido profundamente estudiado. Además del principio anterior, encierra otros conceptos como: ángulo de contacto, análisis termodinámico de las superficies, trabajo de cohesión-adhesión partícula burbuja, adsorción y otros.

En un sistema trifásico sólido-liquido-gas, se puede definir el ángulo de contacto, como el ángulo θ formado por el plano tangente a la interfase sólido-liquido. Así, una burbuja de aire adherida a la superficie de un sólido y en el equilibrio, el ángulo de contacto será el ángulo θ mostrado en la Figura 10.

Figura 10. Formación del ángulo de contacto (burbuja adherida a un sólido).

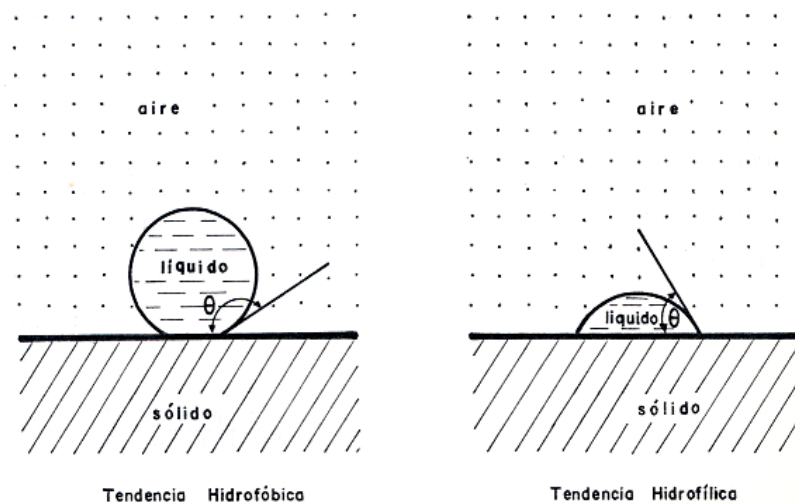


Fuente: Sutulov, Alexander. Flotación de minerales. Universidad de Concepción. Instituto de investigaciones Tecnológicas. Concepción, Chile, 1963. 101 – 162 pp.

Del mismo modo será para una gota de líquido adherida a la superficie de un sólido, como se muestra en la Figura 11. Se observa que este ángulo se medirá siempre por dentro de la fase líquida⁹.

El concepto de ángulo de contacto y su equilibrio, da una idea de la mojabilidad del sólido, fundamental en el proceso de flotación; se tendrá entonces que, cuando un líquido moja completamente un sólido, el ángulo de contacto θ será igual a cero y la superficie se denominará mojable o hidrofílica.

Figura 11. Formación del ángulo de contacto (gota de líquido adherida a un sólido).



Fuente: Sutulov, Alexander. Flotación de minerales. Universidad de Concepción. Instituto de investigaciones Tecnológicas. Concepción, Chile, 1963. 101 – 162 pp.

⁹ SUTULOV, A. Flotación de minerales. Universidad de Concepción. Instituto de investigaciones Tecnológicas. Concepción, Chile, 1963. 101 – 162 p.

Por otra parte, cuando θ es mayor que cero grados, indica mojabilidad parcial y mientras mayor sea el ángulo de contacto, menor será la mojabilidad, denominándose la superficie, no mojabla o hidrofóbica (aerofílica). Teóricamente, el ángulo de contacto θ , se puede calcular, conociendo las tensiones interfaciales ϕ del sistema. Una formula entre otras para este cálculo, fue dada por Young:

$$\cos \theta = \frac{\phi_{SG} - \phi_{SL}}{\phi_{LG}}$$

ϕ_{SG} = Tensión superficial en la interfase (sólido-gas).

ϕ_{SL} = Tensión superficial en la interfase (sólido-liquido).

ϕ_{LG} = Tensión superficial en la interfase (liquido-gas).

En la práctica, se puede medir el ángulo de contacto por diversos métodos como:

- ▶ Método de la placa.
- ▶ Método de la forma de burbujas o gotas adyacentes.
- ▶ Método del ascenso capilar.

Los ángulos de contacto medidos sobre superficies irregulares difieren de los ángulos medidos sobre superficies lisas y esta irregularidad se describe en la ecuación de Henzel:

$$r = \frac{\cos \theta(\text{rugoso})}{\cos \theta(\text{verdadero})}$$

Aplicando el anterior concepto a la flotación, se puede observar que, existe una cantidad restringida de materiales que poseen alta flotabilidad natural, que se definen como aquellas partículas no mojables (completamente hidrofóbicas) que

no necesitan reactivos especiales para aumentar su rendimiento de flotación y ello se explica, en que dichos minerales no presentan interacción con el agua, presentando una baja energía superficial. Tal es el caso de minerales como: talco, yeso, grafito, molibdenita, azufre y otros¹⁰.

El otro grupo de minerales corresponde a aquellos a los cuales se les puede aplicar el proceso de flotación para su beneficio y se requiere la adición de ciertos reactivos de flotación que proporcionarán las condiciones necesarias para la eficiente evolución del proceso, las partículas que deseen flotar, deberán tener bastante afinidad por el medio gaseoso (burbujas) o en otros términos ser hidrofóbicas y las que no deseen flotar, deberán ser hidrofílicas o tener gran afinidad por el líquido, para lograr conservarlas en la pulpa mineral. Visto el proceso de esta forma, proporciona una manera de diferenciar entre varios minerales sus posibilidades de flotación, conservando las condiciones y características de los reactivos constante.

Todo lo anterior implica una suficiente habilidad para modificar las superficies minerales, de modo que se pueda convertir una partícula mineral hidrofílica a hidrofóbica o lo contrario, utilizando los reactivos de flotación.

A. Variables de flotación. Existen muchas variables que influyen en menor o mayor grado en el proceso de flotación y que necesitan ser controladas, entre ellas tenemos: el pH, la temperatura, la densidad de pulpa, tiempo de residencia, granulometría.

- **pH de flotación.** La flotación es sumamente sensible a los cambios de pH, especialmente cuando se trata de flotación selectiva. Cada combinación particular de reactivos tiene un pH óptimo de eficiencia, de ahí su importancia en el proceso.

¹⁰ LASKOWSKI, J. Fundamentos fisicoquímicos de la mineralurgia. Universidad de Concepción. Chile.

- **Temperatura.** La temperatura juega un papel importante en el proceso, ya que una temperatura apropiada y un tiempo óptimo es posible variar notablemente la hidrofobicidad del mineral.
- **Densidad de pulpa.** Una práctica usual en pruebas de laboratorio es conducir la flotación primaria “**rougher**” en pulpas de 25% a 35% de sólidos. Densidades mas altas son aceptables cuando sube la gravedad específica de los de los sólidos del mineral, de lo contrario las desventajas que ofrece una pulpa demasiado densa de 40% de sólidos o más, son la reducción drástica en la cinética de la flotación y la disminución de las recuperaciones. Su importancia radica en que existe un porcentaje de sólidos óptimo para el proceso; además esto afecta el tiempo de residencia del material en el circuito de flotación.
- **Tiempo de residencia.** Existen en flotación dos tiempos fundamentales: tiempo de acondicionamiento, que se define como el tiempo que transcurre desde que se agregan los reactivos hasta cuando se coloca en funcionamiento el sistema de aireación del equipo, estando siempre la pulpa mineral agitada, permitiendo un contacto adecuado entre el mineral y los agentes de flotación acondicionando el sistema. El otro tiempo, corresponde al llamado tiempo de flotación propiamente y se inicia cuando es conectado el sistema de aireación; su duración es dependiente de la cinética o velocidad con la que flota el mineral y de la selectividad misma que se desea en el proceso.
- **Granulometría.** Para la mayoría de los minerales, se logra un adecuado grado de liberación moliendo a tamaños cercanos a 0.1 mm (150 mallas); partículas de mayor tamaño se sueltan de las burbujas portadoras, por su mayor peso; en tanto que las partículas muy finas no tienen el suficiente impulso para producir un encuentro efectivo partícula burbuja.

Los sistemas burbuja-mineral se mueven en un fluido que desarrolla unas fuerzas de fricción. Cuando la fuerza de adhesión entre la burbuja y el mineral es inferior a la fuerza de fricción del mineral con el fluido, el sistema burbuja-mineral se desagrega. Por ello, la fuerza de la fricción aumenta con el diámetro de las partículas. La turbulencia de la celda tiende también a dispersar los agregados tanto más fácilmente en cuanto que éstos estén constituidos por partículas gruesas. Una aireación violenta tiene un efecto semejante. T. M. Morris (1952) muestra que cuanto más finas son las partículas más grande es la probabilidad de tener un sistema resistente a la dispersión.

B. Compuestos químicos en la flotación. Los compuestos químicos se emplean en la flotación de mineral de yeso con dos objetivos principales: comunicar propiedades hidrofóbicas que les permitan adherirse a las burbujas de gas y dotar a las películas de estas burbujas de estabilidad.

► **Colectores.** El colector es el corazón del proceso de flotación; es el reactivo que produce la película hidrofóbica sobre la superficie de las partículas de mineral de yeso. Son compuestos orgánicos de carácter heteropolar, cuya función principal es la de proporcionar propiedades hidrofóbicas o aerofílicas a las superficies de los minerales. Su grupo polar es la parte activa que los une a la superficie de un mineral, con base en un mecanismo de adsorción química o física. La interpretación de este fenómeno contempla la eliminación de una parte de la capa hidratada con formación de un contacto trifásico entre el aire, el agua y el mineral. Las interfases sólido-líquido y líquido-gas son de gran importancia en la formación de un contacto estable y es precisamente la función de un colector el influirlas en la dirección deseada.

Un colector ideal debe cumplir con los siguientes aspectos:

- Efecto colector fuerte.
- Selectividad del mineral alta.
- Estabilidad (rango de pH alto, almacenamiento).
- Facilidad de solubilidad en el agua.
- Bajo costo.
- Disponibilidad en el mercado.

La concentración del colector es directamente responsable del tamaño de las burbujas, y por tanto de la suma de las intercaras liquido-aire ofrecida a las partículas minerales y por consecuencia de la mineralización de las espumas.

▶ **Espumantes.** Son compuestos heteropolares orgánicos, el radical orgánico no polar repele el agua, mientras que la posición polar atrae el agua. La escogencia del espumante y la cantidad del mismo requerido en la flotación es extremadamente importante. Su función principal reside en la formación de una espuma estable. Sin embargo actúan ampliamente sobre la distribución de las burbujas en la pulpa y sobre su velocidad de ascensión. Esta última es, en efecto, afectada por las deformaciones y por un trayecto ascensional en zig-zag o en espiral. En presencia de un agente tenso activo, una burbuja tendrá un comportamiento de esfera sólida; el tamaño por el cual su velocidad es la de una esfera rígida es mas reducida que en la ausencia de un agente tenso activo.

▶ **Modificadores de pH.** Los reguladores de pH mas comunes son: el hidróxido de sodio (NaOH) y el ácido clorhídrico (HCl) y son utilizados para aumentar o reducir el pH respectivamente.

A nivel industrial, la flotación se realiza en sistemas de celdas en serie y cada uno puede realizar un tipo determinado de flotación, que puede ser:

- Flotación primaria o **ROUGHER**.
- Flotación de limpieza o **CLEANER**.
- Flotación de relimpieza o **RECLEANER**.
- Flotación de barrido o **SCAVENGER**.

En la flotación primaria, se hace un desbaste o concentración, buscando máxima recuperación sin importar la pureza del concentrado; en la flotación de limpieza interesa más la pureza del concentrado sin importar la recuperación; en la relimpieza se pretende obtener el máximo grado de pureza sin importar la recuperación y en la de barrido, se pretende buscar la máxima cantidad de mineral valioso, sin importar la pureza.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

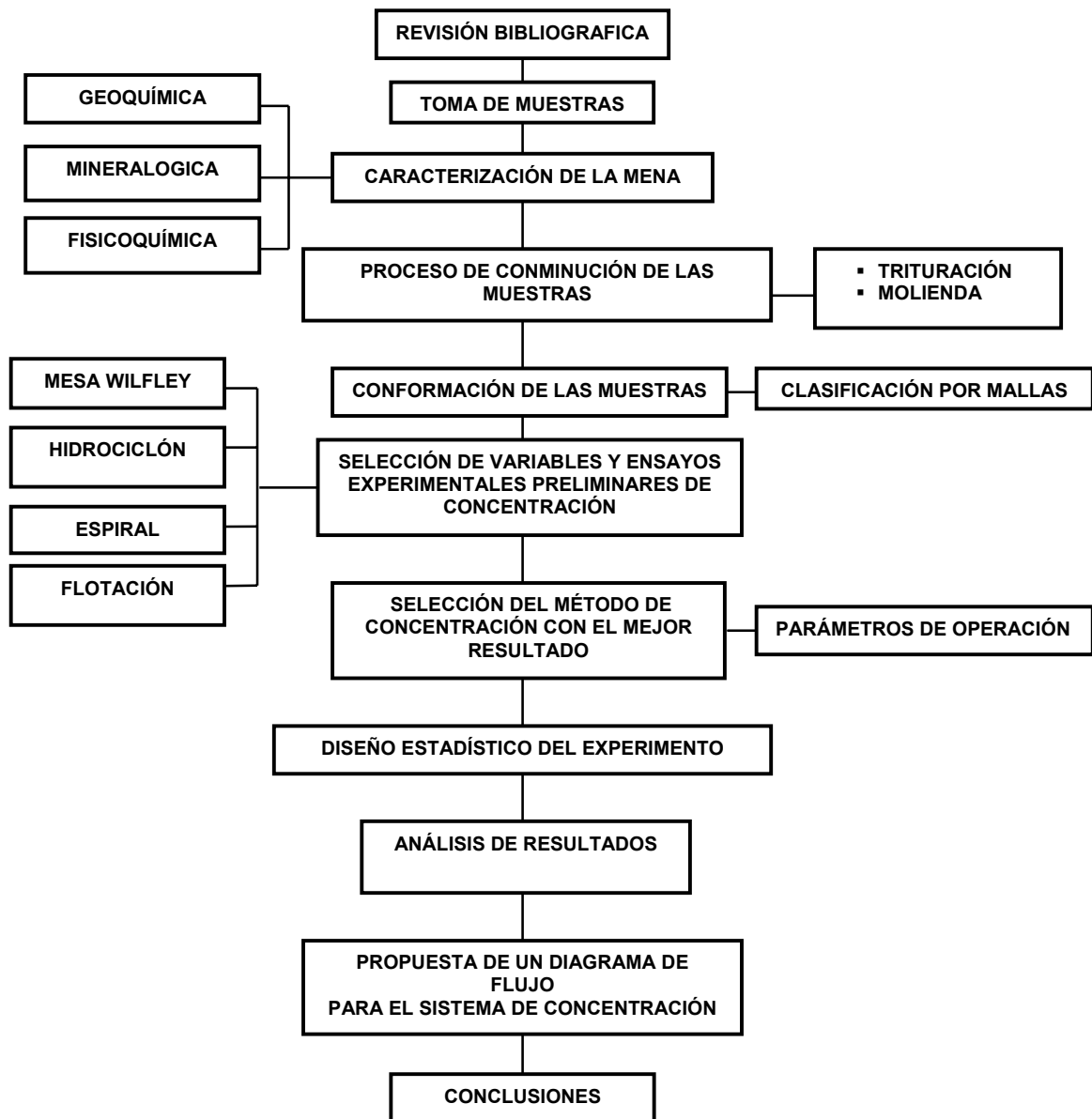
El proyecto se desarrollo a través de las siguientes etapas:

- Revisión y análisis de la bibliografía consultada.
- Muestreo de la mena.
- Caracterización del mineral.
- Pruebas preliminares de beneficio en el mineral de yeso (Mesa de sacudimientos Wilfley, Hidrociclón, Espiral Humphreys y Flotación).
- Selección del método con mejores resultados de concentración.
- Diseño de experimentos para el sistema seleccionado.
- Propuesta del diagrama de flujo para el sistema de concentración.
- Elaboración del informe final.

Adicional a las etapas anteriores se llevo a cabo un breve análisis geológico, con el objeto de tener un conocimiento detallado del yacimiento en estudio y específicamente del área de la mina la Nacuma.

En la Figura 12. Se presenta un diagrama de la metodología experimental.

Figura 12. Metodología experimental utilizada.



Fuente: Autor

2.1 MUESTREO DE LA MINA EN ESTUDIO

En esta actividad, realizada por el autor del trabajo de grado con la asesoría del geólogo Rafael Hernando Rincón, jefe de minas de la empresa CEMEX COLOMBIA S.A. Se tomaron muestras de 3 mantos (Churca, Lajeo y Enchaquetada), aprovechando el método de explotación que actualmente tiene la empresa. Se tomaron muestras representativas de cada manto, midiendo su respectivo espesor.

Figura 13. Frente de explotación.



Fuente: Autor.

En total se recolectaron aproximadamente 200 Kg. de muestras de los frentes de explotación, las cuales fueron llevadas al laboratorio, para su posterior análisis, en bolsas que protegían del contacto con el medio ambiente para evitar su contaminación. Una fotografía de este yacimiento se muestra en la Figura 13.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL EN ESTUDIO

Se realizó con el fin de determinar las características de la mena en los diferentes niveles de cada frente de explotación, con el propósito de definir las operaciones y procesos metalúrgicos más adecuados para su beneficio. Los métodos de análisis y ensayo utilizados para la caracterización del mineral se presentan en el Anexo A. Las muestras recolectadas fueron secadas al ambiente y luego trituradas, hasta obtener un tamaño de partícula menor de 5 mm. Por cuarteo se tomó una muestra representativa para realizar los posteriores análisis que se describen a continuación.

2.2.1 Caracterización geoquímica y mineralógica. Se determinaron las especies mineralógicas presentes en los mantos de manera cualitativa y cuantitativa, aplicando la técnica por difracción de rayos X, la cual fue realizada en el laboratorio de Difracción de rayos X de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. Además se realizaron análisis de difracción de rayos X, en el laboratorio de la empresa CEMEX COLOMBIA S.A. ubicado en la planta Caracolito (Ibagué); pero estos fueron de carácter cualitativo (determinación de especies mineralógicas solamente).

2.2.2 Caracterización fisicoquímica. Se llevo a cabo con el fin de determinar los siguientes parámetros:

- Distribución granulométrica.
- Densidad real.
- Humedad.

Para la determinación del porcentaje de humedad de mina, las muestras recolectadas de la mina se transportaron en bolsas selladas con el fin de evitar la pérdida del agua presenta en las muestras, el procedimiento se describe en el Anexo A.

La densidad real del mineral se determino por el método picnométrico, el procedimiento se describe en el Anexo A.

La distribución granulométrica de las muestras de cada manto se determino a través de la malla Tyler 48(300 μ m) hasta la malla Tyler 150(106 μ m).

2.3 FORMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS

Se conformaron las muestras para cada uno de los tres mantos en estudio, en función del diámetro de partícula, para tal efecto se trituraron y molieron las muestras hasta obtener 5 intervalos de tamaño, los cuales son:

Tabla 4. Clasificación de las muestras.

Intervalos de malla (Tyler)	Diámetro de partícula Promedio (μm)		Manto 1	Manto 2	Manto 3
-48 / +60	300	M1	M1.1	M1.2	M1.3
-60 / +80	250	M2	M2.1	M2.2	M2.3
-80 / +100	180	M3	M3.1	M3.2	M3.3
-100 / +150	150	M4	M4.1	M4.2	M4.3
-150	106	M5	M5.1	M5.2	M5.3

Fuente: Autor.

2.4 ENSAYOS PRELIMINARES DE LOS MÉTODOS CONCENTRACIÓN

La concentración se usó para tratar de eliminar las impurezas presentes en el yeso, inicialmente se realizaron ensayos en los cuatro procesos de beneficio obteniéndose resultados no satisfactorios, puesto que las variables estaban definidas, pero los parámetros de operación no lo estaban.

Por lo anterior se experimento en cuatro procesos de beneficio y se definieron los parámetros de operación, basados tanto en la teoría como en la experimentación. A continuación se definen los procesos de beneficio (pruebas preliminares).

2.4.1 Mesa de Sacudimientos Wilfley. Este proceso de concentración se considera adecuado cuando la diferencia de densidades es apreciable; en esta investigación la diferencia de densidades del mineral no es amplia. A continuación se muestra las densidades de las especies mineralógicas presentes en el mineral. Ver tabla 5. Los ensayos en la mesa Wilfley, fueron llevados a acabo con el fin de

determinar las mejores condiciones operativas del proceso, necesarias para la eliminación de las impurezas.

Tabla 5. Peso específico de las especies mineralógicas.

FASE	% peso Manto 1	% peso Manto 2	% peso Manto 3	Gravedad Especifica (sp-gr)
CaSO₄.*2H₂O	7.62	1.22	6.32	2.32
SiO₂	9.53	2.54	10.68	2.65
CaCO₃	46.62	6.58	18.75	2.65
CaSO₄	36.08	44.17	44.14	2.94
amorfos	0.15	45.49	20.11	
Densidad del Manto (gr/ml)	2.732	2.899	2.817	

Fuente: Autor.

A. Sistema experimental para las pruebas de la Mesa de Sacudimientos Wilfley. Con el fin de conocer el comportamiento que tiene el mineral frente al proceso de la mesa Wilfley y determinar las variables de mayor influencia sobre el proceso, se llevo un diseño experimental clásico, es decir, conocer el efecto de una variable dejando constantes los demás parámetros.

Las variables y sus rangos de valor estudiados fueron:

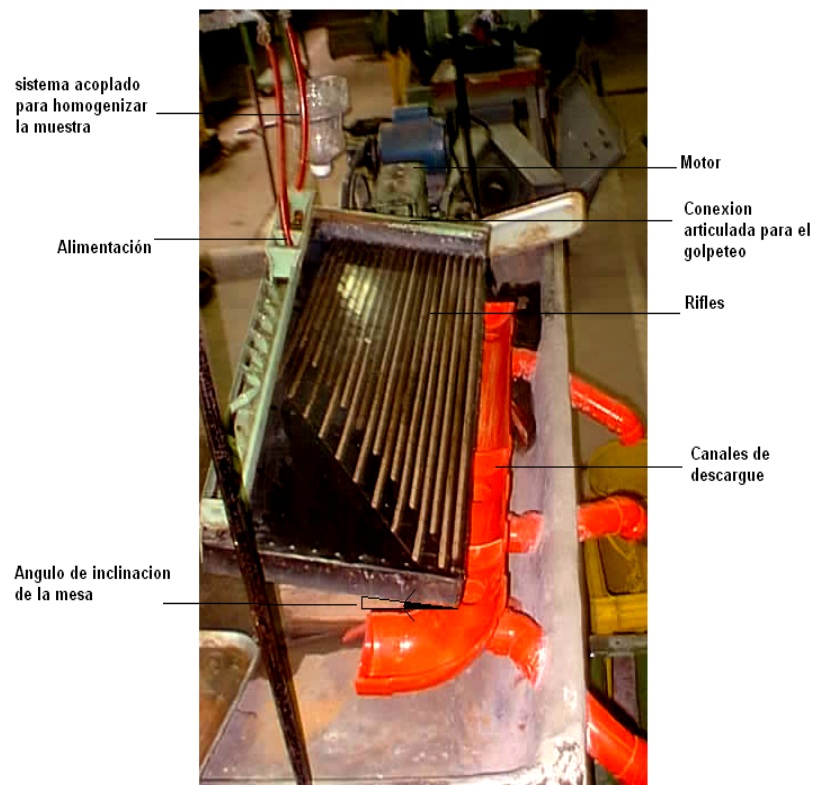
- **Angulo de inclinación de la mesa Wilfley:** (10°, 13° y 16°).
- **Granulometría:** (Tabla 4).

Parámetros constantes:

- **Pulpa:** (30% sólidos).
- **Caudal:** (25 ml/s).
- **Velocidad del impulso:** (250 impulsos por minuto).
- **Amplitud:** ($\frac{1}{2}$ pulgada).

El montaje consta de un agitador y dosificador de pulpa (para homogenizar la muestra), y la mesa Wilfley. En la fotografía de la Figura 14, se presenta el sistema utilizado en el laboratorio para realizar la experimentación.

Figura 14. Montaje en la mesa Wilfley.



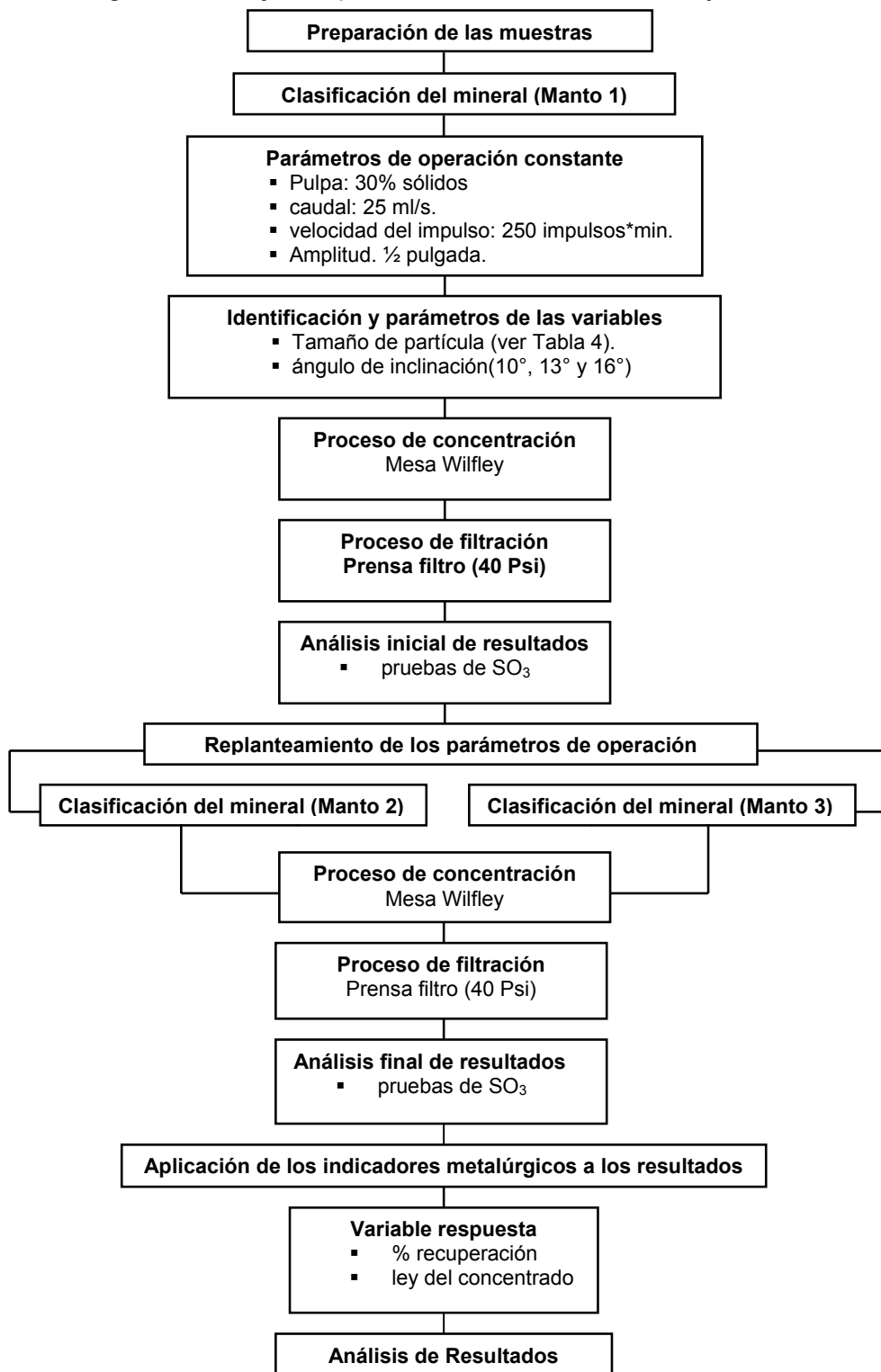
Fuente: Autor.

El rango fue obtenido a partir de pruebas preliminares y de la bibliografía consultada. La eficiencia de cada prueba experimental se determinó calculando los índices metalúrgicos, tales como el % recuperación, razón de concentración, índice de selectividad, razón de enriquecimiento e indicador de concentración.

B. Ensayos preliminares y selección de las variables. Inicialmente con este sistema experimental se realizaron pruebas preliminares para determinar las condiciones de funcionamiento del proceso, tales como ángulo de inclinación (θ), velocidad de impulso y amplitud del movimiento de la mesa. Primero se llevó a cabo la homogenización del mineral (pulpa 30% sólidos), con 5 intervalos de tamaños (Ver Tabla 4), velocidad del impulso (250 imp*min), amplitud (1/2") y un caudal de 25 ml/s.

C. Procedimiento de operación. En la Figura 15, se muestra el diagrama de flujo del procedimiento para la mesa Wilfley.

Figura 15. Diagrama de flujo del procedimiento de mesa Wilfley.



Fuente: Autor.

2.4.2 Espiral Humphreys. Este proceso de concentración ampliamente utilizado debido a su fácil operación, solo se debe mantener un flujo constante de la pulpa y conservar la posición correcta de los partidores.

A. Sistema experimental para las pruebas del Espiral Humphreys. Con el fin de conocer el comportamiento que tiene el mineral frente al proceso de espiral y determinar las variables de mayor influencia sobre el proceso, se llevo un diseño experimental clásico, es decir, conocer el efecto de una variable dejando constantes los demás parámetros.

La variable y sus rangos de valores estudiados fueron:

- **Granulometría:** (Ver Tabla 4).

Parámetros constantes:

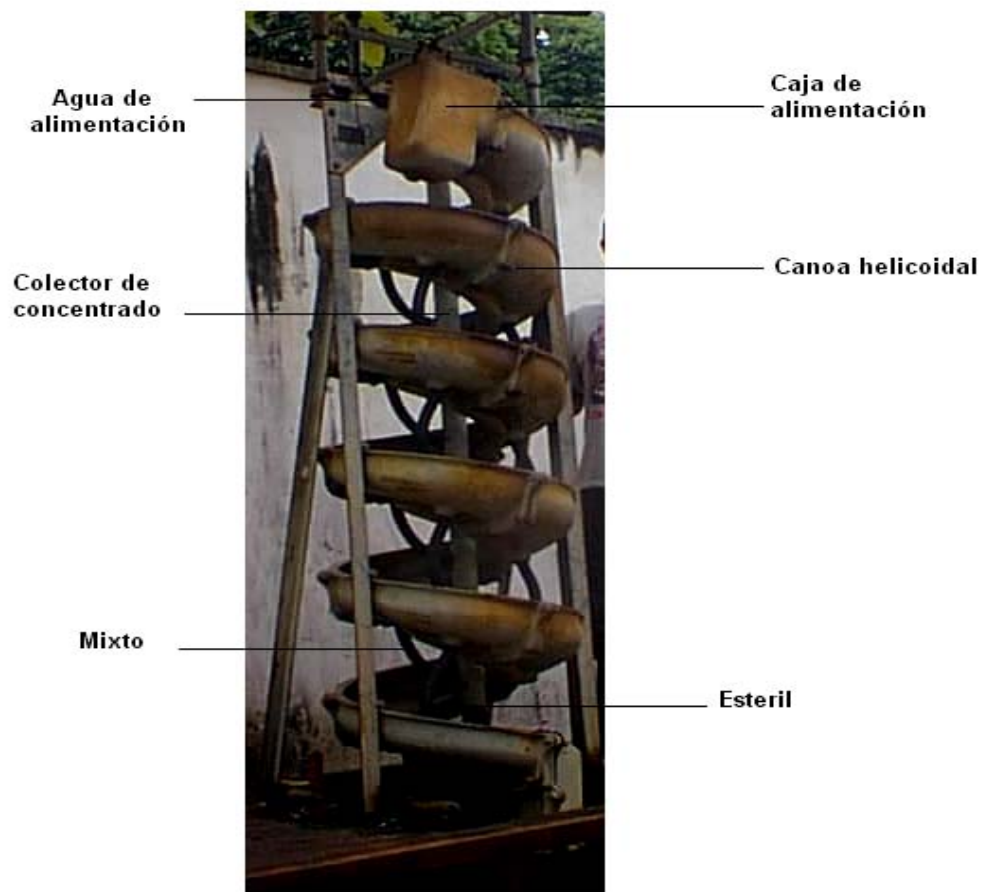
- **Presión:** 40 Psi.
- **Pulpa:** 30% de sólidos.

El montaje consta de una bomba que eleva la pulpa a una altura de 4 metros, mangueras que suministran el agua de lavado y la pulpa, además una canoa helicoidal que forma el espiral Humphreys. En la figura 16, se presenta el sistema utilizado en el laboratorio para realizar la experimentación.

El rango fue obtenido a partir de pruebas preliminares y de la bibliografía consultada. La eficiencia de cada prueba experimental se determino calculando los índices metalúrgicos, tales como el % recuperación, razón de concentración, índice de selectividad, razón de enriquecimiento e indicador de concentración.

B. Ensayos preliminares y selección de las variables. Inicialmente con este sistema experimental se realizaron pruebas preliminares para determinar las condiciones de funcionamiento del proceso, tales como la posición de los partidores “**Splitters**”; Primero se llevó a cabo la homogenización del mineral (pulpa 30% de sólidos) durante 5 minutos; con una presión de 40 Psi (presión máxima que da el equipo), con cinco diferentes intervalos de tamaños (ver tabla 4). Se realizaron varias pruebas en el siguiente orden: cinco pruebas para el manto 1, para el manto 2 y el manto 3.

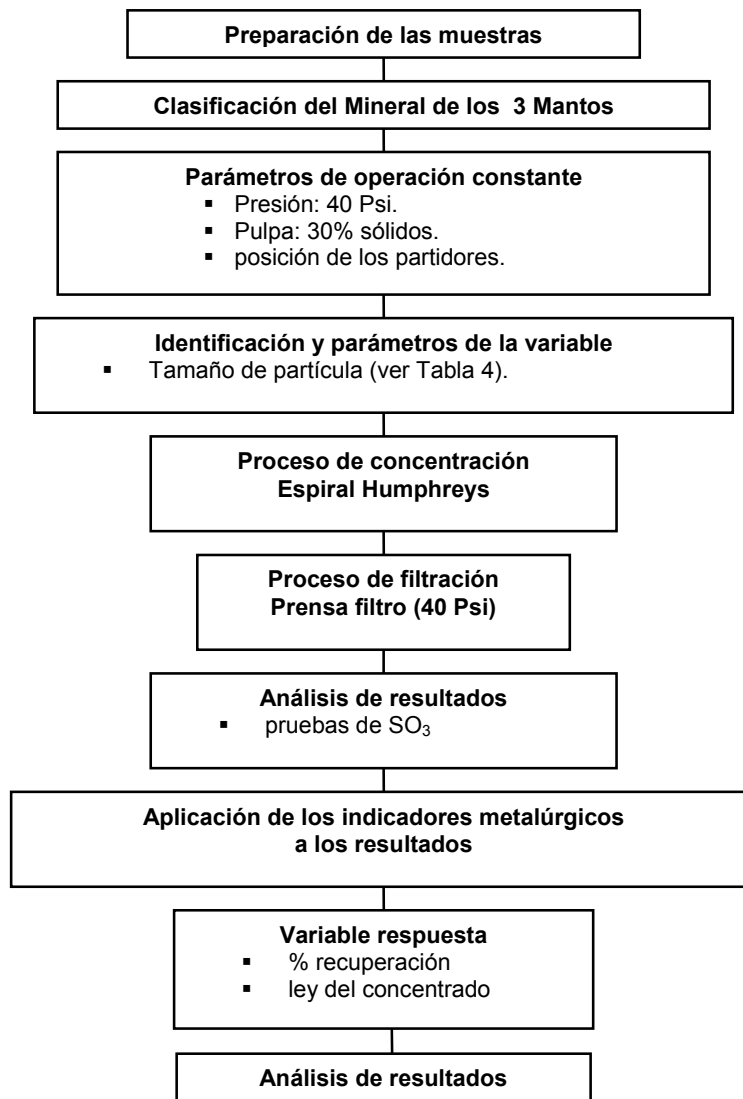
Figura 16. Montaje del espiral Humphreys.



Fuente: Autor.

C. Procedimiento de operación. En la Figura 17, se muestra el diagrama de flujo del procedimiento para el espiral Humphreys.

Figura 17. Diagrama de flujo del procedimiento para el Espiral Humphreys.



Fuente: Autor.

2.4.3 Hidrociclón. Este proceso de concentración es bastante práctico desde el punto de vista operativo, el único cuidado que se debe tener, consiste en mantener el flujo constante del mineral y evitar caídas de presión.

A. Sistema experimental para las pruebas de Hidrociclón. Con el fin de conocer el comportamiento que tiene el mineral frente al proceso de hidrociclón y determinar las variables de mayor influencia sobre el proceso, se llevo un diseño experimental clásico, es decir, conocer el efecto de una variable dejando constantes los demás parámetros.

La variable y sus rangos de valores estudiados fueron:

- **Granulometría:** (Ver Tabla 4).

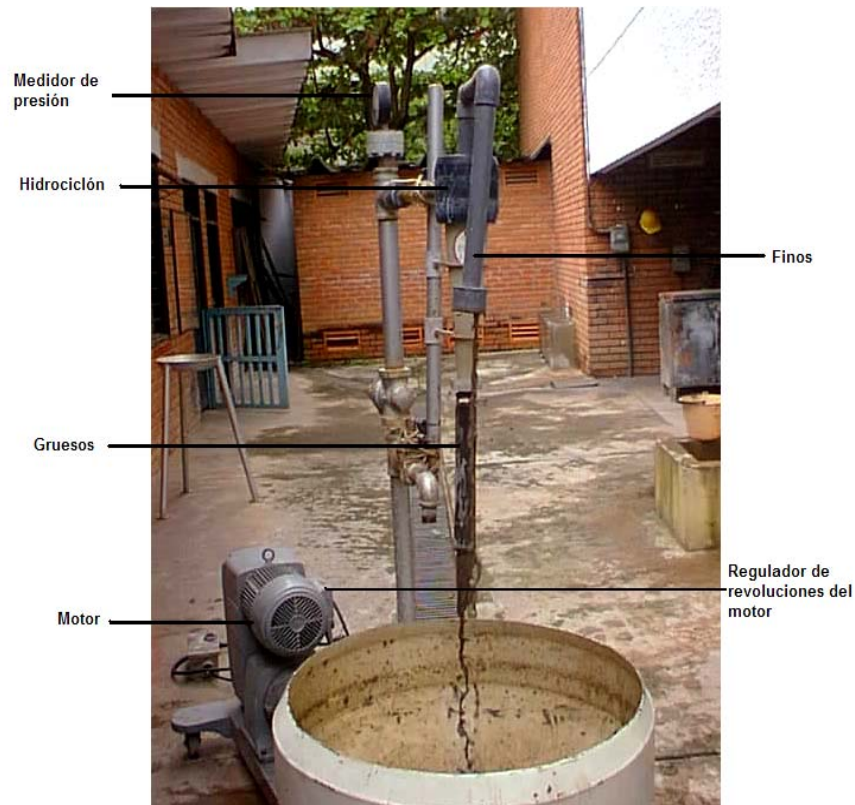
Parámetros constantes:

- **Presión:** 40 Psi.
- **Pulpa:** 30% de sólidos

El rango fue obtenido a partir de pruebas preliminares y de la bibliografía consultada, pero es indudable que las condiciones óptimas pueden únicamente ser determinadas en la práctica. La eficiencia de cada prueba experimental se determino calculando los índices metalúrgicos, tales como el % recuperación, razón de concentración, índice de selectividad, razón de enriquecimiento e indicador de concentración.

En la Figura 18, se presenta el sistema utilizado en el laboratorio para realizar la experimentación.

Figura 18. Montaje del hidrociclón.

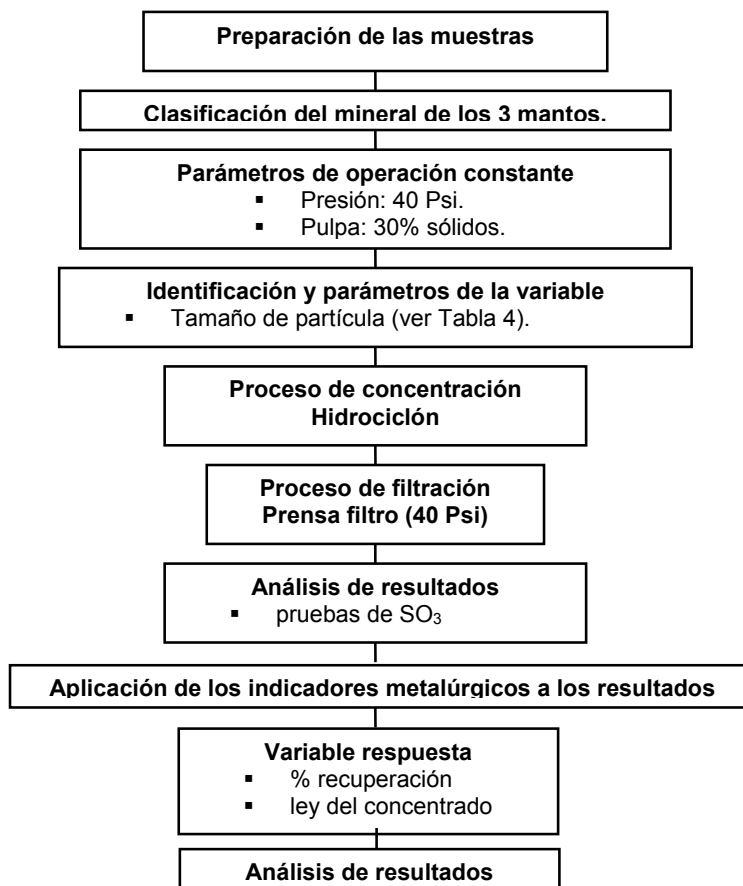


Fuente: Autor.

B. Ensayos preliminares y selección de las variables. Inicialmente con este sistema experimental se realizaron pruebas preliminares para determinar las condiciones de funcionamiento del proceso. Primero se llevó a cabo la homogenización del mineral (porcentaje de sólidos correspondiente al 30%), con una presión de 40 Psi (presión máxima que da el equipo) y con cinco diferentes intervalos de tamaños (ver tabla 4). Se realizaron varias pruebas en el siguiente orden: cinco pruebas para el manto 1, para el manto 2 y el manto 3.

C. Procedimiento de operación. En la Figura 19, se muestra el diagrama de flujo del procedimiento para el Hidrociclón.

Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento para el Hidrociclón.



Fuente. Autor.

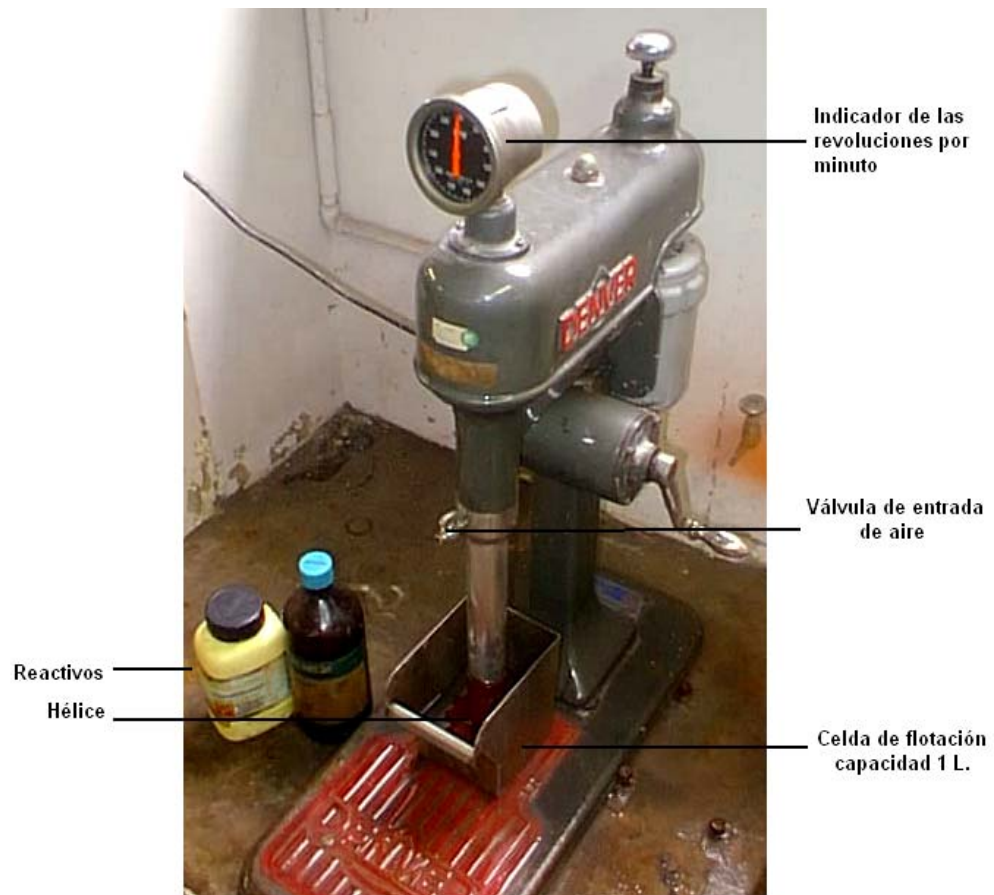
2.4.4 Flotación. Actualmente este proceso de concentración es el más usado debido a su alto grado de selectividad.

A. Sistema experimental para las pruebas de flotación. Con el fin de conocer el comportamiento que tiene el mineral frente al proceso de flotación y determinar las variables de mayor influencia sobre el proceso, tales como pH, temperatura, cantidad de colector y tiempo de acondicionamiento. Se llevo un diseño

experimental clásico, es decir, conocer el efecto de una variable dejando constantes los demás parámetros.

En la Figura 20, se presenta el sistema utilizado en el laboratorio para realizar la experimentación.

Figura 20. Montaje de la celda de flotación.



Fuente: Autor.

El rango fue obtenido a partir de pruebas preliminares y de la bibliografía consultada. La eficiencia de cada prueba experimental se determinó calculando

los índices metalúrgicos, tales como el % recuperación, razón de concentración, índice de selectividad, razón de enriquecimiento e indicador de concentración.

Las variables y sus rangos de valores estudiados fueron:

- **Cantidad de colector:** (450, 900, 1350 y 1800) gr. Acido oleico / ton mineral.
- **pH:** (6, 7, 8, 9 y 10).
- **Tiempo de acondicionamiento:** (3, 4, 5, 6 y 7) min.
- **Granulometría:** (Ver Tabla 4).

Parámetros constantes:

- **Temperatura ambiente:** 20 °C.
- **Velocidad de agitación:** 1200 rpm.
- **Pulpa:** 30% de sólidos.

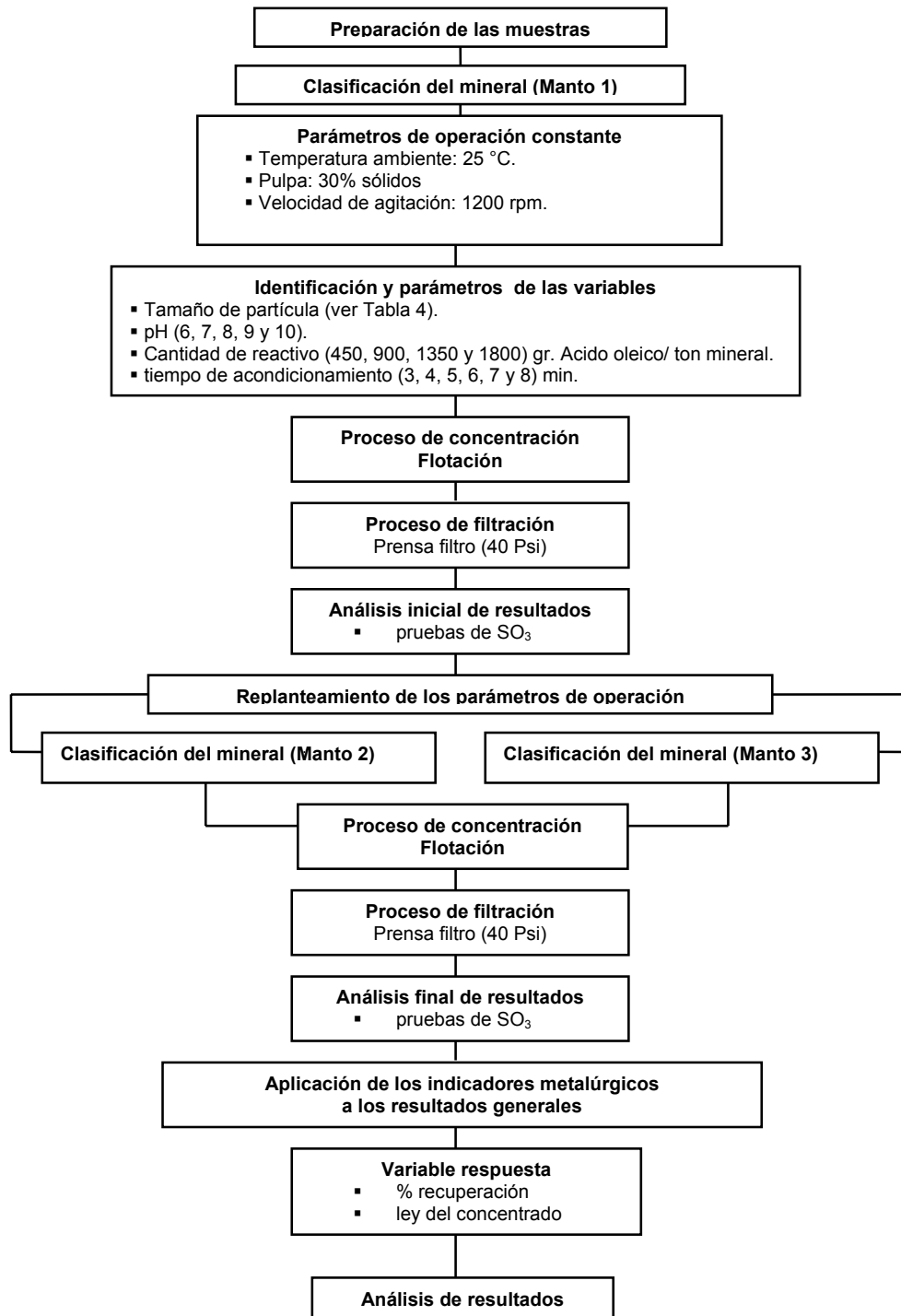
B. Ensayos preliminares y selección de las variables. Inicialmente con este sistema experimental se realizaron pruebas preliminares para determinar las condiciones de funcionamiento de la celda de flotación, tales como el flujo de aire y la intensidad de agitación.

Primero se llevó a cabo la homogenización del mineral (pulpa 30% de sólidos) durante 2 minutos, con una velocidad de 1200 rpm. Seguidamente se agrega una cantidad de colector establecido y se mide el pH, luego se ajusta el pH con NaOH o HCl hasta un valor establecido, por un tiempo determinado se dejó la válvula de aire cerrada con el fin de que exista una buena interacción entre el mineral y los reactivos, luego se abre la válvula y se recolectan las muestras de los concentrados y colas.

La flotación se lleva a cabo conectando el flujo de aire, teniendo en cuenta que el nivel de la celda no baje. El tiempo de flotación debe ser determinado dependiendo de la cantidad de muestra y la calidad del concentrado a obtener. Se realizaron varias pruebas para encontrar los parámetros adecuados que rigen las variables del proceso.

C. Procedimiento de operación. En la Figura 21, se muestra el diagrama de flujo del procedimiento para la celda de Flotación.

Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento para la celda de Flotación.



Fuente: Autor.

2.5 SELECCIÓN DEL MÉTODO MÁS ADECUADO PARA LA CONCENTRACIÓN

De acuerdo con los indicadores metalúrgicos se selecciona el método que de los mejores resultados de concentración; estos indicadores son:

- Porcentaje de Recuperación (%R).
- Mayor ley de concentrado (% SO₃).
- Indicador de concentración (I.C).

El indicador de concentración se calcula utilizando los %Recuperación y los %SO₃ obtenidos en los experimentos realizados al mineral durante las pruebas de concentración.

2.6 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LOS ENSAYOS FINALES DEL MÉTODO SELECCIONADO

El diseño experimental, es la planificación racional de las experiencias a realizar. En una investigación experimental de este tipo hay muchos factores que pueden afectar la variable respuesta, la utilización de un modelo estadístico al planificar y evaluar los resultados es una ayuda muy valiosa porque nos proporciona una información precisa acerca del fenómeno investigado.

La parte experimental final del presente proyecto se diseño utilizando un sistema factorial 2^n , donde (n) corresponde al numero de variables de entrada, este sistema determina el numero de ensayos.

Para el diseño factorial 2^n , se debe diseñar un número de experiencias, de tal manera que se tenga en cuenta todas las posibles combinaciones de niveles para diferentes variables.

Para este diseño se requiere dos niveles uno superior y uno inferior, indicados por los signos (+) y (-), en cada uno de los cuales las variables toman un valor diferente.

2.7 PROPUESTA DE UN DIAGRAMA DE FLUJO

Se propondrá un diagrama en donde se describa las etapas del proceso de concentración seleccionado.

1. Toma de muestras.
2. Proceso de Conminución de las muestras.
3. Replanteamiento de las variables del proceso de concentración, teniendo en cuenta los experimentos preliminares del proceso.
4. Aplicación del proceso de concentración.
5. Filtración del concentrado y las colas.
6. Pruebas de SO_3 .
7. Análisis y discusión de resultados.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

3.1 CONOCIMIENTO GEOLÓGICO DEL YACIMIENTO

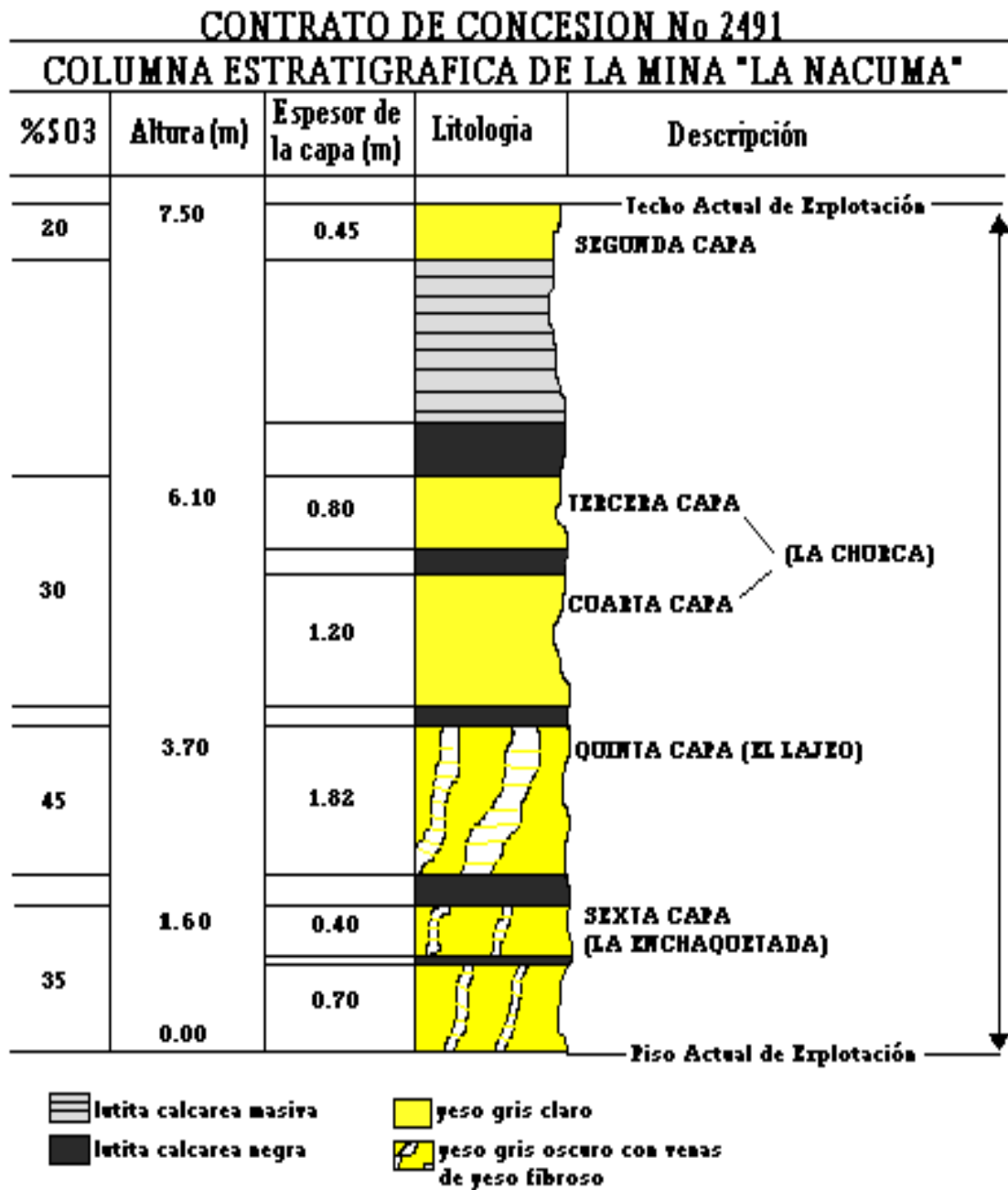
De acuerdo con el estudio de campo realizado por los geólogos y a la información obtenida de las perforaciones y muestras respectivas de los actuales frentes de explotación de la licencia minera N° 2491, se pudo obtener la columna estratigráfica. La cual se presenta en la fotografía de la Figura 22 y Figura 23.

Figura 22. Frente de explotación.



Fuente: Autor

Figura 23. Columna estratigráfica de la mina la nacuma.



Fuente: CEMEX COLOMBIA. S.A.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

3.2.1 Análisis Geoquímico y Mineralógico. El análisis por difracción de rayos X para las muestras tomadas de los 3 mantos, reportaron la presencia de especies mineralógicas que se registran en el anexo B.

Análisis de SO₃ en los mantos. Los resultados del análisis para las muestras tomadas de los mantos son representados en la Tabla 6.

Tabla 6. %SO₃ en los mantos.

Manto	% SO ₃
1 (Churca)	28.9
2 (Lajeo)	49.3
3 (Enchaquetada)	36.6

Fuente: Autor.

3.2.2 Distribución granulométrica de los mantos. En las Tablas 7, 8 y 9 se presenta la distribución granulométrica de los mantos 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 7. Distribución granulométrica del manto 1.

Diámetro de Partícula (µm)	Peso (gr.)	Peso (%)	% Peso retenido Acumulado	% Peso Pasante Acumulado
300	109.0	21.8	21.8	78.2
250	195.5	39.1	60.9	39.1
180	91.0	18.2	79.1	20.9
150	75.0	15.0	94.1	5.9
106	29.5	5.9	100	-----
Total	500	100		

Fuente: Autor.

Tabla 8. Distribución granulométrica del manto 2.

Diámetro de Partícula (µm)	Peso (gr.)	Peso (%)	% Peso retenido Acumulado	% Peso Pasante Acumulado
300	42.0	8.4	8.4	91.6
250	124.0	24.8	33.2	66.8
180	76.5	15.3	48.5	51.5
150	189.5	37.9	86.4	13.6
106	68.0	13.6	100	-----
Total	500	100		

Fuente: Autor.

Tabla 9. Distribución granulométrica del manto 3.

Diámetro de Partícula (µm)	Peso (gr.)	Peso (%)	% Peso retenido Acumulado	% Peso Pasante Acumulado
300	155	31	31.0	69.0
250	135.5	27.1	58.1	41.9
180	58.5	11.7	69.8	30.2
150	113	22.6	92.4	7.6
106	38	7.6	100	-----
Total	500	100		

Fuente: Autor.

Los resultados de los análisis de SO₃ de acuerdo con la distribución granulométrica, para las muestras seleccionadas de los mantos 1, 2 y 3, son representados en las Tablas 10, 11 y 12 respectivamente.

Tabla 10. % SO₃ del manto 1 (Churca).

Diámetro de Partícula (µm)	% SO₃
300	28.2
250	29.2
180	29.4
150	28.6
106	28.1

Fuente: Autor.

Tabla 11. % SO₃ del Manto 2 (Lajeo).

Diámetro de Partícula (µm)	% SO₃
300	48.5
250	49.5
180	49.7
150	49.1
106	48.5

Fuente: Autor.

Tabla 12. % SO₃ del Manto 3 (Enchaquetada).

Diámetro de Partícula (µm)	% SO₃
300	36.1
250	36.6
180	36.7
150	36.2
106	36.1

Fuente: Autor.

El análisis de las muestras reportan mayor %SO₃ en la malla Tyler -60 / +100 (250 – 150) µm, respectivamente, en los tres mantos.

3.2.3 Caracterización Fisicoquímica. Los resultados de humedad para cada manto se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Contenido de humedad de las muestras.

Manto	% Humedad
1 (Churca)	2.1
2 (Lajeo)	1.95
3 (Enchaquetada)	2.04

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 13, se pudo determinar que el porcentaje de humedad promedio del deposito con la licencia Minera N° 2491 corresponde al 2.03%. Este porcentaje de humedad es bajo, lo cual indica su poca solubilidad en el agua. Los valores de la densidad real determinados en los 3 mantos, en proporciones iguales, se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de la densidad real del mineral.

Manto	Densidad Real
1 (Churca)	2.732
2 (Lajeo)	2.899
3 (Enchaquetada)	2.817

Fuente: Autor.

Con los resultados de la Tabla 14 se pudo determinar que la mena del deposito con Licencia Minera N° 2491, posee una densidad real promedio de 2.816 (g/cm³).

3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE CONCENTRACIÓN DEL YESO

Con base a los procesos de concentración (Mesa Wilfley, Espiral Humphreys, Hidrociclón y Flotación), se determinaron los experimentos a realizar en cada proceso.

3.3.1 Concentración del yeso empleando la mesa de sacudimientos Wilfley.

Con base en el mineral del manto 1 (Churca), se hicieron pruebas preliminares de concentración y se analizó el comportamiento general del proceso. Ver Tabla 15 y Figura 24.

Tabla 15. Influencia del ángulo de inclinación en el manto 1. (Caudal 25 ml/s; % Pulpa 30; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “; tamaño de partícula M1.3).

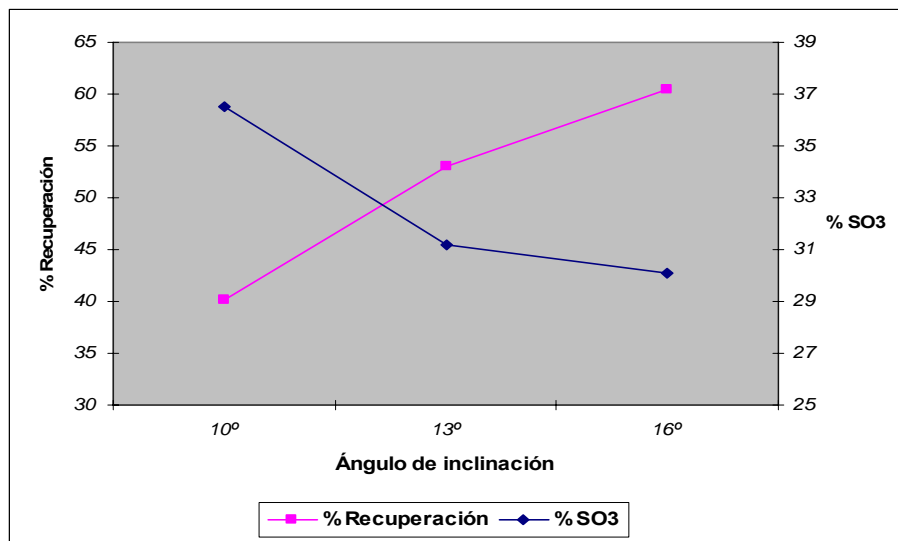
Ensayo	∠ Inclinación	% Recuperación	% SO ₃
1	10°	40.20	36.50
2	13°	53.10	31.20
3	16°	60.40	30.10
1 Duplicado	10°	39.90	37.00
2 Duplicado	13°	52.60	30.90
3 Duplicado	16°	60.10	30.20

Fuente: Autor.

Analizando los resultados de la Tabla 15 y Figura 24, se concluye que el ángulo de inclinación, con el mejor indicador de concentración es el ángulo de 16°, ver Tabla 16.

Por consiguiente se tomara este resultado como parámetro de operación constante, y se aplicara a las siguientes pruebas de concentración en la mesa Wilfley, teniendo como única variable el diámetro de partícula.

Figura 24. Influencia del ángulo de inclinación en el manto 1. (Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “; Tamaño partícula M1.3).



Fuente: Autor.

Tabla 16. Influencia del ángulo de inclinación en el manto 1. Sobre el indicador de concentración.

Angulo	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
10°	36.50	40.20	18.93
13°	31.20	53.10	12.77
16°	30.10	60.40	38.67

Fuente: Autor.

Con el estudio de los resultados preliminares del manto 1, se replantearon los parámetros de las variables, a seguir, en el proceso de concentración en los mantos 1, 2 y 3. Para observar la influencia de los parámetros sobre el proceso, los resultados obtenidos se reportan en las tablas 17, 18, 19 y sus gráficos corresponden a las figuras 25,26 y 27 respectivamente.

Tabla 17. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Ángulo de inclinación 16°, Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “).

Diámetro de Partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	58,30	29,40
250	60,20	30,20
180	61,40	31,40
150	60,90	30,60
106	57,50	30,20

Fuente: Autor.

Tabla 18. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Ángulo de inclinación 16°, Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “).

Diámetro de Partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	53,10	49,40
250	53,20	49,50
180	53,50	49,60
150	53,20	49,40
106	53,00	49,30

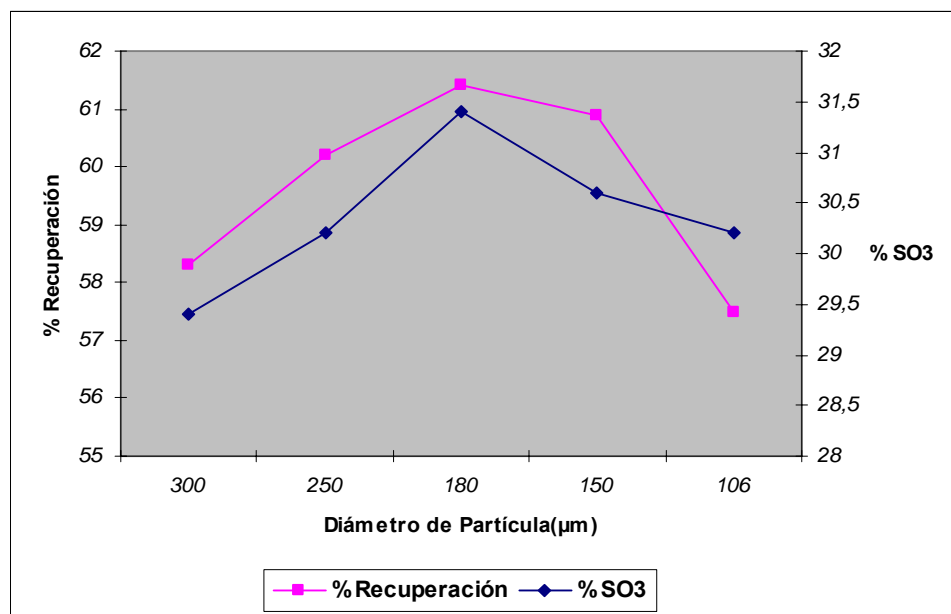
Fuente: Autor.

Tabla 19. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Ángulo de inclinación 16°, Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “).

Diámetro de Partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	57,30	38,90
250	57,60	39,50
180	58,90	40,30
150	57,90	39,90
106	57,40	39,20

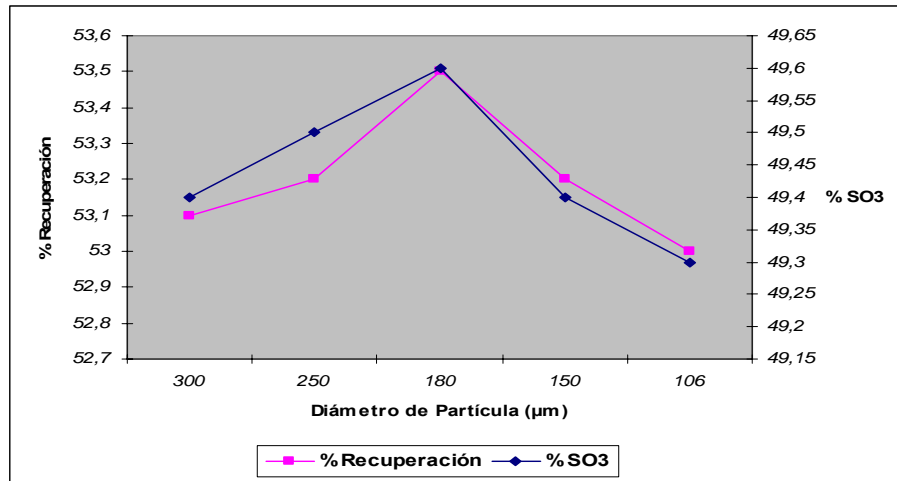
Fuente: Autor.

Figura 25. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Ángulo de inclinación 16°, Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “).



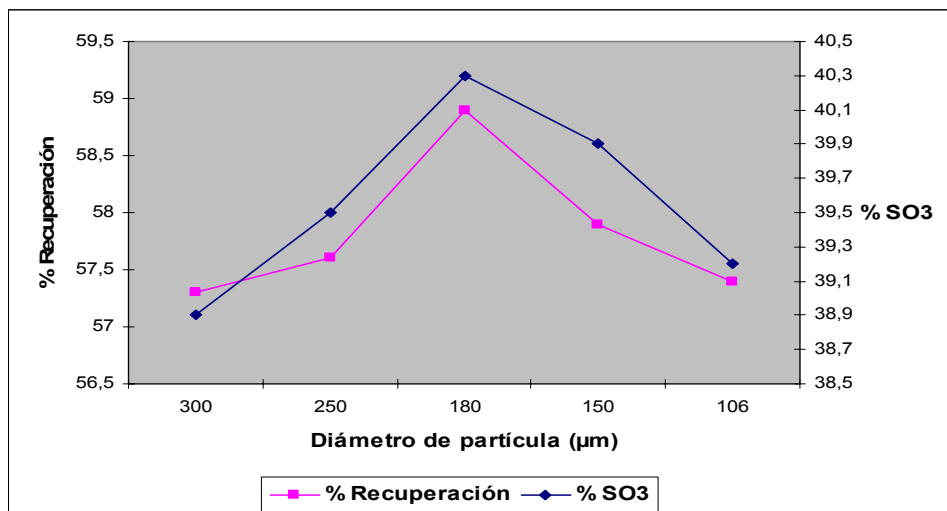
Fuente: Autor.

Figura 26. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Ángulo de inclinación 16°, Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “).



Fuente: Autor.

Figura 27. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Ángulo de inclinación 16°, Caudal 25 ml/s; Pulpa 30% sólidos; Velocidad 250 imp*min; Amplitud ½ “).



Fuente: Autor.

Los mejores resultados del índice de concentración obtenidos para cada manto, en el proceso de concentración utilizando la mesa Wilfley, se observan en la Tabla 20.

Tabla 20. Indicador de concentración para el mineral. Utilizando la mesa Wilfley.

Manto	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
Manto 1(Churca)	31.4	61.4	42.46
Manto 2(Lajeo)	49.6	53.5	28.84
Manto3(Enchaquetada)	40.3	58.9	39.20

Fuente: Autor.

Analizando los resultados del proceso de concentración de la mesa de sacudimientos Wilfley, se definieron las variables y parámetros de operación que arrojaron los mejores resultados de concentración utilizando los indicadores metalúrgicos.

- **Ángulo de inclinación:** 16°
- **Diámetro de partícula:** 180 (µm).
- **Caudal:** 25 ml / s.
- **Pulpa:** 30% sólidos.
- **Velocidad de impulso:** 250 impulsos por minuto.
- **Amplitud:** ½ pulgada.

Analizando los valores encontrados del indicador de concentración, se dedujo que a mayor % SO₃ en el mineral, disminuye la eficiencia de la concentración; Además se observó el comportamiento negativo del manto 2, al proceso de concentración

debido a su alto porcentaje de SO₃; A un mayor ángulo de inclinación se aumenta el porcentaje de recuperación pero disminuye el % SO₃ en el concentrado.

Aplicando un segundo criterio de concentración, se analizara que tan factible es la separación del mineral en la mesa Wilfley,

$$\text{Criterio de concentración (C.C)} = (\rho_1 - \rho) / (\rho_2 - \rho)$$

Criterio de concentración entre el yeso y la anhidrita es de C.C. = 1.47.

Criterio de concentración entre el yeso, la sílice y la calcita es de C.C. = 1.25.

Cuando el criterio de concentración C.C esta entre 1.5 y 1.25, la separación es posible pero complicada para granulometrías superiores a malla 10, lo que implica que no es adecuado este método de concentración para el mineral en estudio.

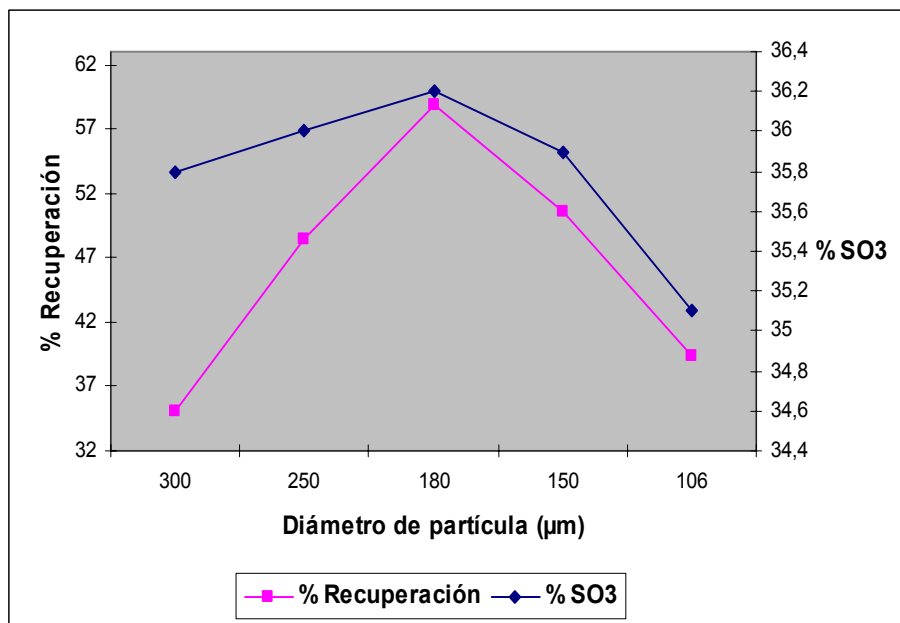
3.3.2 Concentración del yeso empleando el espiral Humphreys. Se examino el comportamiento general del sistema haciendo ensayos preliminares, se replantearon los parámetros de las variables y se aplicaron al proceso de concentración del mineral en los mantos 1, 2 y 3. Los resultados obtenidos se reportan en las Tablas 21, 22, 23 y sus gráficos corresponden a las Figuras 28, 29 y 30 respectivamente.

Tabla 21. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).

Diámetro de Partícula (μm)	% Recuperación	% SO_3
300	35,03	35,80
250	48,40	36,00
180	58,92	36,20
150	50,56	35,90
106	39,41	35,10

Fuente: Autor.

Figura 28. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).



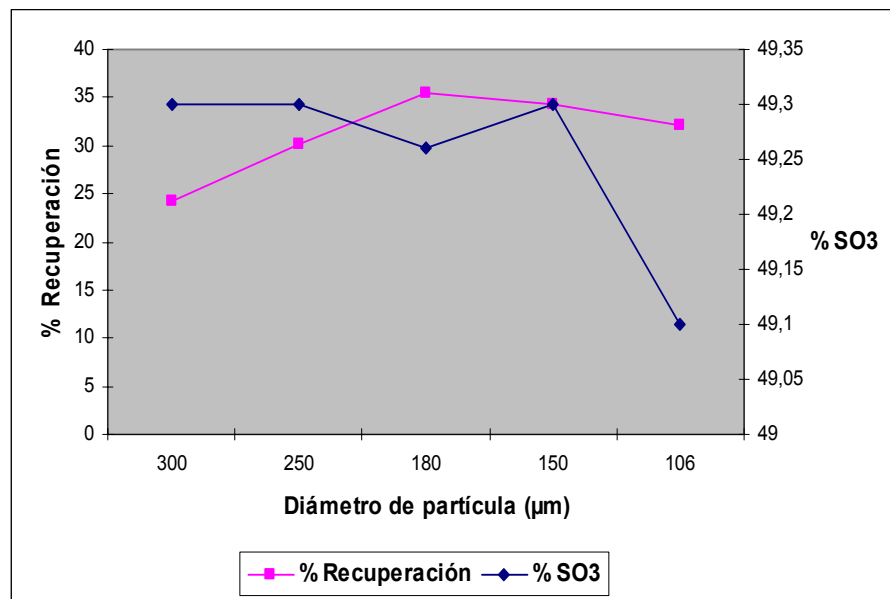
Fuente: Autor.

Tabla 22. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).

Diámetro de Partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	24,15	49,30
250	30,20	49,30
180	35,40	49,26
150	34,30	49,30
106	32,20	49,10

Fuente: Autor.

Figura 29. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).



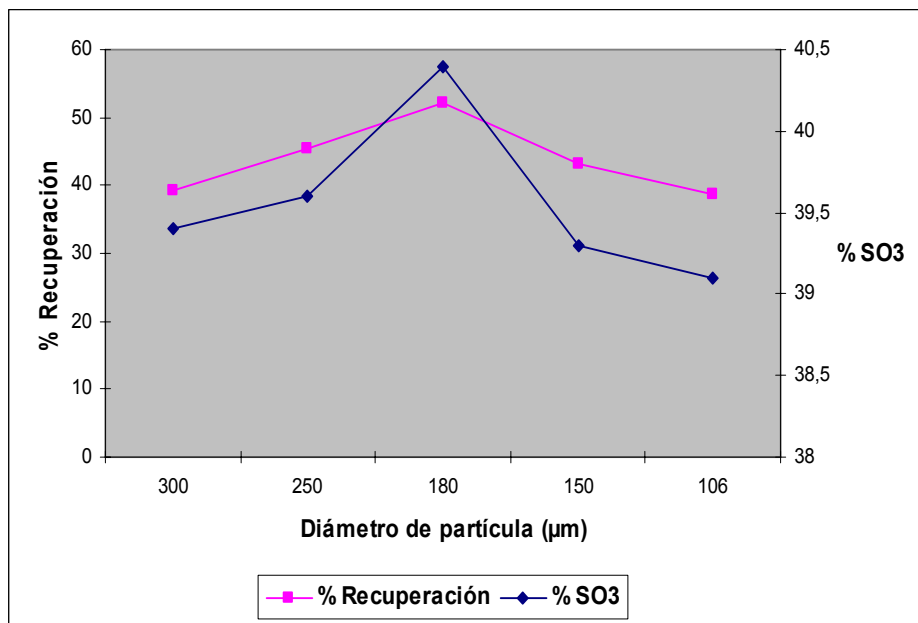
Fuente: Autor.

Tabla 23. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).

Diámetro de partícula (μm)	% Recuperación	% SO_3
300	39,20	39,40
250	45,43	39,60
180	52,14	40,40
150	43,21	39,30
106	38,60	39,10

Fuente: Autor.

Figura 30. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).



Fuente: Autor.

Los mejores resultados del índice de concentración obtenidos para cada manto, en el proceso de concentración utilizando el espiral Humphreys, se observan en la Tabla 24.

Tabla 24. Indicador de concentración para el mineral. Utilizando el espiral.

Manto	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
Manto 1(Churca)	36.2	58.92	44.65
Manto 2(Lajeo)	49.2	35.40	25.31
Manto 3(Enchaquetada)	40.4	52.14	29.96

Fuente: Autor

Analizando los resultados del proceso de concentración del espiral Humphreys, se definieron las variables y parámetros de operación que arrojaron los mejores resultados de concentración utilizando los indicadores metalúrgicos.

- **Diámetro de partícula:** 180 (µm)
- **Pulpa:** 30% sólidos.
- **Presión:** 40 Psi.

Aplicando el indicador de concentración, se encontró que a mayor % SO₃ en el mineral, disminuye la eficiencia de la concentración.

El equipo de bombeo limita el proceso de concentración, se trabajo con una presión máxima de 40 Psi de 70 Psi que puede dar el equipo. Esta limitación automáticamente condiciona el porcentaje de sólidos en la pulpa, el cual fue de 30%; al incrementar el porcentaje de sólidos, aumenta la densidad de la pulpa y la

perdida de presión del equipo generaría un efecto negativo en el porcentaje de recuperación.

3.3.3 Concentración del yeso empleando el hidrociclón. Se examinó el comportamiento general del sistema haciendo ensayos preliminares, se replantearon los parámetros de las variables y se aplicaron al proceso de concentración del mineral en los mantos 1, 2 y 3. Los resultados obtenidos se reportan en las Tablas 25, 26, 27 y sus gráficos corresponden a las Figuras 31, 32 y 33 respectivamente.

Tabla 25. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).

Diámetro de Partícula (μm)	% Recuperación	% SO_3
300	31,09	35,9
250	56,49	36,2
180	64,39	36,4
150	50,56	36,4
106	39,89	35,3

Fuente: Autor.

Tabla 26. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).

Diámetro de Partícula (μm)	% Recuperación	% SO_3
300	26.2	49.35
250	29.5	49.40
180	32.7	49.40
150	33.1	49.39
106	30.6	49.30

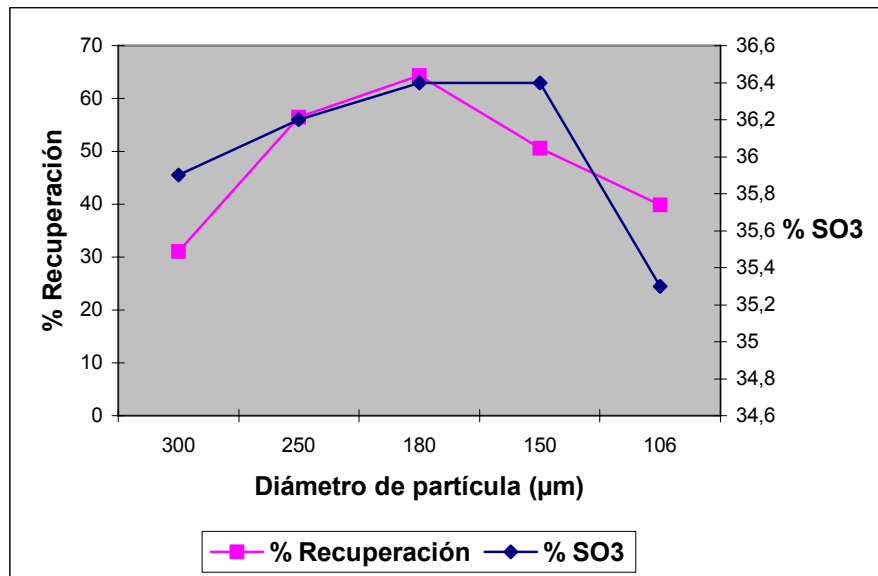
Fuente: Autor.

Tabla 27. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).

Diámetro de Partícula (μm)	% Recuperación	% SO_3
300	39,07	39,2
250	48,12	39,6
180	60,25	40,3
150	54,64	40,2
106	40,15	39,1

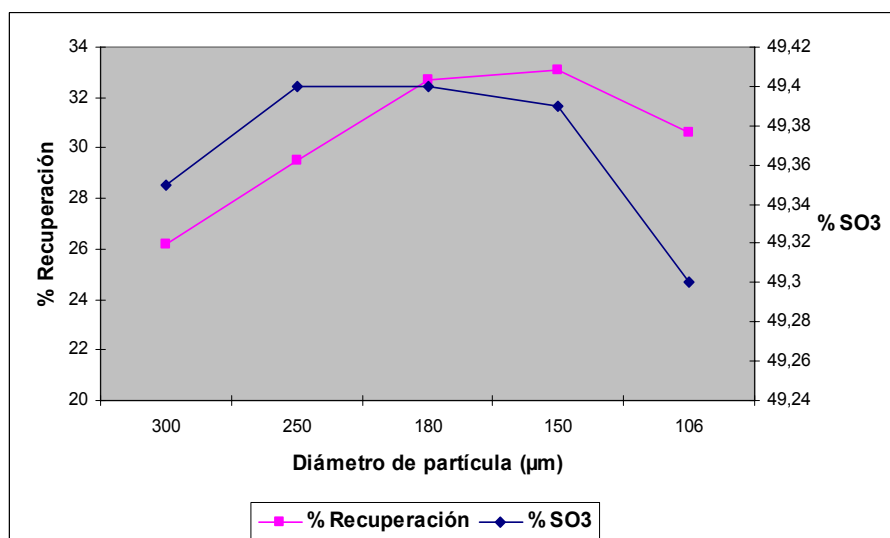
Fuente: Autor

Figura 31. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).



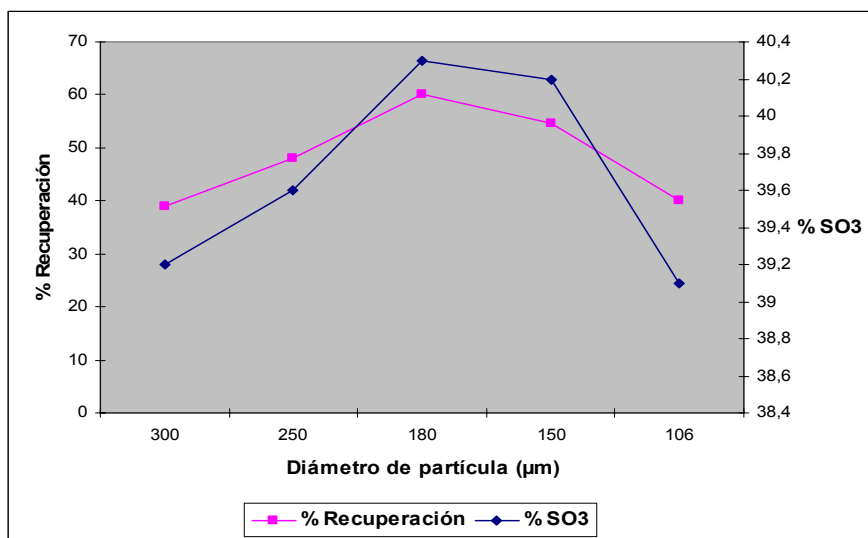
Fuente: Autor.

Figura 32. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).



Fuente: Autor.

Figura 33. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Presión 40 Psi, Pulpa 30% sólidos).



Fuente: Autor.

Los mejores resultados del índice de concentración obtenidos para cada manto, en el proceso de concentración utilizando el Hidrociclón, se observan en la Tabla 28.

Tabla 28. Indicador de concentración para el mineral. Utilizando el hidrociclón.

Manto	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
Manto 1(Churca)	36.4	64.39	56.62
Manto 2(Lajeo)	49.4	32.7	9.66
Manto 3(Enchaquetada)	40.3	60.25	41.32

Fuente: Autor.

Analizando los resultados del proceso de concentración del Hidrociclón, se definieron las variables y parámetros de operación que arrojaron los mejores resultados de concentración utilizando los indicadores metalúrgicos.

- **Diámetro de partícula:** 180 μm
- **Pulpa:** 30% sólidos.
- **Presión:** 40 Psi.

Aplicando el indicador de concentración, se encontró que a mayor % SO_3 en el mineral, disminuye la eficiencia de la concentración. Se observa gran diferencia entre los indicadores de concentración del manto 1 y 3 con el manto 2.

Al elevar la presión con la se bombea la pulpa, aumenta la velocidad tangencial de entrada en el Hidrociclón, logrando un incremento en la concentración del mineral; a causa de las limitaciones del equipo, solo se alcanzo una presión de 40 Psi de los 70 Psi que puede dar el equipo, con un porcentaje de 30% sólidos; al aumentar el porcentaje de sólidos, aumenta la densidad de la pulpa y se presenta una mayor caída de presión, lo cual es adverso al proceso de concentración del mineral.

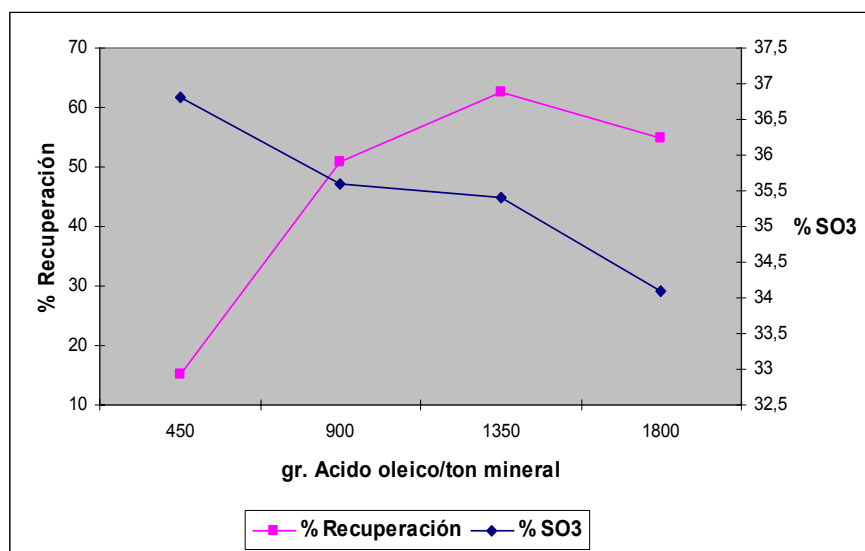
3.3.4 Concentración del yeso empleando flotación. Con base en el mineral del manto 1 (Churca), se hicieron pruebas preliminares de concentración y se analizo el comportamiento general del proceso. Los resultados obtenidos se reportan en las Tablas 29, 30, 31 y sus gráficos corresponden a las Figuras 34, 35 y 36 respectivamente.

Tabla 29. Influencia de la dosificación del colector en el manto 1. (pH= 8, Pulpa 30% sólidos. Diámetro de partícula 180 micras, tiempo de acondicionamiento 5 min., 1200 rpm).

gr. Acido oleico/ton mineral	% Recuperación	% SO ₃
450 (3 gotas)	15,10	36,80
900 (6 gotas)	50,80	35,60
1350 (9 gotas)	62,60	35,40
1800 (12 gotas)	54,98	34,10

Fuente: Autor.

Figura 34. Influencia de la dosificación del colector en el manto 1. (pH= 8, Pulpa 30% sólidos. Diámetro de partícula 180 micras, tiempo de acondicionamiento 5 min., 1200 rpm).



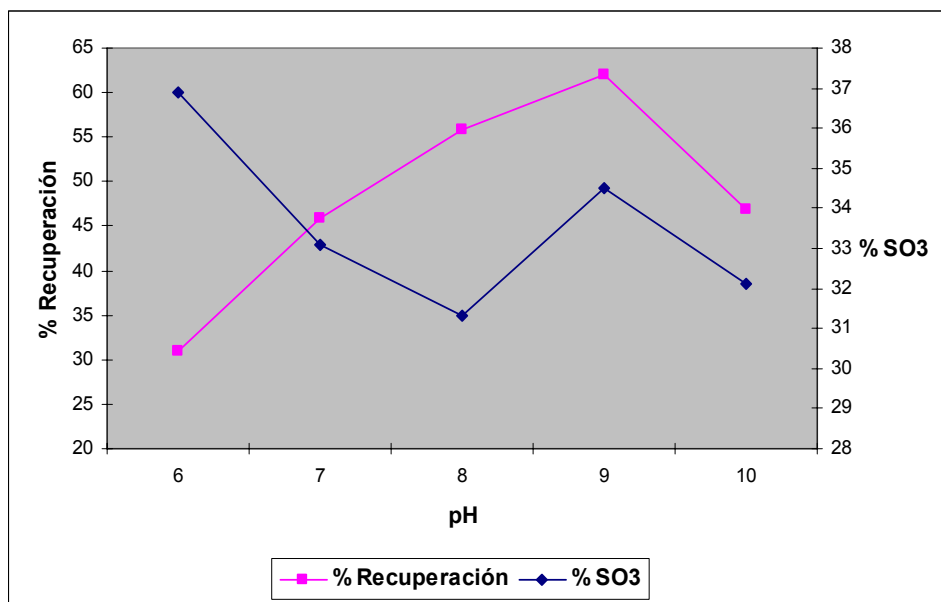
Fuente: Autor.

Tabla 30. Influencia del pH en el manto 1. (Pulpa 30% sólidos. Diámetro de partícula 180 micras, tiempo de acondicionamiento 5 min., 1200 rpm, 1350 gr. ácido oleico/ton mineral).

pH	% Recuperación	% SO ₃
6	31,02	36,90
7	45,80	33,10
8	55,80	31,30
9	62,00	34,50
10	46,90	32,10

Fuente: Autor.

Figura 35. Influencia del pH en el manto 1. (Pulpa 30% sólidos. Diámetro de partícula 180 micras, tiempo de acondicionamiento 5 min., 1200 rpm, 1350 gr. Ácido oleico/ton mineral).



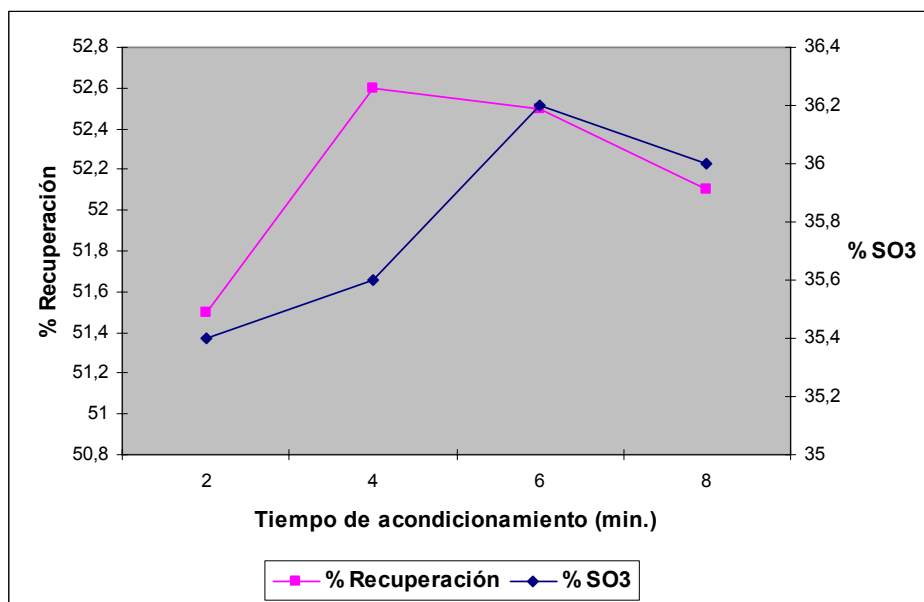
Fuente: Autor.

Tabla 31. Influencia del tiempo de acondicionamiento en el manto 1. (pH=8, pulpa 30% sólidos, diámetro de partícula 180 micras, 1200 rpm, 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).

Tiempo de acondicionamiento (min.)	% Recuperación	% SO ₃
2	51.5	35.4
4	52.6	35.6
6	52.5	36.2
8	52.1	36.0

Fuente: Autor.

Figura 36. Influencia del tiempo de acondicionamiento en el manto 1. (pH=8, pulpa 30% sólidos, diámetro de partícula 180 micras, 1200 rpm, 1350 grs. reactivo/ton. mineral).



Fuente: Autor.

Analizando los resultados de las Tablas 29, 30, y 31, se concluye que la cantidad de reactivo, pH y tiempo de acondicionamiento con el mejor índice de concentración es de 1350 gr. de ácido oleico, pH de 9 y 6 minutos de acondicionamiento, respectivamente. Se llegó a esta conclusión analizando el indicador de concentración para cada prueba. Ver las Tablas 32, 33 y 34.

Tabla 32. Influencia de la cantidad de reactivo sobre el indicador de concentración (manto 1).

gr. reactivo / ton mineral	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
450 (3 gotas)	36,80	15,10	2.37
900 (6 gotas)	35,60	50,80	30.82
1350 (9 gotas)	35,40	62,60	51.03
1800 (12 gotas)	34,10	54,98	35.87

Fuente: Autor.

Tabla 33. Influencia del pH sobre el indicador de concentración (manto 1).

pH	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
6	36,90	31,02	10.58
7	33,10	45,80	22.49
8	31,30	55,80	34.10
9	34,50	62,00	48.53
10	32,10	46,90	23.87

Fuente: Autor.

Tabla 34. Influencia del tiempo de acondicionamiento sobre el indicador de concentración (manto 1).

Tiempo de Acondicionamiento. (min.)	% SO₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
2	35.4	51.5	31.60
4	35.6	52.6	33.65
6	36.2	52.5	34.23
8	36.0	52.1	32.90

Fuente. Autor.

Por consiguiente se tomaron (6 gotas) 1350 gr. de ácido oleico/ ton mineral, un pH de 9 y un tiempo de acondicionamiento de 6 minutos, como parámetros de operación constante, y se aplicaran a las siguientes pruebas de concentración por flotación, teniendo como única variable el diámetro de partícula.

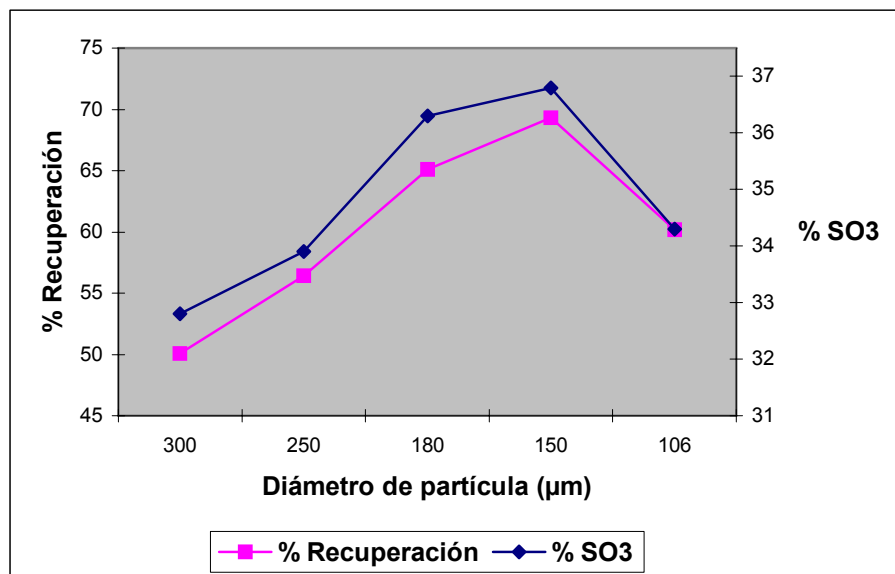
Con el estudio de los resultados preliminares del manto 1, se replantearon los parámetros de las variables, a seguir, en el proceso de concentración en los mantos 1, 2 y 3. Para observar la influencia de los parámetros sobre el proceso, los resultados obtenidos se reportan en las Tablas 35, 36, 37 y sus gráficos corresponden a las Figuras 37, 38 y 39 respectivamente.

Tabla 35. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Pulpa 30% sólidos, tiempo de acondicionamiento 6 min., pH 9, 1200 rpm y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).

Diámetro de partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	50.1	32.8
250	56.4	33.9
180	65.1	36.3
150	69.3	36.8
106	60.2	34.3

Fuente: Autor

Figura 37. Influencia del diámetro de partícula en el manto 1. (Pulpa 30% sólidos, tiempo de acondicionamiento 6 min., pH 9, 1200 rpm y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).



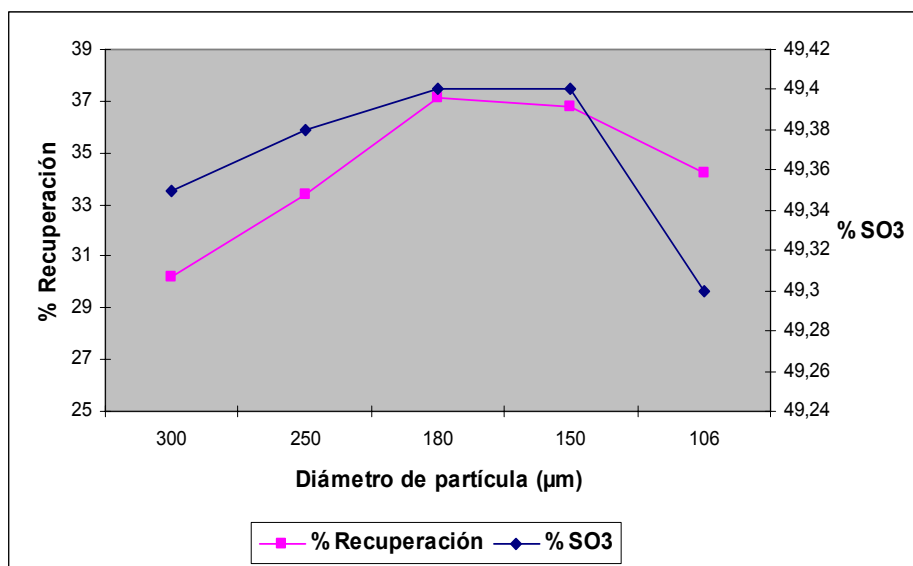
Fuente: Autor.

Tabla 36. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Pulpa 30% sólidos, tiempo de acondicionamiento 6 min., pH 9, 1200 rpm y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).

Diámetro de partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	30.2	49.3
250	33.4	49.36
180	37.1	49.4
150	36.8	49.4
106	34.2	49.3

Fuente: Autor.

Figura 38. Influencia del diámetro de partícula en el manto 2. (Pulpa 30% sólidos, tiempo de acondicionamiento 6 min., pH 9, 1200 rpm y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).



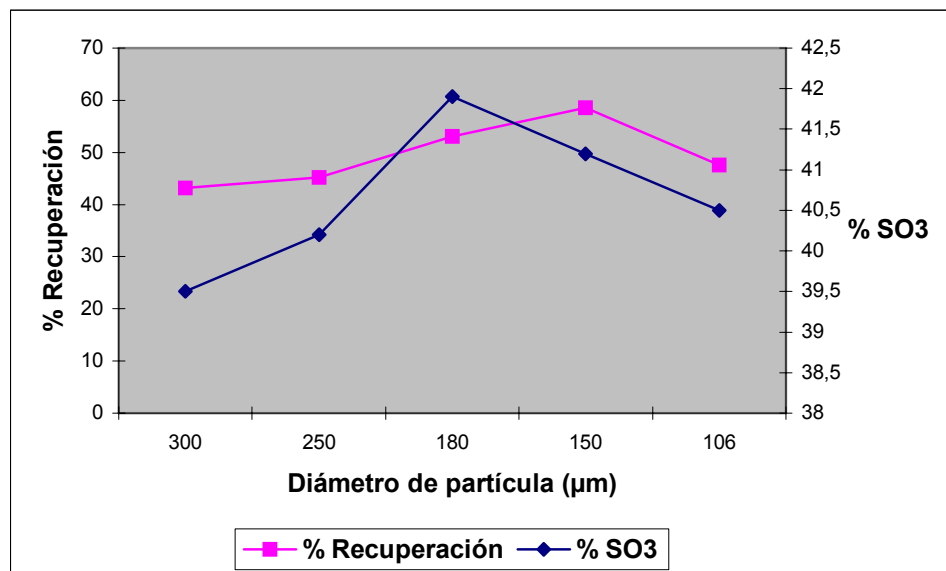
Fuente: Autor

Tabla 37. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Pulpa 30% sólidos, tiempo de acondicionamiento 6 min., pH 9, 1200 rpm y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).

Diámetro de partícula (µm)	% Recuperación	% SO ₃
300	43.2	39.5
250	45.2	40.2
180	53.1	41.9
150	58.6	41.2
106	47.6	40.5

Fuente: Autor.

Figura 39. Influencia del diámetro de partícula en el manto 3. (Pulpa 30% sólidos, tiempo de acondicionamiento 6 min., pH 9, 1200 rpm y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral).



Fuente: Autor.

Los mejores resultados obtenidos para cada manto, en el proceso de flotación, se observan en la Tabla 38.

Tabla 38. Indicador de concentración para el mineral.

Manto	% SO ₃	% Recuperación	Indicador de concentración (I.C.)
Manto 1(Churca)	36.8	69.3	71.28
Manto 2(Lajeo)	49.4	36.9	13.6
Manto 3(Enchaquetada)	41.2	58.5	40.25

Fuente: Autor.

Aplicando el indicador de concentración, se encontró que a mayor % SO₃ en el mineral, disminuye la eficiencia de la concentración.

El pH es la variable con mayor influencia en el proceso de concentración, pero se debe tener un control adecuado con el pHmetro, debido a que cualquier fluctuación puede cambiar la estabilidad en la espuma.

3.4 SELECCIÓN DEL MÉTODO MÁS ADECUADO PARA LA CONCENTRACIÓN

La selección del método va a depender del valor del indicador de concentración obtenido. En la Tabla 39. Se muestran los valores alcanzados por cada proceso de concentración.

Tabla 39. Influencia del método de concentración en el indicador de concentración.

Mesa Wilfley		Espiral Humphreys		Hidrociclón		Flotación	
Manto	I.C.	Manto	I.C.	Manto	I.C.	Manto	I.C.
1	42.46	1	44.65	1	56.62	1	71.28
2	28.84	2	25.31	2	9.66	2	13.6
3	39.20	3	29.96	3	41.32	3	40.25

Fuente: Autor.

Se analizaron los tres mantos por separado en los cuatro procesos de beneficio, en donde se encontró que los resultados de concentración sobre el manto dos son negativos, obteniendo los más bajos % Recuperación e índices de concentración. Los otros mantos dieron una respuesta positiva a los procesos de concentración, obteniéndose los más altos % Recuperación e índices de concentración, en especial el manto 1. Ver tabla 39.

Analizando los valores del criterio de concentración logrados por cada proceso, se llegó a la conclusión, que el proceso con los mejores resultados de concentración de mineral de yeso es el método de flotación, logrando un % Recuperación del 69.3 y un índice de concentración del 71.28, para el manto 1.

Partiendo de este análisis, se planteara el diseño experimental para el proceso de concentración seleccionado.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO SELECCIONADO

El diseño experimental, es la planificación racional de las experiencias a realizar, de manera que podamos obtener de sus resultados el máximo de información con un número mínimo de experiencias, lo que indudablemente tiene incidencia en el costo y tiempo de investigación.

En una investigación experimental de este tipo hay muchos factores que pueden afectar la variable respuesta, la utilización de un modelo estadístico al planificar y evaluar los resultados es una ayuda muy valiosa porque nos proporciona una información precisa acerca del fenómeno investigado.

4.1 SELECCIÓN DE VARIABLES

Dentro de la técnica de diseño experimental, lo fundamental es definir inicialmente las variables a evaluar, y conocer de qué tipo son. Este diseño se basa en el sistema multivariable, que tiene dos tipos de variables; variables de entrada y variables de salida.

4.1.1 Variables de entrada. Son variables independientes, las cuales definen las características del proceso y dependiendo de los valores relativos que tomen determinan el valor de otras variables del sistema (variables independientes).

Para el presente estudio se evaluaron tres variables de entrada:

A = Tiempo de acondicionamiento (min.)

B = Cantidad de colector (ácido oleico).

C = pH de flotación.

4.1.2 Variables de salida. Son variables dependientes y sus valores dependen de los valores de entrada. En este proyecto las variables de salida que nos interesan son el %recuperación y la ley del concentrado. En el desarrollo de este proyecto permanecieron fijas durante todo el proceso algunas variables, tomando valores fijos durante toda la experimentación; valores que están basados en datos de experimentos anteriores.

Las variables fijas fueron:

- **Diámetro de partícula.**
- **Temperatura de flotación.**
- **Agitación y aireación de la pulpa.**
- **% Pulpa.**
- **Tiempo de residencia.**

4.2 ENSAYOS PRELIMINARES DE FLOTACIÓN

Con base en la investigación bibliográfica y en los resultados de pruebas preliminares, se determinaron los niveles de las variables de entrada, (Véase el ítem 5.1).

4.3 DISEÑO CENTRAL

La parte experimental final del presente proyecto se diseño utilizando un sistema factorial 2^3 , donde tres (3) corresponde al numero de variables de entrada, este sistema determina el numero de ensayos, ocho (8) en este caso.

Para este diseño se requiere dos niveles uno superior y uno inferior, indicados por los signos (+) y (-), en cada uno de los cuales las variables toman un valor diferente; en la Tabla 40 se muestran los valores de los niveles para cada variable estudiada en el diseño experimental.

Tabla 40. Valores de niveles para cada variable estudiada en el diseño experimental.

VARIABLES		NIVELES	
		-	+
A	Tiempo (min.)	4	6
B	Colector (gotas) 1 gota (150 gr. acido oleico/ton min.)	6	9
C	pH	8	9

Fuente: Autor.

Para el diseño factorial 2^3 , se debe diseñar un numero de experiencias, de tal manera que se tenga en cuenta todas las posibles combinaciones de niveles para diferentes variables (A, B, C), así por lo tanto resultan ocho (8) experiencias como se muestra en la Tabla 41.

Tabla 41. Valores de las variables para cada ensayo y sus respectivas combinaciones de nivel.

ENSAYO	COMBINACIONES	VARIABLES		
		A	B	C
1	1	4	6	8
2	a	6	6	8
3	b	4	9	8
4	ab	6	9	8
5	c	4	6	9
6	ac	6	6	9
7	bc	4	9	9
8	abc	6	9	9

A: tiempo de acondicionamiento, B: cantidad de colector y C: pH de flotación.

Fuente: Autor.

4.4 ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO

El procedimiento experimental para la realización de los ensayos involucra una serie de etapas que son:

- Muestreo.
- Análisis físico y químico.
- Proceso de Conminución.
- Tamizado.
- Flotación.
- Filtración y secado.
- Análisis de SO₃.
- Análisis de recuperación.

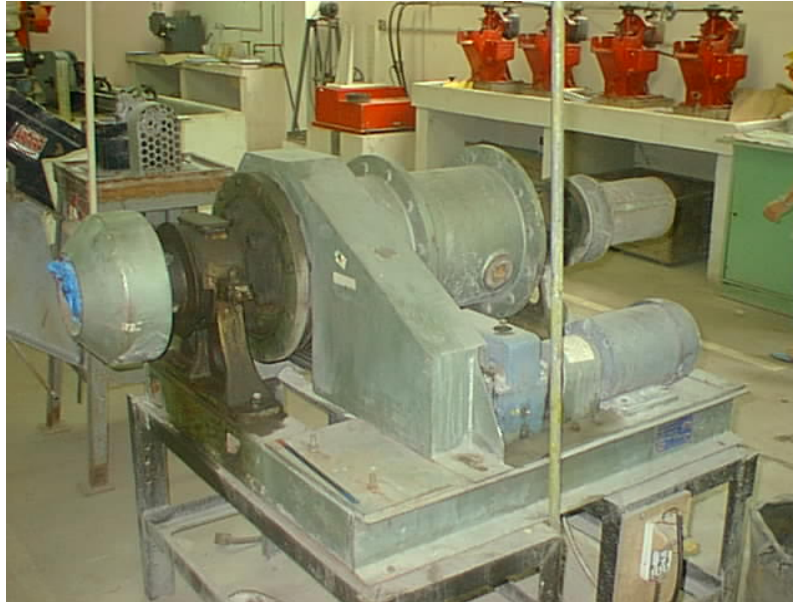
4.4.1 Muestreo. En la mina la Nacuma, ubicada en el municipio de los Santos, fueron tomadas de manera representativa las muestras de mineral de yeso, en presencia de un geólogo y el jefe de la mina. Se tomaron 200 Kg. de mineral de yeso.

4.4.2 Análisis físico y químico. A partir de este análisis se identifica las fases que integran cada manto, además del porcentaje respectivo de cada fase en la muestra, con lo cual se pueden determinar los estériles que se desean reducir en el proceso de extracción de mineral de yeso. Este análisis se realizó por difracción de rayos X, con 50 gramos de una muestra representativa por manto, pulverizada hasta un tamaño de 25 μm ; en donde el análisis cualitativo de las fases presentes se realiza mediante la comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del (ICDD). El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realiza mediante el refinamiento por Rietveld de perfil observado que contiene una cantidad conocida de un estándar interno.

4.4.3 Proceso de Conminución. La trituración fue hecha en seco a cada manto por separado, en una trituradora de mandíbula tipo Denver. Las muestras fueron reducidas a un tamaño, entre (0.5 – 1) cm. De la sección de trituración el mineral se envía a un molino de bolas marca Denver, ver la fotografía en la Figura 40.

El molino se mantiene lleno de material triturante hasta 1/3 de su capacidad, y es movido a una velocidad constante a la cual la acción de rodamiento y de cascada tienen el efecto máximo de trituración y molienda; la acción de cascada tritura el mineral por impacto y la acción de rodamiento por fricción.

Figura 40. Molino de bolas marca Denver.



Fuente: Autor.

4.4.4 Tamizado. Las muestras fueron tamizadas a un diámetro promedio de 180 μm , con el fin de obtener un tamaño de partícula homogéneo con el mejor %SO₃, ver la fotografía en la Figura 41.

4.4.5 Flotación. Los experimentos de flotación se realizaron en una celda Denver con capacidad de 1 litro, a 1200 rpm.

El mineral se mezcló con agua en una proporción aproximada de 30% de sólidos, se utilizó ácido oleico como espumante y colector en una cantidad de 6 y 9 gotas (900 y 1350 gr. reactivo / ton mineral) respectivamente.

Figura 41. Tamizador de laboratorio marca Deco.



Fuente: Autor.

La suspensión de los sólidos fue acondicionada durante 2 minutos, antes de agregar el ácido oleico. El pH fue variado entre 8.0 y 9.0 usando hidróxido de sodio (NaOH) 1M. Se realizaron ocho (8) ensayos aleatorios de flotación respetando las combinaciones de los niveles respectivos.

A = pH de flotación, 8 y 9.

B = Cantidad de colector (6 y 9 gotas) 900 y 1350 gr. Acido oleico / ton mineral respectivamente.

C = Tiempo de acondicionamiento, 4 y 6 minutos.

Estas combinaciones de las variables de entrada se especifican en la tabla 41. Las variaciones del pH de flotación, se hicieron agregando NaOH hasta obtener el pH requerido para cada ensayo.

En todos los ensayos permanecieron fijas las siguientes variables:

- **Mezcla entre el manto 1 y 3, en proporción (2:1) respectivamente.**
- **Diámetro de partícula (150 -180) μm .**
- **Temperatura de flotación (Ambiente, 20°C).**
- **Agitación y aireación de la pulpa (1200 rpm).**
- **Pulpa (30% de sólidos).**
- **Tiempo de residencia (30 min.).**

Figura 42. Celda de flotación con espumas obtenidas, marca Denver.



Fuente. Autor.

Después de treinta (30) minutos de flotación se recogió el producto **underflow** y el producto **overflow**, ver la fotografía en la Figura 42.

4.4.6 Filtración y secado. Se utilizó una prensa filtro marca Denver de capacidad de 30 litros, para filtrar el concentrado y las colas, aplicando presión de 40 psi, durante un tiempo aproximado de 2 minutos. La torta extraída, se seca a temperatura ambiente con un tiempo de secado de 1 y ½ hora respectivamente, ver fotografía en la Figura 43.

Figura 43. Prensa filtro utilizada en pruebas, marca Deco.



Fuente: Autor.

4.4.7 Análisis de SO₃. Se utiliza el analizador de sulfuro de doble rango (S-144DR) marca LECO. Este aparato mide el % SO₃ que contiene el mineral de yeso. Se utiliza un fundente (trióxido de tungsteno) para que la muestra entre en combustión.

El procedimiento es el siguiente; Se toman 0.15 gr. de mineral de yeso pulverizados con 1.2 gr. de fundente, a una temperatura de 1400 °C durante aproximadamente 120 seg. El analizador mide la cantidad de gas (SO₃) que produce la combustión.

4.4.8 Análisis de recuperación y pureza. Después de haber secado, pesado y analizado las muestras del concentrado y las colas, se procede a calcular los porcentajes de recuperación y pureza, por medio de indicadores metalúrgicos.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO SELECCIONADO

5.1 RESULTADOS DE ENSAYOS PRELIMINARES

Para determinar las condiciones de trabajo y las variaciones de los niveles, se hicieron diferentes ensayos de flotación.

5.1.1 Determinación de las variables fijas del proceso de flotación. Las variables fijas para las cuales se hicieron pruebas preliminares fueron: granulometría y tiempo de residencia, cuyos resultados se presentan a continuación.

A. Granulometría. Las mezclas de mineral (manto 1 y 3) con un diámetro de partícula 180 μ m, se prepararon en proporción (1:1 2:1 3:1 y 4:1) respectivamente. Se homogenizaron las muestras por 2 min. Los ensayos fueron realizados en una celda de flotación Denver de 1 litro de capacidad a 1200 rpm y a temperatura ambiente, utilizando como reactivo y espumante 1350 gr. ácido oleico/ton mineral. La concentración de sólidos en la celda de flotación fue del 30% sólido y un pH de flotación de 8.

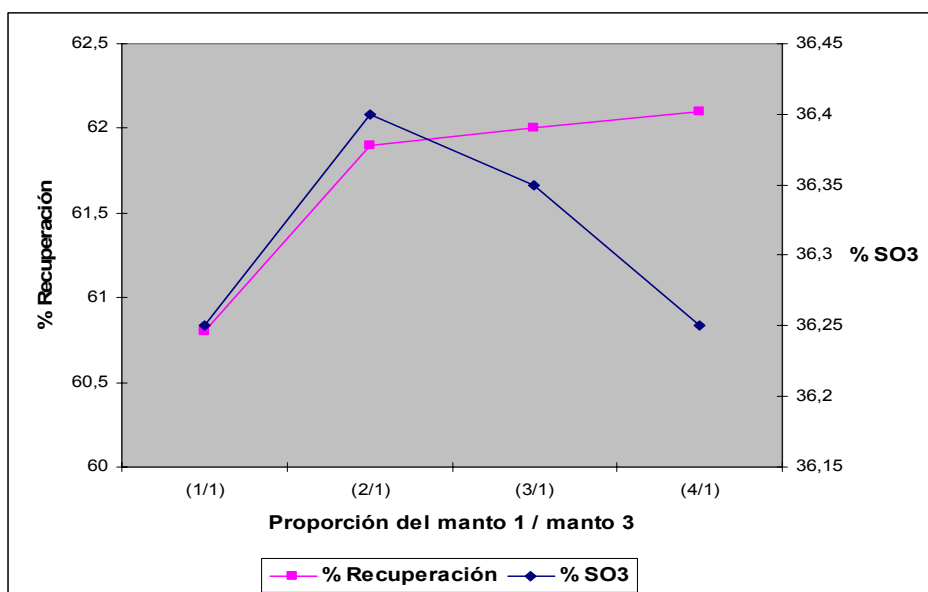
La Tabla 42 y la Figura 44 presentan los resultados para 20 minutos de flotación y se observa que los mejores valores se obtuvieron con una proporción de 2:1 para el manto 1 y 3, respectivamente, con una recuperación del 61.9 % y una ley de concentrado de 36.4 % SO₃.

Tabla 42. Influencia de la mezcla entre los mantos 1 y 3, en el % recuperación y ley del concentrado.

Proporción entre los mantos 1 y 3	% Recuperación	% SO ₃
1:1	60.8	36.2
2:1	61.9	36.4
3:1	62.0	36.3
4:1	62.1	35.2

Fuente: Autor.

Figura 44. Influencia de la mezcla entre los mantos 1 y 3, en el % recuperación y ley del concentrado.



Fuente: Autor.

B. Tiempo de acondicionamiento. La diferencia de % SO₃ del mineral entre el manto 1 y la mezcla 2:1, es leve, en consecuencia se hace una analogía del comportamiento del proceso de concentración. Se tomaron los resultados de la

Tabla 31 y Figura 36, donde se evaluó el tiempo de acondicionamiento, y se tomaron dos valores, uno mínimo y otro máximo, como son 4 y 6 minutos, respectivamente.

C. Cantidad de colector. La diferencia de % SO_3 del mineral entre el manto 1 y la mezcla 2:1, es leve, en consecuencia se hace una analogía del comportamiento del proceso de concentración. Se tomaron los resultados de la Tabla 29 y Figura 34, donde se evaluó la cantidad de reactivo, y se tomaron dos valores, uno mínimo y otro máximo, como son 6 y 9 gotas (900 y 1350 gr. ácido oleico / ton mineral), respectivamente.

D. pH. La diferencia de % SO_3 del mineral, entre el manto 1 y la mezcla 2:1, es leve, en consecuencia se hace una analogía del comportamiento del proceso de concentración. Se tomaron los resultados de la Tabla 31 y Figura 36, donde se evaluó el pH del mineral, y se tomaron dos valores, uno mínimo y otro máximo, como son un pH de 8 y 9, respectivamente. Se utiliza hidróxido de sodio como regulador del pH (200 gr. NaOH/Ton mineral).

5.2 RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

La Tabla 43, muestra los valores correspondientes al porcentaje de recuperación del mineral, los cuales se obtuvieron comparando los pesos iniciales y finales, antes y después de cada flotación realizando el respectivo balance de masa.

Cada uno de estos ensayos fue realizado por duplicado y se promediaron los resultados correspondientes al porcentaje de recuperación. Ver Tabla 43.

Tabla 43. Determinación del polinomio respuesta.

ENSAYO	COMBINACIONES	VARIABLES			% RECUPERACIÓN
		A	B	C	
1	1	4	6	8	62,3
2	a	6	6	8	64,2
3	b	4	9	8	68,4
4	ab	6	9	8	69,5
5	c	4	6	9	71,5
6	ac	6	6	9	72,8
7	bc	4	9	9	75,1
8	abc	6	9	9	76,2

A: tiempo de acondicionamiento, B: cantidad de colector y C: pH de flotación

Fuente: Autor.

5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS Y AJUSTE DEL MODELO MATEMÁTICO

5.3.1 Análisis de varianza. El análisis de varianza sirve para medir el error de las estimaciones dadas por los modelos estadísticos entre datos observados y datos estimados. Mide la variación con respecto a la media aritmética, calcula el error antes y después del ajuste, en conclusión mide el error de las medias. Por lo tanto es necesario un análisis estadístico para observar el desajuste del modelo matemático con los resultados experimentales.

En la Tabla 44, se presentan los porcentajes de recuperación de SO₃ para cada uno de los ensayos, las filas indican los ensayos y las columnas el número de

repetición. Además se calcula la sumatoria de los ensayos (totales), la sumatoria de las repeticiones (total) y la media de los ensayos.

Tabla 44. Variable respuesta para los ensayos de flotación.

ENSAYOS	REPETICIONES	1	2	TOTAL	MEDIA
1	1	62.1	62.5	124.6	62.3
2	a	63.9	64.5	128.4	64.2
3	b	68.1	68.7	136.8	68.4
4	ab	69.4	69.6	139.0	69.5
5	c	71.3	71.7	143.0	71.5
6	ac	72.6	73.0	145.6	72.8
7	bc	74.9	75.3	150.2	75.1
8	abc	76.0	76.4	152.4	76.2
	Totales	558.3	561.7	1120.0	560.0

Fuente: Autor.

Los resultados del análisis de varianza con base en los datos de las Tablas 43 y 44 se presentan en las Tablas 45 y 46.

Tabla 45. Análisis de varianza para los ensayos de flotación.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CM	F
Ensayos	340.56	7	48.65	5932.93
Repeticiones	0.7225	1	0.7225	88.11
Error	0.0575	7	0.0082	3.79
Total	341.34	15	---	237

Fuente: Autor.

Tabla 46. Análisis de varianza para el % Recuperación.

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Tiempo	1	3.645	3.645	5.53	0.078
Colector	1	42.320	42.320	64.24	0.001
Ph	1	121.680	121.680	184.71	0.000
Error	4	2.635	0.659		
Total	7	170.280			

S = 0,811634 R-Sq = 98,45% R-Sq (adj) = 97,29%

Fuente. Autor.

Como el F tabulado de los ensayos es mayor que el F tabulado de las repeticiones, se concluye que las variables estudiadas tiene un efecto significativo sobre la variable respuesta, es decir, la cantidad de reactivo y el pH estadísticamente influyen en el porcentaje de recuperación.

Además de esto se puede observar que el F calculado de las repeticiones es menor que el F tabulado, lo que indica que en las repeticiones no hubo diferencia estadística, por lo tanto las repeticiones para cada ensayo reportan resultados homogéneos.

5.3.2 Determinación del polinomio respuesta. Como la variable respuesta (% Recuperación de SO₃) es función de los factores y sus interacciones, se puede expresar por una ecuación ajustada y conocida como polinomio respuesta. Sin embargo, el polinomio respuesta debe considerarse como una aproximación solamente dentro de la región cubierta por los niveles de las variables estudiadas en el experimento y no es extrapolable.

De acuerdo con esto se obtiene el siguiente polinomio respuesta cuyo procedimiento y cálculo se encuentran en el anexo C.

$$\% \text{Recuperación} = 0,511 \text{ Tiempo} + 1,42 \text{ Colector} + 6,68 \text{ pH}$$

El uso de esta ecuación está restringido a los rangos en que se tomaron las variables, es decir, el tiempo de acondicionamiento entre 4 y 6 minutos, el pH de flotación entre 8 y 9, y la cantidad de colector entre 6 y 9 gotas, (900 y 1350) gr. Acido oleico/ton mineral respectivamente.

En el polinomio se observa que las variables: tiempo de acondicionamiento, pH y cantidad de colector tienen una influencia positiva con respecto a la media general, siendo la variable pH de flotación la que mayor influencia tiene sobre el porcentaje de recuperación.

5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La comparación realizada entre la distribución normal (F tabulado) $F_{.95}$ y la distribución de los ensayos (F calculado), establece que la variación en los niveles de las variables estudiadas: tiempo, cantidad de colector y pH, en todos los tratamientos produce un cambio estadístico significativo en la variable respuesta: porcentaje de recuperación de mineral, es decir, el efecto de los factores conduce a una variación significativa.

El polinomio respuesta obtenido muestra que el tiempo de acondicionamiento es una variable que ejerce muy poca influencia en los ensayos a diferencia de las variables cantidad de colector y pH, de acuerdo a lo observado experimentalmente, donde en los ensayos 7 y 8 se obtienen los mayores porcentajes de recuperación y son precisamente los ensayos donde varía el tiempo de acondicionamiento, manteniéndose la cantidad de colector y pH de flotación en los niveles mas altos.

Como se observa en el polinomio respuesta las variables que tienen mayor influencia sobre el porcentaje de recuperación son el pH de flotación y la cantidad de colector, en concordancia con lo observado experimentalmente.

Según los datos obtenidos, el mayor porcentaje de recuperación se obtuvo a un pH de flotación de 9.0, una cantidad de colector de 9 gotas (1350 gr. ácido oleico / ton mineral) y un tiempo de acondicionamiento de 6 minutos; que corresponden a los niveles mas altos reportados en el diseño experimental, siendo por tanto estas las condiciones óptimas para la obtención de un alto porcentaje de recuperación.

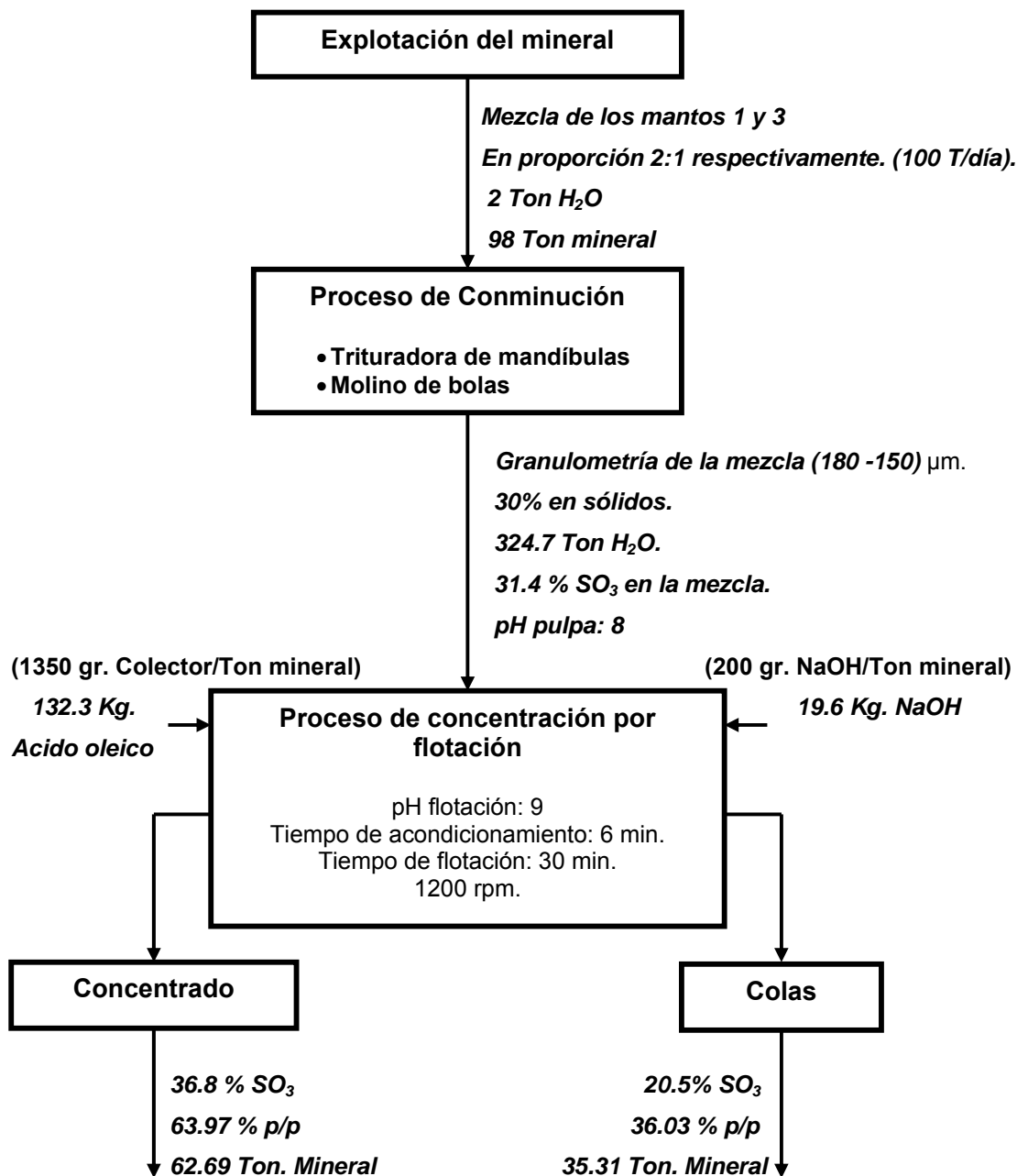
De acuerdo al análisis de SO_3 realizado al concentrado, este arroja excelentes resultados (36.8 % SO_3), lo que garantiza un material homogéneo de buena

calidad, el cual puede ser utilizado como materia prima en la fabricación del cemento.

5.5 ELECCIÓN DEL ESQUEMA DE TRATAMIENTO

En la Figura 45 se presenta un diagrama de flujo del proceso de concentración seleccionado, adaptado para aplicar las técnicas del procesamiento de minerales en la purificación de yeso a partir del mineral extraído de la mina la nacuma, de acuerdo con el proceso estudiado y desarrollado en el transcurso de la investigación. El beneficio del yeso contempla las etapas que a continuación se describen.

Figura 45. Diagrama de flujo del proceso de concentración.



% Recuperación de yeso purificado para la planta = 76.2%

6. CONCLUSIONES

Este estudio facilitó la selección y aplicación entre cuatro procesos de concentración, del proceso de Flotación para su utilización en la recuperación de mineral de yeso con base a su porcentaje de SO_3 , a partir de mineral extraído de la mina, utilizando las operaciones comúnmente utilizadas en el procesamiento de minerales.

A menor % SO_3 presente en el mineral, los resultados de concentración son mejores en todos los procesos utilizados. Por consiguiente el manto 1 (Churca) arroja los más altos índices de concentración, seguido por el manto 3 (Enchaquetada).

La concentración de yeso sobre el manto 2 (Lajeo), dio resultados negativos, además, no es rentable concentrar el mineral de yeso con alto contenido % SO_3 , solo por aumentar en uno o dos puntos su ley.

La aplicación del método de concentración por medio de la mesa de sacudimientos wilfley no es el apropiado debido a la escasa diferencia entre las densidades de las especies mineralógicas presentes en el mineral en estudio, lo cual impide el correcto funcionamiento del proceso de concentración.

Los métodos de concentración del Hidrociclón y la espiral Humphreys, tienen un comportamiento similar, debido a que tienen variables operativas en común. El índice de concentración fue del 44.65 para el espiral y del 56.62 para el Hidrociclón, comparando estos valores con el índice de concentración obtenido en el proceso de flotación que fue del 71.28, se descartaron para su posible utilización en el beneficio de mineral de yeso.

Se obtuvo una ecuación que correlaciona el pH de flotación, la cantidad de colector y el tiempo de acondicionamiento con el porcentaje de recuperación de SO₃. Estas son aplicables a los rangos de pH de flotación, cantidad de colector y tiempo de acondicionamiento experimentados.

$$\% \text{Recuperación} = 0,511 \text{ Tiempo} + 1,42 \text{ Colector} + 6,68 \text{ pH}$$

A través del análisis estadístico se estableció que las mejores condiciones para obtener un alto porcentaje de recuperación de %SO₃ son: un pH de flotación de 9, un tiempo de acondicionamiento de 6 minutos y 1350 gr. Acido oleico/ton mineral (9 gotas) como colector. Obteniendo un porcentaje de recuperación del 76.2% y una ley del 36.8 %SO₃.

A través del proceso de flotación se garantiza un aumento en el porcentaje de SO₃ en el mineral, de acuerdo al análisis realizado al concentrado, arrojando excelentes resultados (36.8 %SO₃), lo que garantiza un material homogéneo de buena calidad, el cual puede ser utilizado como materia prima en la fabricación del cemento Pórtland.

7. RECOMENDACIONES

Es conveniente durante la trituración secundaria, hacer una clasificación por tamaño, que garantice una granulometría de alimentación a molienda mas fina y uniforme posible, disminuyendo de esta forma, el tiempo de molienda, consecuentemente los costos y aumentando el rendimiento de la operación de reducción de tamaño a las condiciones pedidas.

En lo posible se deben mantener constantes las mejores condiciones de trabajo, pues una variación en cualquiera de estas, puede alterar significativamente los resultados finales.

Adelantar estudios sobre la aplicación de estas técnicas en otros tipos de sales que hacen parte de la minería de no metálicos, como contribución al crecimiento de la minería en el país.

Realizar posteriores estudios sobre la factibilidad económica de este proceso a fin de que pueda ser realizado a escala industrial.

8. BIBLIOGRAFÍA

ANGULO, R. Recursos Minerales de Colombia. Publicaciones Geológicas Especiales, 2ª Edición. Ingeominas. Bogota, Tomo II.

CASTELLANOS, M. Prospectiva de procesos químicos para los minerales de caolín y yeso de la Provincia Guanentina. Ingeniería Química. U.I.S. 1989.

CONCHA, F. y CASTRO, S. Avances de flotación. Escuela de minas, Universidad de Concepción, Chile, Volumen 1.

DAZA, I. Minería del yeso en Colombia. Ministerio de Minas y Petróleos. Bogota. 1972.

HURLBUT, C. manual de mineralogía de Dana.. Editorial Reverté S.A, 2ª Edición. España, 1977.

KELLY, G. SPOTTISWOOD, D. Introducción al procesamiento de minerales. Editorial Limusa, 2ª Edición S.A. España, 1990.

LAKOWSKI, J. Fundamentos fisicoquímicos de la mineralurgia. Universidad de Concepción, Chile, 1974.

MURRAY. S. Estadística. Editorial Mc Graw Hill, 2ª Edición México. 1999.

PEDRAZA, Julio. Conferencias. Mesa de sacudimientos Wilfley. U.I.S. Bucaramanga, Colombia, 1985.

RODRÍGUEZ, W. Estudio mineralúrgico de concentración gravimétrica para la recuperación de oro a partir de arenas cianuradas. Escuela superior politécnica del litoral. Guayaquil, Ecuador, 1996.

SUTULOV, Alexander. Flotación de minerales. Universidad de Concepción. Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Chile, 1963.

WYMAN, R. The Flotability of twenty-one Non- Metallic Minerals. Canadá. 1969.

<http://www.cs.coremisgm.gob.mx/informes/pendientes/t3282sina0002.pdf>.

<http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/MarcoNuevo>.

ANEXO A: ANÁLISIS Y ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

<p style="font-size: 8px;">CEMENTOS DIAMANTE DE BUCARAMANGA S.A. PLANTA BUCARAMANGA</p>	<p>MANUAL DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD</p>	<p>FECHA 16/11/01</p>	<p>Página 1 de 1</p>	
		<p>REVISION 1.0</p>	<p>C-ASG-I-12</p>	
			<p>CONTROL</p>	<p>SI</p>

DETERMINACION DE LA HUMEDAD DEL YESO

1. ESTRUCTURA DE RESPONSABILIDAD

- 1.1 Departamento Emisor : Aseguramiento de Calidad
- 1.2 Operación : Determinación de la humedad del yeso
- 1.3 Responsable : Auxiliar Control de calidad
- 1.4 Ejecutor : Analista

2. REALIZACION

- 2.1 Pese no menos de 250 gramos de la muestra acumulada de yeso sobre un vidrio reloj.
- 2.2 Introduzca el vidrio de reloj y su contenido en el horno de secado, durante 4 horas, a una temperatura de 45° C.
- 2.3 Saque el vidrio de reloj del horno de secado y déjelo enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente.
- 2.4 Pese el vidrio reloj con su contenido.
- 2.5 Realice el siguiente cálculo:

$$\% \text{ HUMEDAD} = \frac{P1 - P2}{Pm} \times 100$$

P1 = Peso de la muestra de yeso en el vidrio de reloj (húmeda)

P2 = Peso de la muestra de yeso en el vidrio reloj (seca)

Pm = Peso de la muestra acumulada de yeso (250 gramos)

NOTA:

- La muestra acumulada de yeso utilizada es según el instructivo "Toma y manejo de la muestra de yeso" (C-PRO-I-2).
- El vidrio reloj debe estar previamente tarado.
- Temperatura del cuarto de ensayos físicos: 20° C a 27,5° C.
- Humedad relativa del cuarto de ensayos físicos: mayor de 50 %.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL

- Secar la muestra a una temperatura de 40 ± 5 °C.
- La granulometría del mineral debe ser < 4.75 mm.
- Pesarse el picnómetro vacío, M_f , previamente limpio y seco (secar en estufa de laboratorio).
- Introducir dentro del picnómetro el mineral en estudio (ocupando entre la mitad y los $\frac{3}{4}$ parte del volumen del picnómetro) y pesarse, restando la masa del picnómetro vacío (M_f), y así determinar el peso de la muestra seca (M_o).
- Adicionar líquido para humectar completamente el sólido y sacar todas las burbujas de aire que están presentes. Este líquido debe humectar completamente el mineral y además no presente ninguna reacción con el sólido.
- Completar con el líquido hasta llenar el picnómetro (tener en cuenta la tapa y el capilar) y pesarse, M_b .
- Vaciar el picnómetro y limpiarlo.
- Llenar el picnómetro con el líquido elegido y pesarse, M_a .
- Introducir el termómetro en el agua y registrar la temperatura, con 0.5 °C de precisión.

Calculo de la densidad.

$$\rho = \frac{M_o \times \rho_l}{[M_o + (M_a - M_b)]}$$

Donde:

ρ = Densidad real del mineral.

M_o = Peso de la muestra sólida seca.

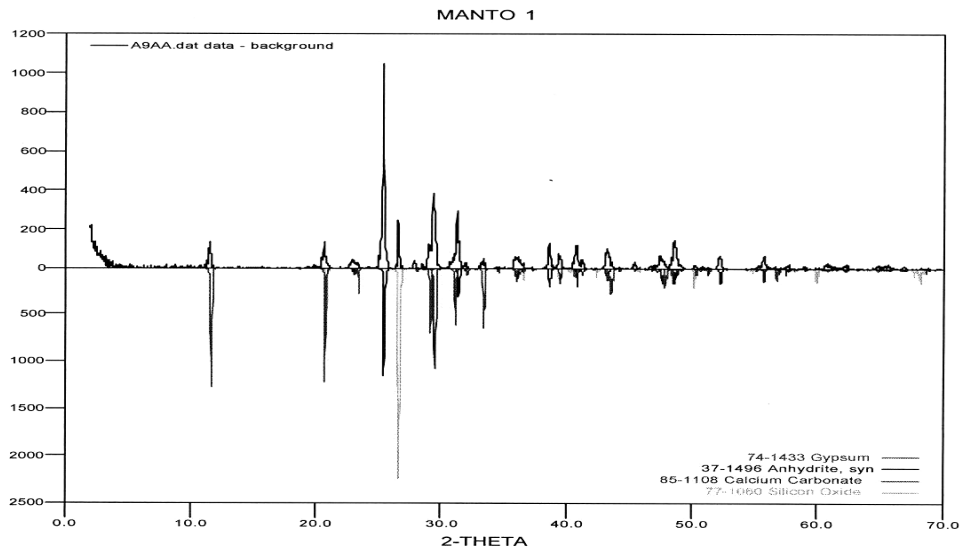
ρ_l = densidad del líquido

M_a = Peso del picnómetro lleno de agua.

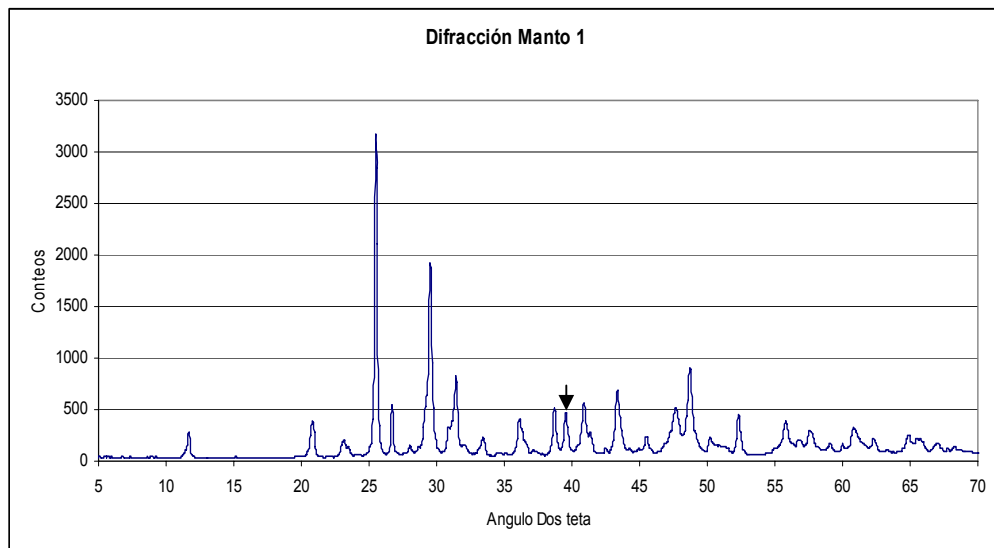
M_b = Peso del picnómetro con agua mas muestra.

**ANEXO B: DIFRACTÓGRAMAS DE LA MENA DE LOS MANTOS
(CHURCA, LAJEO Y ENCHAQUETADA).**

**DIFRACTÓGRAMA DEL MANTO 1 (CHURCA).
LABORATORIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. U.I.S.**

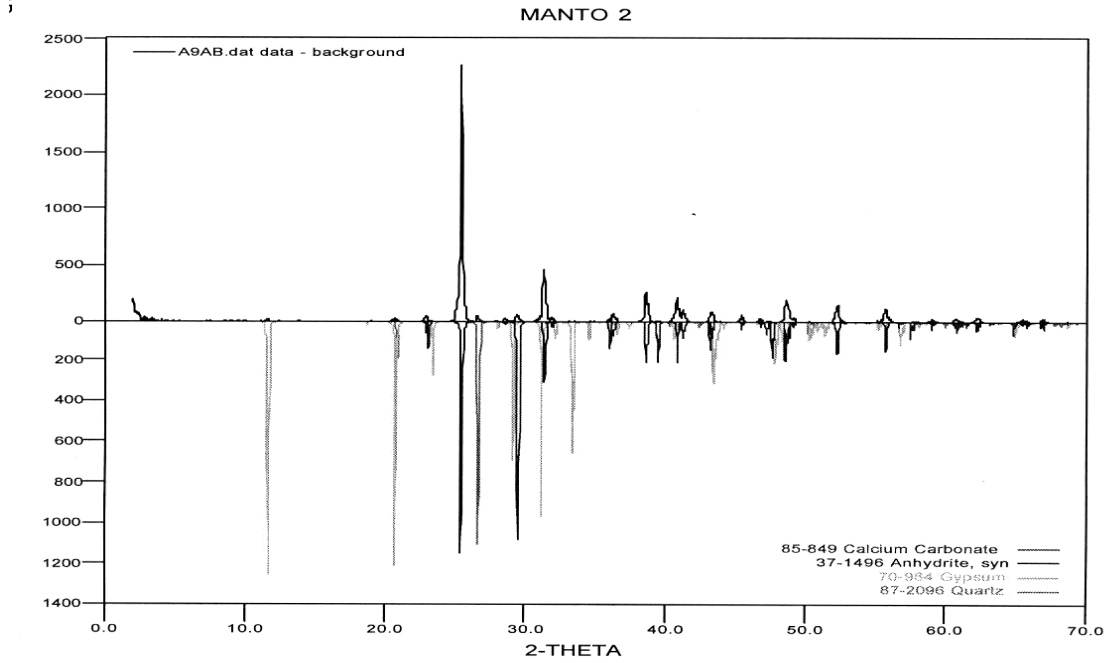


LABORATORIO PLANTA CARACOLITO. CEMEX COLOMBIA S.A.

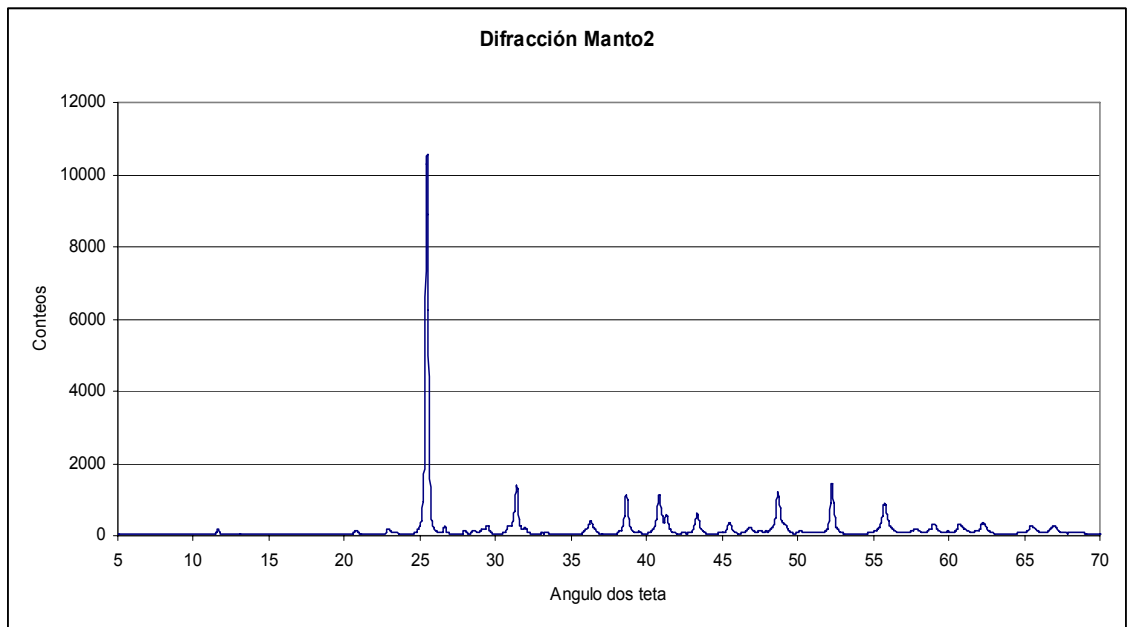


An: Anhidrita Qz: Cuarzo Ca: Calcita Do: Dolomita Ye: Yeso

**DIFRACTÓGRAMA DEL MANTO 2 (LAJEO).
LABORATORIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. U.I.S.**

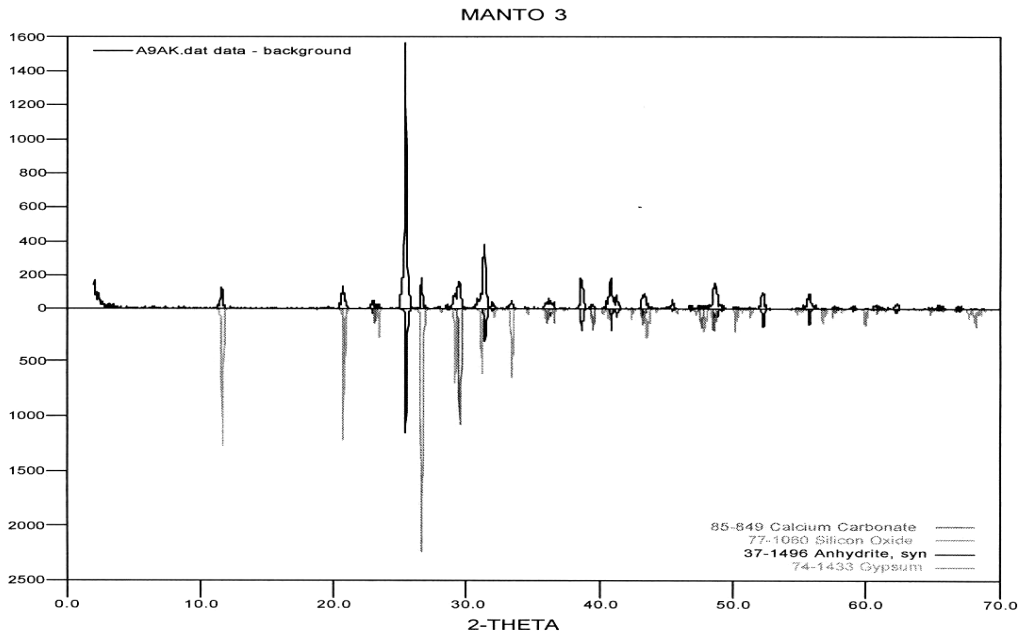


LABORATORIO PLANTA CARACOLITO. CEMEX COLOMBIA S.A.

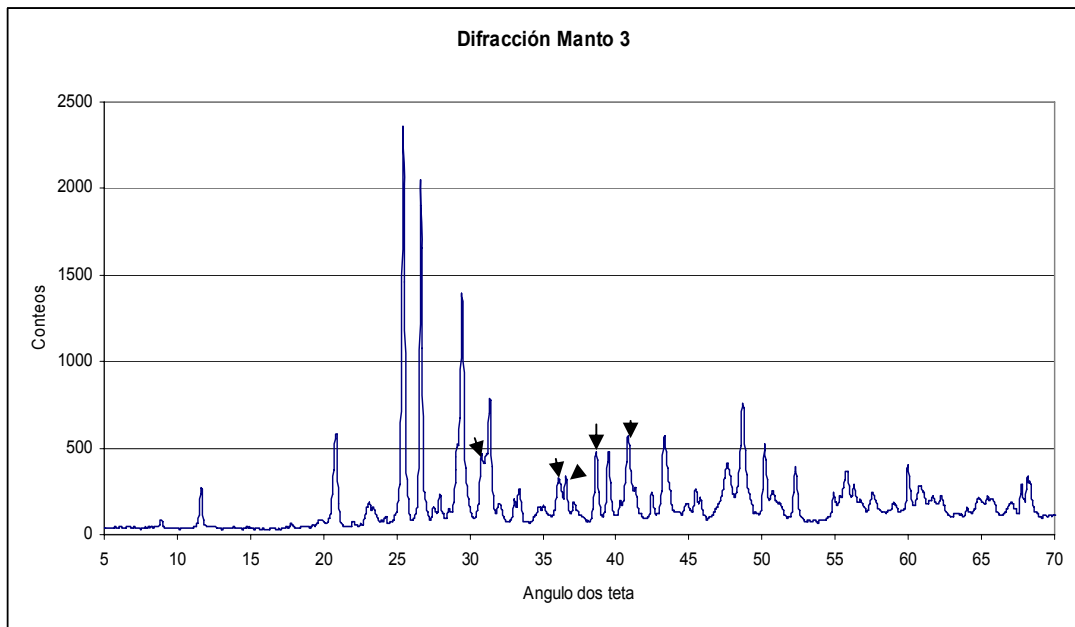


An: Anhidrita Qz: Cuarzo Ca: Calcita Do: Dolomita Ye: Yeso

DIFRACTÓGRAMA DEL MANTO 3 (ENCHAQUETADA)
LABORATORIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X. U.I.S.



LABORATORIO PLANTA CARACOLITO. CEMEX COLOMBIA S.A.



An: Anhidrita Qz: Cuarzo Ca: Calcita Do: Dolomita Ye: Yeso

ANEXO C: MANEJO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL.

ANÁLISIS DE VARIANZA

Los resultados obtenidos para el diseño experimental 2^3 los ensayos de flotación se muestran en la Tabla 44, en ella también se muestra la sumatoria de los tratamientos (total), de las repeticiones (totales) y la media de los tratamientos. El análisis de varianza para los tratamientos se calcula utilizando las fórmulas que aparecen en la siguiente Tabla.

Donde:

- SCA= es la suma de cuadrados de los tratamientos.
- SCR=es la suma de cuadrados de las repeticiones.
- SCE= es el error experimental.
- SCT= es la suma de los cuadrados del total de las observaciones.
- n= es el total de los tratamientos.

Ecuaciones para el desarrollo del análisis de varianza.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CM	F
Tratamientos	$SCA = \left(\sum_{j=1}^k T_j^2 \right) / c - (GT)^2 / ck$	k-1	$CMA = \left(\frac{SCA}{k-1} \right)$	F calculado CMA/CME
Repeticiones	$SCR = \left(\sum_{j=1}^c R_j^2 \right) / k - (GT)^2 / ck$	c-1	---	
Error	SCE=SCT-SCA-SCR	K+n	$CME = \left(\frac{SCE}{n-k} \right)$	F tabulado Leído de tabla de valores Críticos para F.
Total	$SCT = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^k X_{ij}^2 - (GT)^2 / ck$	n-1	---	

C= es el total de las repeticiones.

T= es la sumatoria de los resultados de cada tratamiento.

R= es la sumatoria de los resultados de cada repetición.

X= el valor reportado para cada observación.

Aplicando las formulas se obtiene que:

$$\text{➤ SCA} = \{(124.62 + 128.42 + 136.82 + 1392 + 1432 + 145.62 + 150.22 + 152.42)/2 - (11202)/16\} = 340.56$$

$$\text{➤ SCR} = \{(558.32 + 561.72)/8 - (11202)/16\} = 0.7225$$

$$\text{➤ SCT} = \{(62.12 + 63.92 + 68.12 + 69.42 + 71.32 + 72.62 + 74.92 + 762 + 62.52 + 64.52 + 68.72 + 69.62 + 71.72 + 732 + 75.32 + 76.42) - (1120)2/16\} = 341.34$$

Después de realizados los cálculos se hace una comparación entre el F calculado y el F tabulado. El F tabulado se determino por tablas, para este caso, a un riesgo del 5% ($\alpha = 0.05$) con los grados de libertad: 7 para el error y 7 para los tratamientos. La notación del $F_{.95}$ tabulado con esas características es F (0.05; 7; 7), el valor obtenido de la tabla fue de 3.79.

Para las repeticiones se hizo lo mismo determinando el F tabulado por tablas a un riesgo del 5% ($\alpha = 0.05$) con los grados de libertad: 7 para el error y 1 para los tratamientos. La notación del $F_{.95}$ tabulado queda F (0.05; 1; 7), el valor obtenido de la tabla fue de 237.

La comparación de el F calculado con el $F_{.95}$ tabulado para los tratamientos, estima que si el primero es mayor, el análisis estadístico concluye que los factores investigados tuvieron influencia significativa en la variable respuesta, si es menor se concluye que los factores no tuvieron influencia significativa y que existieron

otras variables que no se tuvieron en cuenta pero que si influyeron de manera significativa.

Para las repeticiones, si el F calculado es menor que el $F_{.95}$ tabulado, no se presento diferencia estadística y los resultados son homogéneos.

Resultados del análisis de varianza.

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CM	F
Ensayos	340.56	7	48.65	5932.93
Repeticiones	0.7225	1	0.7225	88.11
Error	0.0575	7	0.0082	$F_{.95}$ tabulado tratamientos: 3.79
Total	341.34	15	---	$F_{.95}$ tabulado repeticiones: 237

POLINOMIO RESPUESTA

Para determinar el polinomio respuesta se utilizo el software Minitab y se obtuvo el siguiente resultado.

07/04/2006 12:37:31

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Results for: Worksheet 1

ANOVA: %Recuperación Vs Tiempo; Colector; Ph

FACTOR	TIPO	NIVELES	VALORES
Tiempo	Ajustado	2	4 – 6
Colector	Ajustado	2	6 – 9
Ph	Ajustado	2	8 – 9

Análisis de Varianza para el %Recuperación.

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Tiempo	1	3.645	3.645	5.53	0.078
Colector	1	42.320	42.320	64.24	0.001
Ph	1	121.680	121.680	184.71	0.000
Error	4	2.635	0.659		
Total	7	170.280			

S = 0,811634 R-Sq = 98,45% R-Sq (adj) = 97,29%

Fuente	Media cuadratica para cada termino usando el modelo de componentes restringidos del error de varianza
Tiempo	4 (4) + 4 Q[1]
Colector	4 (4) + 4 Q[2]
pH	4 (4) + 4 Q[3]
Error	0,6588 (4)

Análisis de Regresión: %Recuperación versus Tiempo; Colector; Ph

La ecuación de regresión es:

$$\% \text{Recuperación} = 0,511 \text{ Tiempo} + 1,42 \text{ Colector} + 6,68 \text{ Ph}$$

Fuente	Coef	SE Coef	T	P
Tiempo	0.5107	0.3593	1.42	0.214
Colector	1.4238	0.2395	5.94	0.002
Ph	6.6825	0.2891	23.11	0.000

S = 1,05578

Análisis de varianza.

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	3	39365	13122	1771.67	0.0000
Error Residual	5	6	1		
Total	8	39370			

Fuente	DF	Seq SS
Tiempo	1	37838
Colector	1	931
Ph	1	595

El % Recuperación es independiente del tiempo de acondicionamiento. Esta regresión es efectiva debido al valor de varianza (S) es de 1.05578.

ANEXO D: FICHA TÉCNICA DEL REACTIVO USADO



Laboratorios León S. A.

FICHA TECNICA ACIDO OLEICO

1. DESCRIPCION:

Líquido amarillo de olor característico

2. ESPECIFICACIONES:

- DENSIDAD RELATIVA: 0.900-0.906
- COLOR GARDENER: 4 máximo
- VALOR ACIDO (mg KOH/g): 194 mínimo
- ACIDOS GRASOS: 93.5 mínimo
- VISCOSIDAD (Pa-s) 25°C: 0.025-0.035
- CONTENIDO DE HUMEDAD: 0.1 máximo
- PUNTO DE INFLAMCION > 190° C
- INDICE DE REFRACCION 25°C: 1.46-1.47

3. USOS:

- Farmacéutico: como coadyudante para emulsiones, ungüentos y cosméticos
- Compuestos para pulimentar
- Lubricantes
- Flotación de minerales
- Intermedio para síntesis orgánica
- Aditivo para alimentos
- Base para jabones
- Fabricación de oleatos

4. PRESENTACION COMERCIAL:

- FRASCO x 500mL
- GALON

Carrera 25 No. 11-50 • Apartado Aéreo 728 - Cables "LION" • Bucaramanga - Colombia
GERENCIA: 6348314 • VENTAS: 6456773 - 6453804 - 6450666 - 6453472 - 6343447 • Fax: 6345919
E-mail: lableon@aolpremium.com