

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS EN LA CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA CON PRINCIPIO DE SEPARACIÓN EN CORRIENTES SUPERFICIALES DE AGUA, USANDO METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Marañón Molina José Daniel
Para optar al Título
Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre de 2019

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS EN LA CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA CON PRINCIPIO DE SEPARACIÓN EN CORRIENTES SUPERFICIALES DE AGUA, USANDO METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA

Tutora académica: Dra. Katherine Silva.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Marañón Molina José Daniel
Para optar al Título
Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre de 2019

Caracas, noviembre de 2019

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller José Daniel Marañón Molina, titulado:

“ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS EN LA CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA CON PRINCIPIO DE SEPARACIÓN EN CORRIENTES SUPERFICIALES DE AGUA, USANDO METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. José Luis De Abreu

Jurado Principal

Profa. Magda Acosta

Jurado Principal

Profa. Katherine Silva

Tutora Académica

Dedicatoria

Dedico este trabajo a toda mi familia, en especial a mis hermanas por ayudarme y apoyarme, a mis tíos, abuelos y amigos que fueron una parte fundamental en mis años de estudio.

Pero principalmente quiero dedicar este trabajo a mis padres, que son las personas que más quiero en mi vida y que gracias a todo su esfuerzo perfectamente mantenido a través del tiempo he logrado terminar una meta tan importante para mí.

Agradecimientos

A Dios.

A la virgen.

A la Universidad Central de Venezuela (UCV) por haberme formado profesionalmente y ayudarme a lograrlo.

A toda mi familia, en especial a mis padres por todo el apoyo, les agradezco de todo corazón.

A mi tutora académica, profesora Katherine Silva, por su apoyo incondicional y toda la confianza que depositó en mí para la realización de este trabajo de investigación.

Agradezco a todos los ingenieros y docentes que me guiaron a lo largo de mi carrera universitaria y un agradecimiento muy especial para el Ing. Utches por su apoyo desinteresado.

Agradezco a todos mis compañeros, con los que he compartido todos estos años de estudio.

Al profesor Marcial Pérez y a los técnicos, por el tiempo dedicado, las críticas constructivas y toda la colaboración prestada.

A todas las personas que de una u otra forma me ayudaron a finalizar esta etapa de mi vida.

Agradezco el apoyo incondicional de Bianca Sulbaran quien estuvo en todo momento.

Marañón M. José D.

**ESTABLECER LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS EN LA
CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA CON PRINCIPIO DE
SEPARACIÓN EN CORRIENTES SUPERFICIALES DE AGUA,
USANDO METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA**

Tutora Académica: Prof. Katherine Silva

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,
Minas y Geofísica. Departamento de Minas. Año 2019, 106 p.**

Palabras claves: Separación Gravimétrica, Mesa de Sacudidas - Wilfley,
Diseño Experimental – Superficies de Respuestas.

En este estudio, se desarrolló un diseño experimental de superficie de respuesta con tres niveles para modelar y optimizar tres parámetros de operaciones de la mesa de sacudidas tipo Wilfley, para realizar los ensayos se utilizaron tres materiales, a los cuales se les calculó la densidad y así formar dos tipos de mezclas, mezcla A con un criterio de concentración de 2,17 y la segunda llamada mezcla B con un criterio de concentración de 3,56. Los tres parámetros operativos de la mesa de sacudida usados son: ángulo de inclinación variando su valor en 6°, 8° y 10°, número de sacudidas por minuto de 258, 360 y 462 y un caudal de agua en la zona de alimentación de 7,45, 11,45 y 15,45 litros por minuto. Para ambas mezclas se utilizó un tamaño de partícula pasante malla 30 (0,595 mm) y retenido malla 200 (0,074 mm). Para poder optimizar estos parámetros se realizó un total de 20 ensayos a cada mezcla variando los valores de los parámetros según el diseño experimental de superficie de respuesta, con la finalidad de obtener los indicadores metalúrgicos de Razón de Enriquecimiento y recuperación. Los resultados fueron analizados estadísticamente con el software Minitab versión 18.1, cuyo análisis demostró para valores de inclinación entre 8 y 9 grados y una frecuencia de 300 a 450 sacudidas por minuto se logró un % de Recuperación del 50 a 80% y una Razón de Enriquecimiento de 6 a 8.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I.....	2
GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Objetivos de la Investigación	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Justificación de la investigación.....	3
Capítulo II.....	4
Marco teórico de la investigación.....	4
2.1. Antecedentes de la investigación.....	4
2.2. Concentración por gravedad	6
2.3. Concentración en mesas y canales.	9
2.4. Equipos de concentración en mesas y canales.....	12
2.4.1. Mesa de sacudidas	13
2.5. Índices metalúrgicos.....	19
2.5.1. Índices que relacionan calidad	19
2.5.2. Relación entre la recuperación (R) y la Razón de Enriquecimiento (RE). 20	
2.6. Metodología de superficies de respuesta.....	21
2.6.1. Elementos de la metodología de superficie de repuesta	21
2.6.2. Diseño de superficie de respuesta	22
2.7. Estadística en la concentración gravimétrica de minerales.....	25
Capítulo III	31
Marco Metodológico de la investigación.	31
3.1. Tipo de investigación.....	31
3.2. Diseño de la investigación.....	31
3.3. Objeto de estudio.....	32
3.4. Metodología del trabajo.	32
3.5. Condiciones iniciales de los equipos.....	33

3.6. Desarrollo experimental	34
3.6.1. Molienda del material	34
3.6.2. Análisis dimensional y morfológico	35
3.6.3. Ensayos de gravedad específica	39
3.6.4. Preparación de las mezclas	41
3.6.5. Ensayos en la mesa de sacudidas.....	42
Capítulo IV	50
Resultados y análisis.....	50
4.1. Condiciones Iniciales y Arreglos de equipos	50
4.2. Recopilación Bibliográfica.....	52
4.3. Análisis dimensional y morfológico	53
4.3.1. Análisis dimensional:	53
4.3.2. Análisis morfológico	57
4.4. Cálculo de caudal de alimentación del material.....	63
4.5. Cálculos de caudal de agua.....	65
4.6. Ensayos de gravedad específica, cálculo de densidad y preparación de las mezclas.....	66
4.7. Ensayos en la mesa de sacudidas.....	67
4.7.1. Ensayos de concentración, mezcla A	68
4.7.2. Ensayos de concentración, mezcla B	72
4.8. Parámetros óptimos de concentración gravimétrica, utilizando metodología de superficie de respuesta.	77
4.8.1. Análisis estadístico del diseño de superficie de respuesta de la Mezcla A	77
4.8.2. Análisis estadístico del diseño de superficie de respuesta de la Mezcla B	85
Conclusiones	95
Recomendaciones.....	97
Referencias bibliográficas.....	99
Anexos	101

ÍNDICE DE FIGURA

Fig. 1: Intervalos de tamaños de partículas para equipos de concentración gravimétrica (Kelly & Spottiswood, 1990).....	7
Fig. 2: Características de clasificación de los separadores por gravedad. (Kelly & Spottiswood, 1990).	8
Fig. 3: Distribución de partículas diferentes sobre una superficie.	10
Fig. 4: Trayectoria y clasificación de las partículas según su densidad bajo el efecto de una capa pelicular fluente (Blazy P, 1970).	12
Fig. 5: Mesa de sacudidas. (Taggart A, 1966).....	14
Fig. 6: Esquema de la distribución de los productos en una mesa de sacudidas. (Kelly & Spottiswood, 1990).....	15
Fig. 7: Estratificación vertical entre los riffles. (Wills, 1987)	16
Fig. 8: Relación entre la Recuperación (R) y la Razón de Enriquecimiento (RE). (Bustamante, 2008).	20
Fig. 9: Optimización del proceso de la mesa de agitación húmeda usando la superficie de respuesta metodología aplicada a la separación de cobre y aluminio de la fracción fina de trituradoras ELV. (Helga Jordão et al, 2016). 26	
Fig. 10: Aplicación de la metodología de superficie de respuesta y diseño giratorio compuesto central para modelar y optimizar un separador de gravedad múltiple para la concentración de cromita. (N. Alan, 2008).....	28
Fig. 11: Modelado y optimización del separador de gravedad múltiple. (N. Alan, 2007)	30
Fig. 12: Esquema de la Metodología de trabajo.	33
Fig. 13: Sistema de rodillos y molino Warman Galigher, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	35
Fig. 14: Balanza marca Mettler P2010 Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	36
Fig. 15: Agitador de tamices marca Doerr y tamices estandarizados A.S.T.M, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	36
Fig. 16: binocular con un sistema de luz reflejada, Laboratorio de geología y geoquímica.	38
Fig. 17: Balanza analítica Mettler H10W y Picnómetro, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	39
Fig. 18: Mezcla A Y B con 5% de liviano.	41
Fig. 19: Alimentador vibratorio marca Eriez Magnetics, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	43
Fig. 20: Sistema de alimentación de agua, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	44

Fig. 21: Inclinómetro marca Inogon.....	45
Fig. 22: A. Polea que conecta motor con mecanismo; B. Perilla que controla la velocidad de la superficie de la mesa, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	46
Fig. 23: Sistema de recolección de material, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	47
Fig. 24: Horno industrial marca The Grieve Corporation, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	48
Fig. 25: Concentrador magnético marca Eriez, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	49
Fig. 26: A. Riego con mangueras; B. Riego con tubería perforada, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.	52
Fig. 27: Curva granulométrica del material 1.	54
Fig. 28: Curva granulométrica del material 2.	55
Fig. 29: Curva granulométrica del material 3.	57
Fig. 30: Carta visual para la determinación de la esfericidad y redondez (Corrales, 1977).	58
Fig. 31: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 1.....	59
Fig. 32: Imagen del Material 1 con lupa binocular 2,5x.	60
Fig. 33: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 2.....	61
Fig. 34: Imagen del Material 2 con lupa binocular 2,5x.	61
Fig. 35: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 3.....	62
Fig. 36: Imagen del Material 3 con lupa binocular 2,5x.	63
Fig. 37: Comportamiento de corrida 16, Razón de Enriquecimiento bajo y % de Recuperación altos, Mezcla A.....	70
Fig. 38: Comportamiento de corrida 10, % de Recuperación bajo, Mezcla A.71	
Fig. 39: Comportamiento de corrida 17, Razón de Enriquecimiento y % de Recuperación buenos, Mezcla A.....	72
Fig. 40: Comportamiento de corrida 11, Razón de Enriquecimiento bajo y % de Recuperación altos, Mezcla B.....	75
Fig. 41: Comportamiento de corrida 10, % de Recuperación bajo, Mezcla B.76	
Fig. 42: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla A.	77
Fig. 43: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla A.	78
Fig. 44: Gráfica normal de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla A.	79
Fig. 45: Gráfica normal de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla A.	80

Fig. 46: Gráfica de contorno de Razón de Enriquecimiento, Mezcla A.	81
Fig. 47: Gráfica de contorno de % Recuperación, Mezcla A.	82
Fig. 48: Gráfica de superficie de Razón de Enriquecimiento, Mezcla A.	83
Fig. 49: Gráfica de superficie de % de Recuperación, Mezcla A.	84
Fig. 50: Gráfica superpuesta de contornos, Mezcla A.	85
Fig. 51: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla B.	86
Fig. 52: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla B.	87
Fig. 53: Gráfica normal de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla B.	88
Fig. 54: Gráfica normal de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla B.	89
Fig. 55: Gráfica de contorno de Razón de Enriquecimiento, Mezcla B.	90
Fig. 56: Gráfica de contorno de % Recuperación, Mezcla B.	91
Fig. 57: Gráfica de superficie de % de Recuperación, Mezcla B.	92
Fig. 58: Gráfica de superficie de Razón de Enriquecimiento, Mezcla B.	93
Fig. 59: Gráfica superpuesta de contornos, Mezcla B.	94

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1: Efecto de las variables en el rendimiento de la mesa. (R.O. Burt, 1984.)	17
Tabla 2: Ajustes de tabla para diversas tareas.(Gupta & D.S Yan, 2006)	18
Tabla 3: Condiciones iniciales de los equipos y arreglos.	50
Tabla 4: Análisis granulométrico del material 1.....	54
Tabla 5: Análisis granulométrico del material 2.....	55
Tabla 6: Análisis granulométrico del material 3.....	56
Tabla 7: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 1.....	59
Tabla 8: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 2.....	60
Tabla 9: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 3.....	62
Tabla 10: Datos de caudales del alimentador vibratorio.	64
Tabla 11: Datos para cálculo del Caudal de agua en la zona de alimentación.	65
Tabla 12: Datos para cálculo de Gravedad Específica, Material 1.	66
Tabla 13: Datos para cálculo de Gravedad Específica, Material 2.	66
Tabla 14: Datos para cálculo de Gravedad Específica, Material 3.	66
Tabla 15: Criterio de Concentración, Mezcla A y B.	67
Tabla 16: Diseño experimental de superficie de respuesta, Mezcla A.	68
Tabla 17: Razón de Enriquecimiento y % Recuperación de la mezcla A.....	69
Tabla 18: Diseño experimental de superficie de respuesta, Mezcla B.....	73
Tabla 19: Razón de Enriquecimiento y % Recuperación de la mezcla B.....	74
Tabla 20: Serie de Tamices ASTM.....	102
Tabla 21: Densidad de agua como función de temperatura.	104
Tabla 22: Datos de los ensayos, Mezcla A	105
Tabla 23: Datos de los ensayos, Mezcla B.	106

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, se ha reevaluado el uso de los sistemas de concentración gravimétricos debido al incremento en los costos de los reactivos de flotación, la relativa simplicidad de los procesos, diversidad de equipos, su eficiencia para separar por diferencia de densidades entre los minerales y la poca contaminación ambiental que produce por ser un proceso que no utiliza químicos.

Los métodos de concentración gravimétrica se usan para tratar una gran variedad de minerales, desde los sulfuros metálicos pesados hasta el carbón, en algunos casos con tamaños del orden de los micrones. Este tipo de concentración es un proceso productivo de bajo costo operacional debido a que no necesita el uso de ningún reactivo químico, utilizando solo agua (H₂O), ganando interés creciente cuando se buscan procesos alternativos.

Con este trabajo de investigación se pretende optimizar los parámetros operativos que permitan obtener el mayor porcentaje de Recuperación y Razón de Enriquecimiento de la mesa de sacudidas tipo Wilfley, adscrita al Laboratorio de Beneficio Mineral, en la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

La estructura de este proyecto está definido por capítulos, siendo el primero las generalidades de la investigación que nos definen el problema, su justificación y objetivos a desarrollar, seguidamente en el capítulo II se contempla el marco teórico, con antecedentes de la investigación y las bases teóricas necesarias para el desarrollo del trabajo, para el capítulo III marco metodológico donde se describe el tipo y diseño de investigación, población y muestra, instrumentos, en el capítulo IV recolección de datos y análisis de datos e interpretación, para finalizar las conclusiones y referencias utilizadas.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema.

Particularmente en el Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central De Venezuela cuenta con los equipos necesarios para el desarrollo de la concentración gravimétrica, como equipos de reducción de tamaño: trituradoras primarias y secundarias, molinos de barra y de bolas, también se posee equipos de clasificación de partículas y lavado de arenas y equipos propios de concentración gravimétrica: Espiral Humphreys, mesa de sacudidas, Jigs, clasificador Knelson. La mayoría de estos equipos se encuentran operando correctamente y los que no lo hacen, están en proceso de recuperación.

A pesar de poseer estos recursos, las investigaciones más importantes en esta área se realizaron hace más de dos décadas y los objetivos se enfocaban principalmente en la caracterización de las muestras de una zona en específico y de cómo concentrar dichos minerales. Los resultados de estos trabajos no son reproducibles para diferentes criterios de concentración o asociaciones mineralógicas.

Ante esta situación, es importante conocer los valores de los parámetros operativos de los equipos, que permitan obtener el mayor porcentaje de recuperación y grado de concentración.

Esta investigación se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuáles son los valores óptimos de los parámetros de concentración gravimétrica, dependiendo del criterio de concentración de la mezcla con las condiciones actuales de los equipos de la Escuela?

1.2. **Objetivos de la Investigación**

1.2.1. Objetivo General

Establecer los parámetros óptimos en la concentración gravimétrica con principio de separación en corrientes superficiales de agua de acuerdo con el criterio de concentración.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Revisión bibliográfica de los parámetros más importantes para la concentración gravimétrica en aguas superficiales, específicamente la mesa de sacudidas tipo Wilfley.
- Determinar la eficiencia de la concentración del equipo en función de los parámetros escogidos para materiales con diferentes valores de Criterio de Concentración.
- Obtener los parámetros óptimos de concentración gravimétrica, utilizando metodología de superficie de respuesta.

1.3. **Justificación de la investigación.**

Con la definición de los parámetros idóneos de los equipos de concentración gravimétrica, antes de realizar cualquier procedimiento, se logra disminuir o eliminar los errores, reduce los tiempos empleados en laboratorio, ya que, se disminuye la realización de ensayos exploratorios, además permite obtener el mayor porcentaje de Recuperación y Razón de Enriquecimiento. Resulta uno de los métodos más simples por la realización de los ensayos sin la necesidad de emplear reactivos y por la capacidad de separar por diferencia de densidades y; el laboratorio cuenta con equipos para la realización de este método. En consecuencia, encontrar los parámetros óptimos constituye un significativo aporte para el desarrollo de los trabajos de investigación y de asesoría en concentración mineral de oro, coltán y arenas pesadas las cuales pueden ser desarrollados por estudiantes y profesores.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.

2.1. Antecedentes de la investigación.

- López W. (2009) Aplicación de técnicas estadísticas a la flotación en columna para optimizar la recuperación de grafito proveniente del cerro Osumita, estado Cojedes. Trabajo especial de grado.

Resumen: El siguiente trabajo de investigación trata sobre la aplicación de técnicas estadísticas a la flotación en columna del grafito proveniente del cerro Osumita, ubicado en el municipio El Pao de San Juan Bautista, estado Cojedes. El objetivo fundamental de este trabajo es optimizar la recuperación del grafito, analizando los datos experimentales obtenidos en el laboratorio mediante un programa estadístico. En el Laboratorio de Preparación y Concentración de Minerales del Departamento de Minas se recibieron tres toneladas de muestra de roca grafitosa. Esta muestra contenía 5,87% de grafito puro y estaba húmeda. Inicialmente, la muestra se secó, se cuarteó y se caracterizó mediante descripción macroscópica y análisis granulométrico. Luego, fue triturada y molida, después, se caracterizó nuevamente mediante análisis de carbono y análisis granulométrico. Posteriormente, se realizó un diseño experimental, utilizando el diseño central compuesto rotatable (DCCR) para lo cual se consideraron tres factores de proceso: dosis de colector (keroseno), dosis de espumante (flotanol D25) y granulometría del mineral (% de partículas pasantes de la malla 100).

- Condoretty J. (2003) Obtención de concentrados de cromita a partir de los depósitos de peridotita ubicados en el Rodeo, Carirubana, estado Falcón. Trabajo especial de grado.

Resumen: El trabajo presenta el estudio de beneficio mineral de una mena de cromita ubicada en la región de El Rodeo de la Península de Paraguaná. El objetivo principal del estudio es la obtención de concentrados

de cromita a partir de estos depósitos, lo cual se logró a través de las siguientes etapas: caracterización de la mena y ensayos de concentración. Los ensayos de concentración se ejecutaron con la combinación del espiral Humphrey y la mesa de sacudidas Wilfley en operaciones de desbaste y limpieza respectivamente. Las condiciones de concentración se fijaron con la previa realización de ensayos exploratorios en estos equipos y los resultados fueron los siguientes: concentración en espiral Humphreys en circuito cerrado con razón de alimentación de 27 kg/min, caudal de agua de lavado de 45 lpm y porcentaje de sólidos en pulpa de 10%, con la producción de una cola que se desecha y un concentrado primario que alimenta a la mesa Wilfley. Ésta se ensayó en circuito abierto con razón de alimentación de 0,15 kg/min, caudal de agua de lavado 7,9 lpm, porcentaje de sólidos en pulpa a 7 %, 325 sacudidas por minuto, 1 cm de amplitud de sacudidas y 4º de inclinación con la producción de una cola que se desecha, un mixto y un concentrado definitivo.

- Bolívar J. (1995) Obtención de pre-concentrado de minerales de titanio, a partir de las arenas negras de la zona de Boquerones – Horeda - Gavilanes, del Distrito Cedeño, estado Bolívar. Trabajo especial de grado.

Resumen: el presente trabajo tiene por objeto obtener un pre-concentrado de minerales de titanio, a partir de las arenas negras de la zona de Boquerones – Horeda - Gavilanes, del Distrito Cedeño, estado Bolívar. Al género recibido surgió la necesidad de realizar una clasificación dimensional con una superficie de 2 mm (malla 10). La fracción pasante se utilizó como soluto en la conformación de la pulpa de alimentación del equipo de concentración de superficie inmóvil conocido como espiral Humphreys, se realizaron pruebas variando la pulpa de alimentación en porcentajes de sólidos y la rata de alimentación en ton/h.

- Boada S. (1990) Obtención de pre-concentrado de zircón, rutilo e ilmenita por método gravimétrico a partir de las arenas negras de la zona de Boquerones, Distrito Cedeño, estado Bolívar. Trabajo especial de grado.

Resumen: el presente trabajo trata de exponer la manera de cómo obtener pre-concentrado de zircón, rutilo e ilmenita por método gravimétrico a partir de las arenas negras de la zona de Boquerones, Distrito Cedeño, estado Bolívar. Así mismo, se hace mención de los procesos de preparación y concentración a que es sometida la mena antes de su proceso metalúrgico o empleo industrial. Los productos resultantes durante el proceso se analizan y se presentan en tablas, fotos y gráficos.

2.2. **Concentración por gravedad**

Según Blazy P. (1970) la concentración por gravedad, también llamada gravimétrica, consiste en hacer que partículas de diferente peso específico recorran trayectorias diferentes en el seno de un fluido. Dichas trayectorias están influenciadas principalmente por la fuerza de gravedad que actúa sobre las partículas, la densidad, dirección y magnitud del movimiento del fluido y en algunos casos por fuerzas externas, no preponderantes sobre la fuerza de gravedad.

Según Peláez (1981). Para poder concentrar una mena por gravedad es preciso que exista una diferencia notable entre las densidades del útil y la ganga y que aquel se libere a un tamaño apropiado. En la práctica es corriente no aplicarlo a partículas inferiores a 0,1 mm (malla 150) pues es difícil aprovechar las diferencias entre densidad a esos tamaños y es preferible utilizar otros métodos para concentrar.

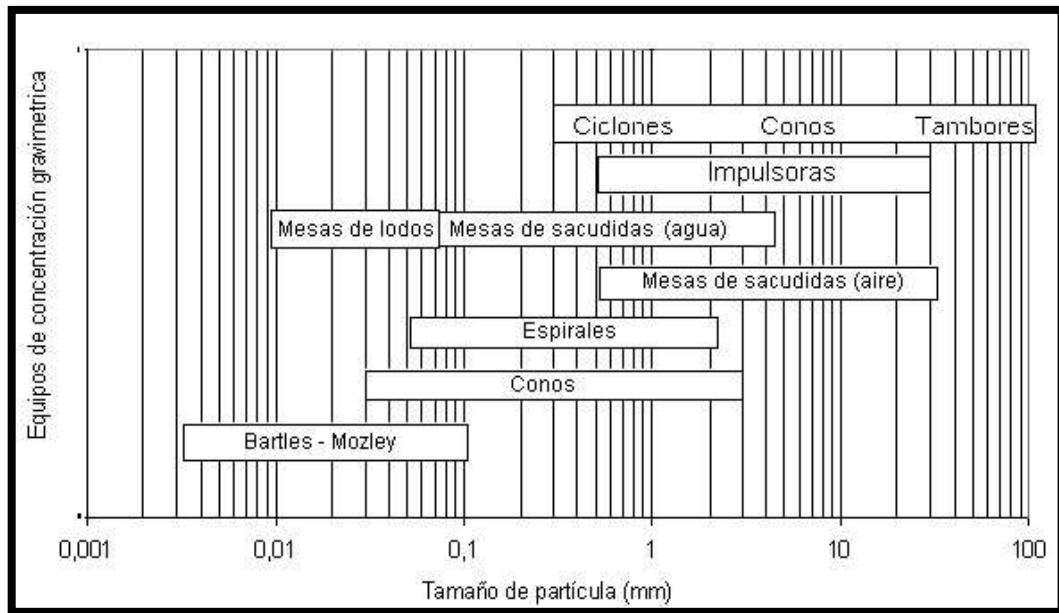


Fig. 1: Intervalos de tamaños de partículas para equipos de concentración gravimétrica (Kelly & Spottiswood, 1990).

Según Kelly & Spottiswood (1990). Es una característica de todo dispositivo de concentración por gravedad que las partículas se mantengan ligeramente apartadas, para que así puedan separarse idealmente en capas de minerales densos y ligeros.

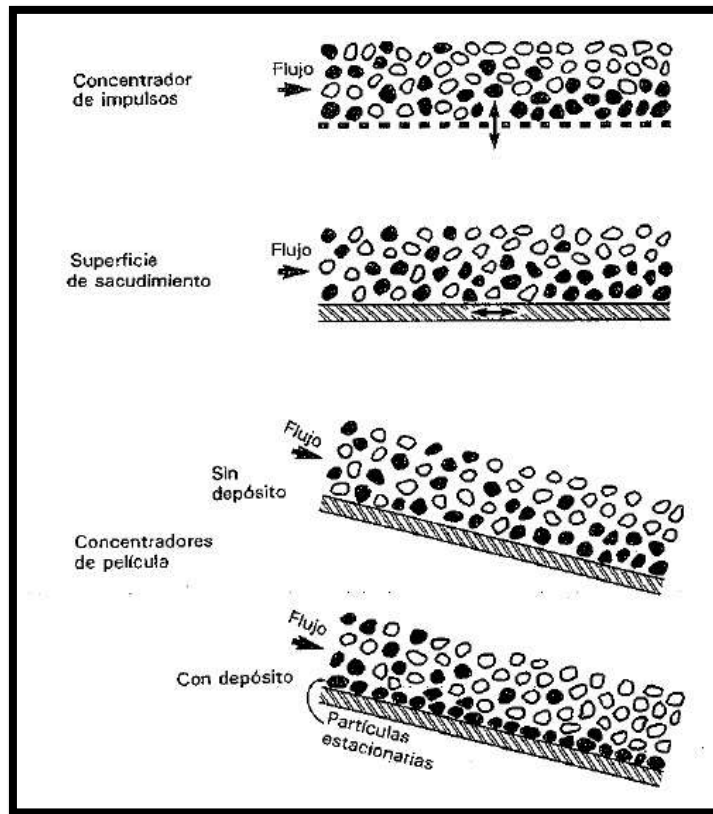


Fig. 2: Características de clasificación de los separadores por gravedad. (Kelly & Spottiswood, 1990).

Según Kelly & Spottiswood. (1990). En el primer grupo, representado por los concentradores de impulso, se aplica un movimiento oscilatorio esencialmente vertical a la corriente de sólidos y fluido. Los concentradores de sacudimiento forman el segundo grupo. Estos aplican una fuerza cortante horizontal a la corriente de sólidos y fluido, haciendo vibrar la superficie que sustenta a la corriente. Los concentradores de flujo por gravedad, como la canaleta, forman el tercer grupo. En este caso la pulpa fluye en forma descendente bajo la influencia de la gravedad sobre una superficie inclinada.

TAGGART A. (1966) formuló teóricamente el "criterio de concentración", el cual ha servido como una medida de la facilidad o dificultad que puede esperarse al separar minerales por el método de concentración por gravedad. Se calcula con la siguiente formula:

$$CC = \frac{\lambda p - \lambda f}{\lambda l - \lambda f}$$

Ecuación 1: Criterio de concentración. (Taggart A, 1966).

Donde:

- CC = criterio de concentración.
- λp = densidad del mineral pesado.
- λl = densidad del mineral liviano.
- λf = densidad del fluido, comúnmente el agua.

Según Peláez (1981). Si CC es mayor a 2,5 se puede separar ambos componentes, útil y ganga, con facilidad prácticamente a cualquier tamaño, si n es 1,75 la concentración será posible solamente para tamaños de liberación superiores a las mallas 65 (0,2 mm) o malla 100 (0,15 mm), si n es 1,50 solo podrán separarse partículas que sean superiores a la malla 10 (1,65 mm), valores de n entre 1,50–1,25 solo partículas superiores a la malla 8 (2,38 mm), inferiores a 1,25 la separación es imposible.

2.3. Concentración en mesas y canales.

Según Peláez (1981). Con el nombre general de "mesas y canales de concentración" se designa a un conjunto de equipos que extienden la pulpa en lámina delgada sobre una superficie inclinada y separan el útil del estéril, principalmente, por la acción de una corriente de agua que hace avanzar al género pendiente abajo.

Los equipos de este grupo son variados, de esta manera podemos conseguirlos con la superficie por donde corre el agua plana o curva, lisa, rugosa o con resaltos, con pendiente suave o pronunciada, inmóvil o con movimiento y con flujo laminar o turbulento, continuo o intermitente.

La concentración en mesas y canales se fundamenta en lo siguiente: si sobre una superficie fija y ligeramente inclinada, se hace fluir una lámina de agua, la velocidad y el espesor de ésta, dependen del volumen y la velocidad con que se introduzca el agua, las dimensiones de la superficie, su inclinación, y los obstáculos que se opongan al flujo.

Si el flujo es laminar la velocidad de las capas líquidas no varía uniformemente con su distancia a la superficie, aunque desde luego y hasta la capa de velocidad máxima es mayor cuanto más alejada de aquél se encuentra la capa.

Si por un punto situado en la superficie de una lámina de agua como la supuesta se introduce una mezcla de partículas de dos minerales, de diferente densidad y en una gama de tamaños variada, al cabo de un rato las partículas estarán distribuidas sobre la superficie de tal manera que, partiendo del punto de introducción, las primeras partículas que se encuentran son las partículas finas del mineral más denso, después le siguen una mezcla de partículas gruesas del mineral más denso y partículas finas del mineral menos denso, y por último las más alejadas del punto de alimentación serán las partículas gruesas del mineral menos denso.

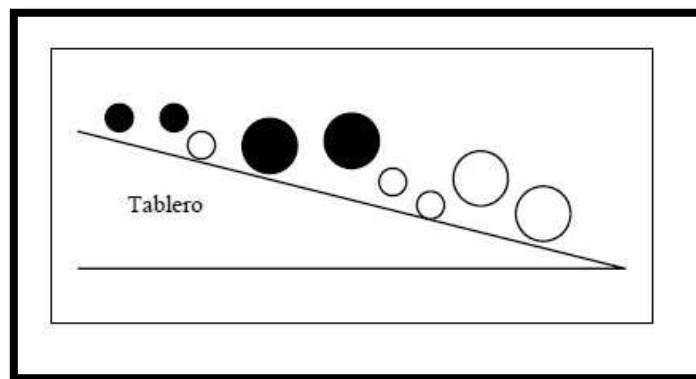


Fig. 3: Distribución de partículas diferentes sobre una superficie.

En la distribución han intervenido la fuerza de arrastre del agua, la velocidad de caída de la partícula, la gravedad, la forma, dimensión y densidad de las partículas, la inercia e inclinación de la superficie y la fricción de los minerales contra su superficie. El hecho particular de que se encuentren juntas partículas gruesas densas con finas ligeras, justifica la conveniencia de alimentar los equipos de concentración con géneros que hayan sido clasificados por tamaño.

El fenómeno de la distribución de las partículas consiste en que las partículas minerales introducidas por la parte superior de la lámina de agua llegan al fondo a distancias del punto de partida que dependen de sus trayectorias. Estas dependerán de las diferentes velocidades de caída que vayan adquiriendo y de la velocidad de la corriente de agua en cada instante.

En este sentido, la distancia de cada partícula del punto de entrada a la superficie dependerá del tiempo que tarde cada una en recorrer el espesor de la corriente de agua. Por esa razón, inicialmente, las primeras que arribarán al fondo serán las más gruesas y más densas y lo harán más próximas al punto de entrada que las demás ya que al caer más rápido son menos afectadas por el arrastre de la corriente de agua.

Pero una vez sobre la superficie la distribución cambia, si se consideran partículas del mismo mineral e igual forma, pero de tamaños bastantes diferentes, las más pequeñas avanzarán más despacio por estar sumergidas en una zona, más cercanas a la superficie, donde la velocidad del agua es mucho menor. Además, si las partículas consideradas fueran de igual tamaño y forma, pero de diferente mineral, las más pesadas avanzarán más despacio ya que por su inercia se aceleran más lentamente.

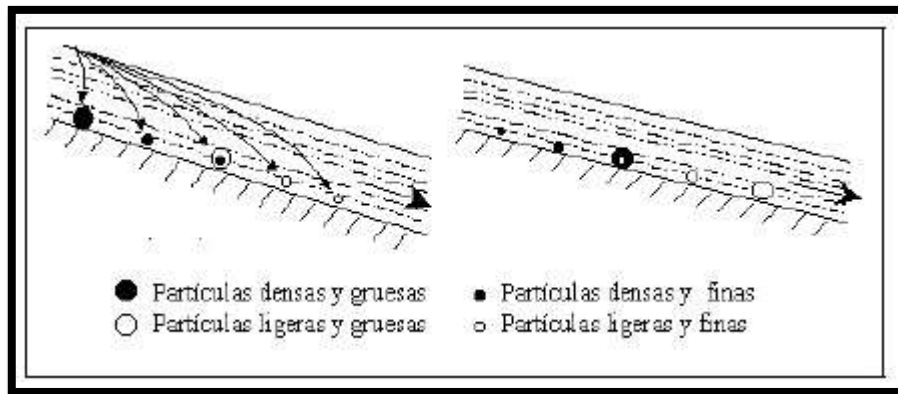


Fig. 4: Trayectoria y clasificación de las partículas según su densidad bajo el efecto de una capa pelicular fluente (Blazy P, 1970).

Así el género de alimentación se ha distribuido, al cabo de cierto tiempo, de la siguiente manera: las partículas mayores están más adelante que las menores de la misma clase, y las menos densas más adelante que las más densas del mismo tamaño.

2.4. Equipos de concentración en mesas y canales.

Según Peláez (1981). Los equipos se dividen en fijos y móviles según la superficie sobre la que se efectúa la concentración esté inmóvil o dotada de movimiento mientras que aquella se realiza.

Es frecuente colocar obstáculos sobre la superficie separadoras para mejorar el funcionamiento o la capacidad, mediante la creación de remolinos, turbulencia, etc. Dichos obstáculos van desde simples rugosidad a obstáculos transversales. De esta manera se aprovecha el fenómeno de que las partículas que arrastra el flujo sobre el fondo de la mesa o canal dan saltos, que son mayores cuando el peso específico de la partícula es más bajo. En consecuencia, las partículas grandes, ligeras, darán los saltos mayores y, en promedio, recorrerán el equipo de concentración a niveles del flujo más altos y se moverán más aprisa que las partículas pequeñas, pesadas, estarán en los niveles más bajos.

2.4.1. Mesa de sacudidas

Según Kelly & Spottiswood. (1990) es un equipo de marcha continua que separa eficazmente minerales densos, finos, de ligeros y gruesos. Este concentrador consiste en una superficie plana aproximadamente rectangular o romboidal **A**, montado en posición relativamente horizontal sobre soporte o guías que permiten que efectuar un movimiento alternativo en su propio plano, en una dirección más o menos paralela al lado más largo. El movimiento alternativo se efectúa por un mecanismo **B** (cabezal de la mesa) que genera una carrera lenta hacia adelante y un rápido retorno gracias a un mecanismo de accionamiento. La superficie está cruzada por una serie de listones o riffles cuya disposición varía, pero que fundamentalmente son paralelos a la dirección del movimiento. La altura de los listones aumenta desde los bordes más altos (lado de alimentación) de la superficie a los del más bajos (la de los estériles); la altura de cada uno disminuye desde el extremo en que se encuentra el cabezal hasta el extremo en que se recoge el concentrado. La inclinación de la mesa puede variarse según aconsejen las condiciones de la operación, y el movimiento alternativo se efectúa normalmente en una frecuencia de 200 a 300 pulsaciones por minuto con amplitudes de 2,5 a 1,25 cm. La alimentación que se introducen con un 25% de sólidos en peso a través de la caja de alimentación, se distribuye a lo largo de **C**; el agua de lavado se distribuye a lo largo del resto del lado de alimentación desde la conducción **D**.

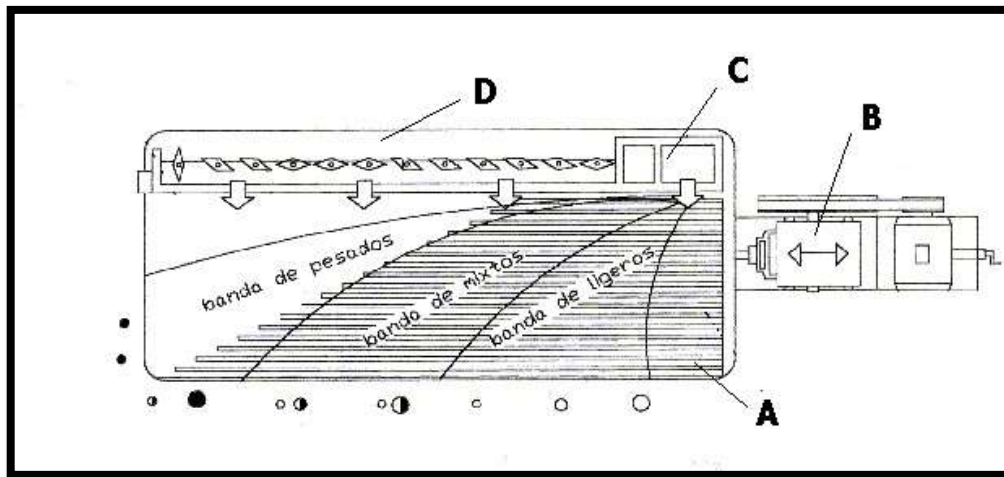


Fig. 5: Mesa de sacudidas. (Taggart A, 1966).

Los minerales que recorren la superficie están sujetos a dos fuerzas; la debida al movimiento de la mesa y otra perpendicular a la anterior debida a la capa fluyente del agua. El efecto neto es que las partículas se mueven diagonalmente a través de la cubierta desde el extremo de alimentación y como el efecto de la capa depende del tamaño y densidad de las partículas, éstas formarán un abanico sobre la mesa, las partículas más pequeñas y más pesadas viajan a la zona de concentración en el extremo distante, mientras que las partículas más ligeras y grandes se quedan en la zona de las colas.

La fig. 6 representa un diagrama idealizado de la distribución de los productos en la mesa.

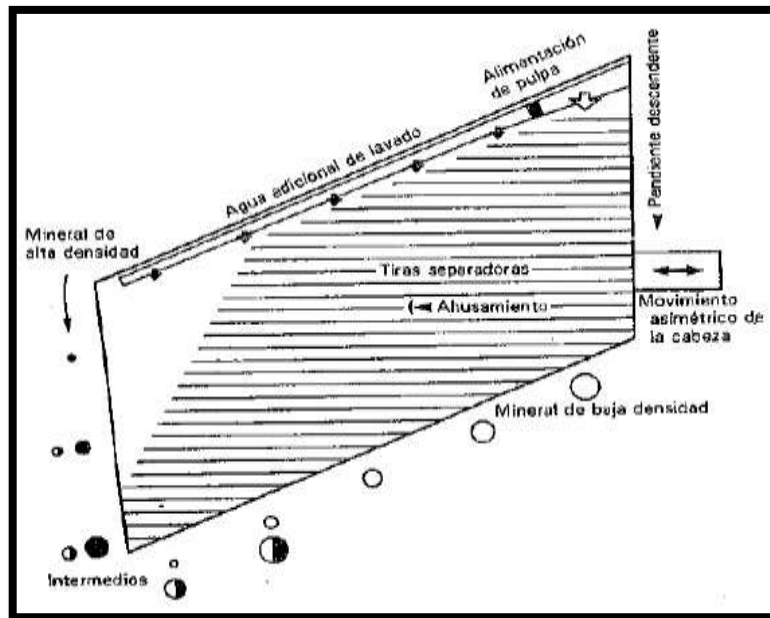


Fig. 6: Esquema de la distribución de los productos en una mesa de sacudidas. (Kelly & Spottiswood, 1990).

Las partículas se estratifican en las cavidades protegidas detrás de las tablas de retención de manera que las más finas y pesadas quedan en el fondo y las partículas más gruesas y ligeras estarán en la parte superior (Fig. 7). Los estratos de las partículas se mueven a través de los listones (riffles) por la acción del empuje de la nueva alimentación y por la capa fluente de agua de lavado. Las partículas clasificadas progresivamente más finas y las partículas de más alta densidad continuamente se desplazan por el contacto con la capa fluente de agua que sobresale de los riffles.

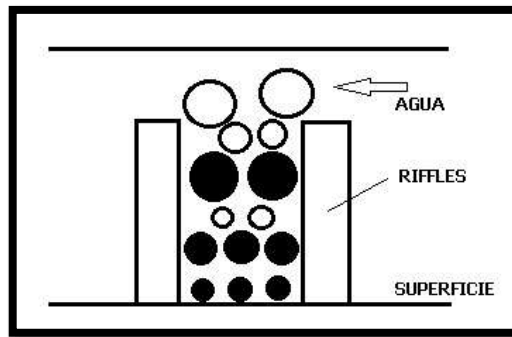


Fig. 7: Estratificación vertical entre los riffles. (Wills, 1987)

Muchos otros factores desempeñan una parte importante en la separación en mesa, incluyendo la forma de la partícula y el tipo de cubierta. Las partículas planas, tales como la mica, aunque ligera, no rueda fácilmente a través de la cubierta en la capa de agua. Además, las partículas esféricas densas se mueven fácilmente dentro de la capa hacia la zona de colas. El tamaño de partícula también desempeña un papel muy importante en las separaciones en mesa; si una alimentación de mesa está formada de una amplia gama de tamaños de partícula, algunos de esos tamaños no se limpian eficientemente, disminuyendo la eficiencia de separación.

De acuerdo con lo anteriormente planteado, para que se logre una separación del mineral, es necesario tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Alimentación.
- Densidad de las partículas.
- Flujo de agua.
- Forma de las partículas.
- La carrera de la mesa.
- Ángulo de inclinación de la superficie.
- Número de sacudidas por minuto.
- Granulometría.

El efecto de estas variables se resume en la siguiente Tabla.

Tabla 1: Efecto de las variables en el rendimiento de la mesa. (R.O. Burt, 1984.)

Variable	Valor	Efecto
Forma de cubierta	Diagonal	Mayor capacidad Flujo medio inferior Separación de tamaño más fino
Riffles	Cubierta parcial	Servicio de limpieza Trata alimentación sin clasificar
	Cubierta completa	Desbaste
Velocidad de alimentación	2 t/h 0.5 t/h 15 t/h	Para arena de 1.5 mm Para <150 µm limos Para hasta 15 mm de carbón
Velocidad y carrera	260-300 sacudidas/min 12-25 mm	Para mineral grueso
	280-320 sacudidas/min 8-20 mm	Para mineral fino
	260-285 sacudidas/min 20-35 mm	Para carbón
Relación Agua / Sólido	20-25% (masa)	Separación mineral
	33-40% (masa)	Separación de carbón

La forma de las partículas no es un factor importante en el proceso general de la mesa, sin embargo, las partículas planas no se mueven fácilmente a través de la plataforma y tienden a ser transportadas hacia el extremo de descarga de minerales pesados de la mesa. De mayor importancia es el tamaño de partícula.

Para un funcionamiento óptimo de la mesa, el flujo de alimentación de sólidos y agua sobre la mesa debe ser uniforme y constante. Aproximadamente el 90% del agua reporta a la fracción ligera. La velocidad de carrera para el funcionamiento normal es de 250 a 300 carreras por minuto. La amplitud y la frecuencia de carrera son interdependientes. Es decir, un aumento en la

longitud de la carrera requiere una disminución en la frecuencia de la carrera para mantener la misma velocidad de transporte de la fracción pesada al punto de descarga. Una alimentación fina generalmente requerirá una velocidad más alta y una carrera más corta que una alimentación gruesa. Para separaciones difíciles, donde la diferencia de densidad entre las dos fracciones es pequeña y el tamaño de la alimentación es pequeño, se debe utilizar una carrera corta.

De acuerdo a lo que se quiere realizar se recomienda los siguientes ajustes en la mesa de sacudidas.

Tabla 2: Ajustes de tabla para diversas tareas. (Gupta & D.S Yan, 2006)

Tarea	Condición de operación
Desbaste	Aumentar el flujo de agua Aumentar la velocidad de alimentación Aumentar la inclinación Aumentar las sacudidas Usar cubierta completamente de riffles
Limpieza	Disminuir el flujo de agua Disminuir la velocidad de alimentación Disminuir la inclinación Disminuir las sacudidas Usar cubierta parcialmente de riffles
Alimentación fina	Disminuir el flujo de agua Disminuir la velocidad de alimentación Aumentar la velocidad Disminuir las sacudidas Usar riffles de bajo perfil
Alimentación gruesa	Aumentar el flujo de agua Aumentar la velocidad de alimentación Reducir la velocidad Aumentar las sacudidas Usar riffles de alto perfil

Las mesas concentradoras se utilizan principalmente para la concentración de minerales de estaño, hierro, tungsteno tantalio, mica, bario, zirconio y en menor extensión oro, plata, torio, uranio y otros. Sin embargo, el mayor uso simple de las mesas de sacudidas está en el lavado de carbón.

2.5. Índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos los podemos dividir en dos tipos; índices que relacionan calidad de la concentración e índices que relacionan capacidad del circuito de concentración, principalmente para usos de escalamiento.

2.5.1. Índices que relacionan calidad

Estos son los que proporcionan información acerca de la calidad de los productos obtenidos, bien sea en la etapa de concentración o globalmente en la planta.

- Recuperación (R): Se define como la relación que existe en una operación de concentración entre el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que hay en la alimentación, o que ingresó a la operación.

$$R = \frac{\text{Peso de mineral de interés en concentrado}}{\text{Peso de mineral de interés en alimento}}$$

Ecuación 2: Índice metalúrgico, Recuperación.

- Razón de enriquecimiento (RE): Se define este índice como la relación que existe entre el tenor (o porcentaje) de mineral útil en el concentrado respecto al tenor (o porcentaje) del mismo mineral en la alimentación, entonces:

$$R_E = \frac{t_c}{t_a}$$

Ecuación 3: Índice metalúrgico, Razón de enriquecimiento.

2.5.2. Relación entre la recuperación (R) y la Razón de Enriquecimiento (RE).

Normalmente en una operación de concentración los índices de Recuperación (R) y Razón de enriquecimiento (RE), son completamente antagónicos. En la Fig. 8 se puede ver que, si la operación de concentración ocurre en una única etapa, no es recomendable que se exija valores altos de ambos índices metalúrgicos.

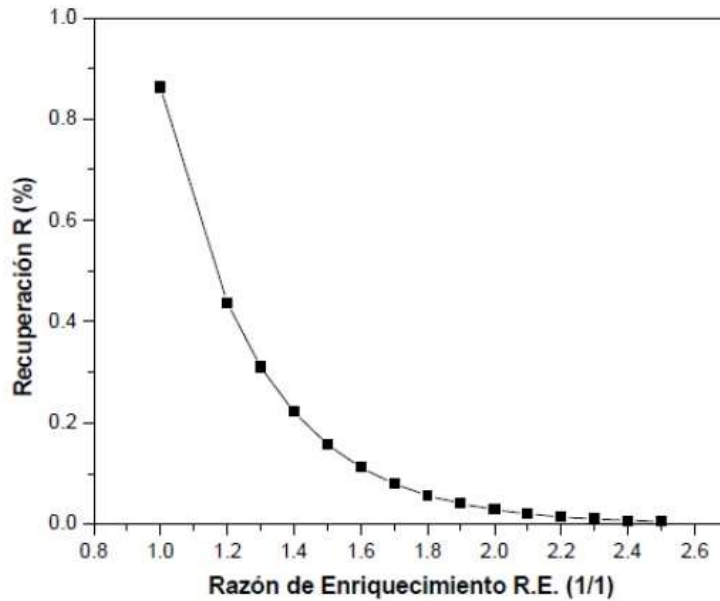


Fig. 8: Relación entre la Recuperación (R) y la Razón de Enriquecimiento (RE). (Bustamante, 2008).

Lo anterior implica que sólo es posible alcanzar una Recuperación alta y una Razón de Enriquecimiento también alta, si la separación se efectúa por etapas y es prácticamente imposible en una única etapa alcanzar ambos objetivos.

2.6. Metodología de superficies de respuesta

La metodología de superficies de respuesta (MSR) es la estrategia experimental y de análisis que permite resolver el problema de encontrar las condiciones de operación óptimas de un proceso, es decir, aquellas que dan por resultado "valores óptimos" de una o varias características de calidad del producto.

2.6.1. Elementos de la metodología de superficie de repuesta

La metodología de superficie de respuesta implica tres aspectos: diseño, modelo y técnica de optimización. El diseño y el modelo se piensan al mismo tiempo, y dependen del tipo de comportamiento que se espera en la respuesta. De manera específica, el modelo puede ser de primero o segundo orden (plano o con curvatura); por ello, el tipo de diseño utilizado y el método de optimización se clasifican, según sea el caso, como de primero o segundo orden.

El aspecto diseño implica que para optimizar un proceso se debe aplicar el diseño de experimentos, en particular aquellos que sirven para ajustar un modelo de regresión lineal múltiple. Conocidos genéricamente como diseños para superficie de respuesta.

El aspecto del modelo utiliza el análisis de regresión lineal múltiple, junto con sus elementos básicos que son: parámetros del modelo, modelo ajustado, significancia del modelo, prueba de falta de ajuste, residuos, predichos, intervalos de confianza para predichos y coeficiente de determinación.

Por último, el aspecto de optimización está formado por algunas técnicas matemáticas que sirven para que, dado un modelo ajustado, explorarlo a fin de obtener información sobre el punto óptimo.

2.6.2. Diseño de superficie de respuesta

Los diseños de superficie de respuesta se clasifican con base en el grado del modelo que se pretende utilizar. Estos diseños proporcionan los tratamientos a correr para generar datos que permitan ajustar un modelo que describa una variable de respuesta en una región experimental. Algunas propiedades deseables en los diseños para la MSR son:

- Que genere una distribución satisfactoria de los puntos experimentales sobre la región experimental. Los diseños más utilizados son puntos distribuidos de manera uniforme sobre la región experimental, o cuando menos tienen alguna simetría con respecto al centro de ésta.
- El diseño debe requerir un número mínimo de corridas experimentales, ya que en cada prueba realizada se gastan recursos que siempre son escasos.
- El diseño debe permitir que otros diseños de orden mayor se construyan a partir de él. Esto permite que, cuando el comportamiento de la respuesta resulta ser más complicado de lo que se pensaba (por ejemplo, se detecta curvatura), se agregan puntos adicionales al diseño para tratar de explicar ese comportamiento.
- El experimento debe permitir la detección de la falta de ajuste, para lo cual se requieren repeticiones al menos en el centro del diseño.
- El diseño debe proporcionar un estimador puro de la varianza del error, lo cual se logra con repeticiones al menos en el punto central.

Otras dos propiedades deseables en los diseños para superficie de respuesta son la ortogonalidad y la rotabilidad. Estas propiedades aumentan la eficiencia de los diseños que las poseen, en el sentido de que facilitan la interpretación de los parámetros estimados en el modelo y de la superficie de respuesta.

Se considera que un diseño es ortogonal cuando los coeficientes estimados en el modelo ajustado no están correlacionados entre sí, lo cual hace que el efecto de cada término, representado por el parámetro correspondiente, se estime de manera más precisa. Un experimento es ortogonal si en la matriz de diseño todos los vectores columna son independientes entre sí. Es fácil verificar que en un diseño factorial completo 2^k las columnas de su matriz de diseño son independientes: multiplique dos columnas cualesquiera, término a término usando la notación -1 y $+1$, y el resultado es cero.

Un diseño se llama rotatable si la varianza de $\hat{y}(x)$ sólo depende de la distancia del punto x al centro del diseño y no de la dirección en la que se encuentra. Es decir, si pensamos en la variable $\text{var}[\hat{y}(x)]$ como otra respuesta, su gráfica de contornos tiene la forma de círculos concéntricos alrededor del centro del diseño. La rotabilidad del diseño asegura que la calidad de la predicción, medida por $\text{var}[\hat{y}(x)]$, sea invariante a cualquier rotación del diseño alrededor del centro del mismo; de aquí se deriva el nombre de esta propiedad.

La importancia práctica de la rotabilidad en el problema de encontrar un punto óptimo es porque asegura que, con independencia de la dirección en que se explore a partir del centro del diseño, la calidad de predicción se comporta de igual manera.

- Diseños de primer orden

En principio, al proponer un diseño de primer orden se supone que sólo son importantes los efectos principales. Estrictamente hablando, para estimar los $k + 1$ parámetros del modelo de primer orden se requiere un mínimo de $k + 1$ puntos experimentales.

Un criterio de selección del diseño de primer orden es que la varianza de la respuesta predicha ($\text{var}[\hat{y}(x)]$) en el punto $x' = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ sea mínima. Este criterio es importante porque cuando se busca determinar la dirección

óptima de movimiento a partir de los predichos por el modelo, éstos tienen mayor precisión, lo cual se traduce en mayor certeza de la dirección seleccionada. Los diseños que satisfacen este criterio son los que tienen la propiedad de ortogonalidad. Entre los más utilizados están los siguientes:

- Diseños factoriales 2^k
 - Diseños factoriales fraccionados 2^{k-p}
 - Diseño de Plackett-Burman
 - Diseño simple
- Diseños de segundo orden

Se llaman diseños de segundo orden aquellos que permiten ajustar un modelo de segundo orden para así estudiar, además de los efectos lineales y de interacción, los efectos cuadráticos o de curvatura pura. Por consiguiente, estos diseños se emplean cuando se quiere explorar una región que se espera sea más compleja o cuando se cree que el punto óptimo ya se encuentra dentro de la región experimental.

A continuación, se presentan las matrices de diseño, la geometría y propiedades de los diseños de segundo orden más recomendados como son:

- El diseño de Box-Behnken

Los diseños de Box-Behnken por lo general tienen menos puntos de diseño que los diseños centrales compuestos y, por consiguiente, resulta menos costoso ejecutarlos con el mismo número de factores. Pueden estimar eficientemente los coeficientes de primer y segundo orden; sin embargo, no pueden incluir corridas de un experimento factorial. Los diseños de Box-Behnken siempre tienen 3 niveles por factor, a diferencia de los diseños centrales compuestos, que pueden tener hasta 5. Otra diferencia con respecto a los diseños centrales compuestos es que los diseños de Box-Behnken nunca incluyen corridas donde todos los factores estén en su valor extremo, como por ejemplo todos los valores de configuración bajos.

- El diseño central compuesto o de composición central.

Los diseños centrales compuestos pueden ajustarse a un modelo cuadrático completo. Suelen utilizarse cuando el plan del diseño requiere de un experimento secuencial, porque estos diseños pueden incluir información de un experimento factorial planificado correctamente.

El diseño central compuesto es el experimento diseñado de superficie de respuesta que más se utiliza. Los diseños centrales compuestos son un diseño factorial o factorial fraccionado con puntos centrales, ampliado con un grupo de puntos axiales (también denominados puntos de estrella) que permiten estimar la curvatura.

Los diseños centrales compuestos son especialmente útiles en los experimentos secuenciales, porque frecuentemente permiten ampliar experimentos factoriales anteriores al agregar puntos axiales y centrales.

2.7. **Estadística en la concentración gravimétrica de minerales**

Helga Jordão *et al* (2016) abordó explícitamente la separación del cobre y separación de aluminio mediante el proceso de concentración por gravedad seleccionando para este estudio la mesa de agitación húmeda, manipularon tres parámetros operativos del equipo: inclinación de superficie (I), caudal de alimentación (F_w) y caudal de limpieza (W_w). Helga *et al* (2016), utilizaron un diseño factorial completo en combinación con un diseño central compuesto para modelar la recuperación de metales.

Los ensayos se realizaron a muestras de tamaño 0 a 10 mm con una mezcla rica de metales no ferrosos (96%) con 67% en aluminio y 29% en metales pesados (cobre, bronce / latón y zinc).

La configuración óptima se observó en los bordes del diseño experimental, que puede indicar que un punto óptimo puede estar fuera del área de diseño. Encontraron modelos cuadráticos para explicar la recuperación del cobre y la recuperación de aluminio y se demostró que la inclinación es el parámetro con mayor influencia en la separación actuación.

Las pruebas realizadas en configuraciones óptimas crearon un producto de concentrado de Cu con un promedio de 77.8 % de Recuperación y 1.5% de Recuperación de aluminio. Las superficies de respuestas obtenidas son las siguientes:

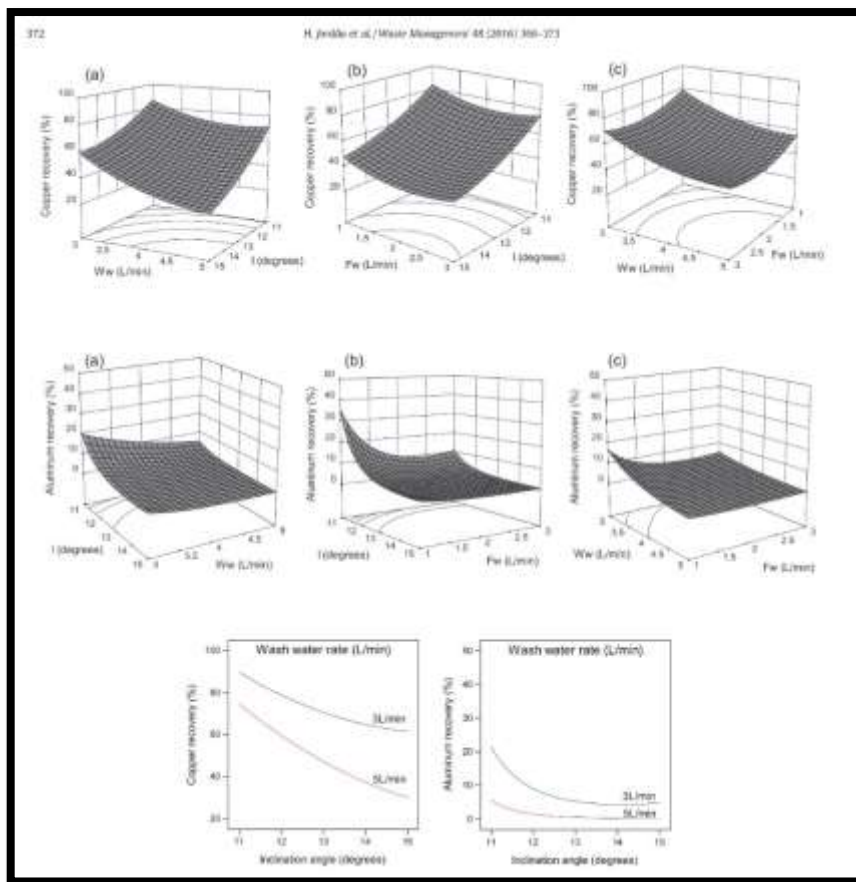


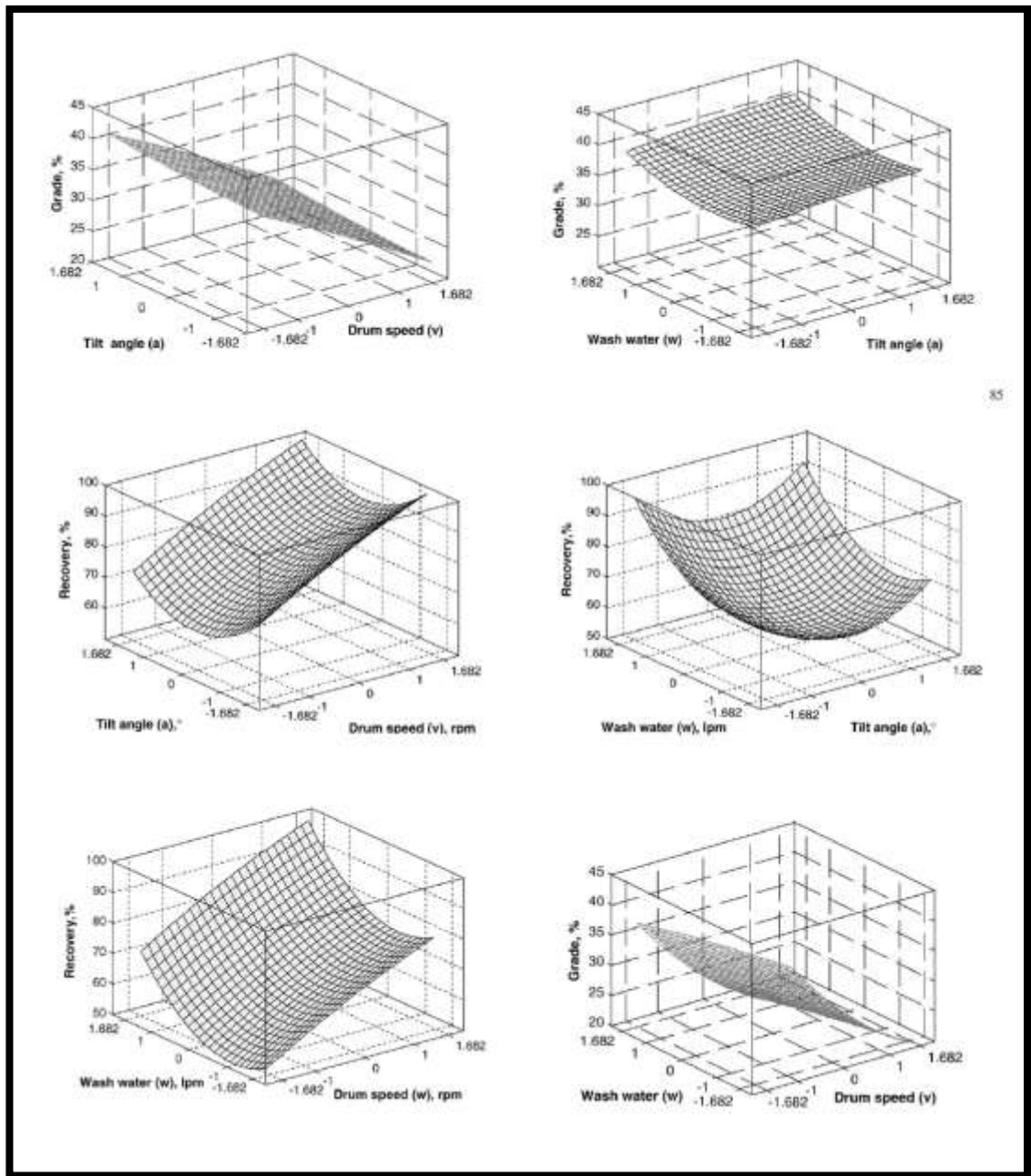
Fig. 9: Optimización del proceso de la mesa de agitación húmeda usando la superficie de respuesta metodología aplicada a la separación de cobre y aluminio de la fracción fina de trituradoras ELV. (Helga Jordão et al, 2016).

N. Aslan (2008) realizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) y el diseño central compuesto rotativo (CCRD) para el modelado y la optimización de la influencia de algunas variables operativas en el rendimiento de un separador de gravedad múltiple (MGS) para la concentración de cromita.

El diseño central compuesto rotativo (CCRD) se utilizó para diseñar un programa experimental para modelar los efectos de la velocidad del tambor, la inclinación ángulo y flujo de agua de lavado en el rendimiento de MGS concentrando mineral de cromita que contiene aproximadamente 26.5% Cr₂O₃ de la región de Kangal / Eskikoy en Turquía. El rango de Las variables de MGS utilizadas en el diseño fueron la velocidad del tambor de 133 – 217 rpm, ángulo de inclinación de 1.6 ° – 8.4 ° y velocidad de flujo de agua de lavado de 1.3 – 4.7 lpm.

A fin de que obtener una mejor comprensión de las tres variables para obtener un óptimo rendimiento, se presentaron los modelos como gráficos 3D de superficie de respuesta, los modelos permitieron una predicción de rendimiento segura por interpolación sobre el rango de datos (Fig.10).

Los resultados mostraron que la velocidad del tambor tiene un efecto significativo tanto en grado de concentrado y recuperación mientras el ángulo de inclinación y caudal de agua de lavado tiene un efecto trivial. Este estudio demuestra que RSM y CCRD se pueden aplicar con éxito al modelado y optimizado de MGS para la concentración de cromita y es una forma económica de obtener la máxima cantidad de información en un corto período de tiempo y con el menor número de experimentos.



85

Fig. 10: Aplicación de la metodología de superficie de respuesta y diseño giratorio compuesto central para modelar y optimizar un separador de gravedad múltiple para la concentración de cromita. (N. Alan, 2008)

N. Aslan (2008) desarrolló un diseño factorial Box-Behnken de tres niveles combinado con la metodología de superficie de respuesta (RSM) para modelar y optimizar algunos parámetros de operaciones del Separador de Multi-Gravedad (MGS) para producir un concentrado de celestita.

Los tres parámetros operativos significativos de MGS fueron la velocidad del tambor, el ángulo de inclinación y la amplitud de agitación, se variaron y los resultados se evaluaron con el diseño factorial de Box-Behnken.

Se determinaron los valores de 150 rpm, un ángulo de inclinación de 6° y una amplitud de agitación de 20 mm como niveles óptimos para alcanzar el grado de concentrado de SrSO₄ máximo del 96,91%.

De la misma manera, una velocidad del tambor de 250 rpm, un ángulo de inclinación de 2 ° y una amplitud de agitación de 10 mm se ha determinado como niveles óptimos para alcanzar el máximo recuperación del 98,35%.

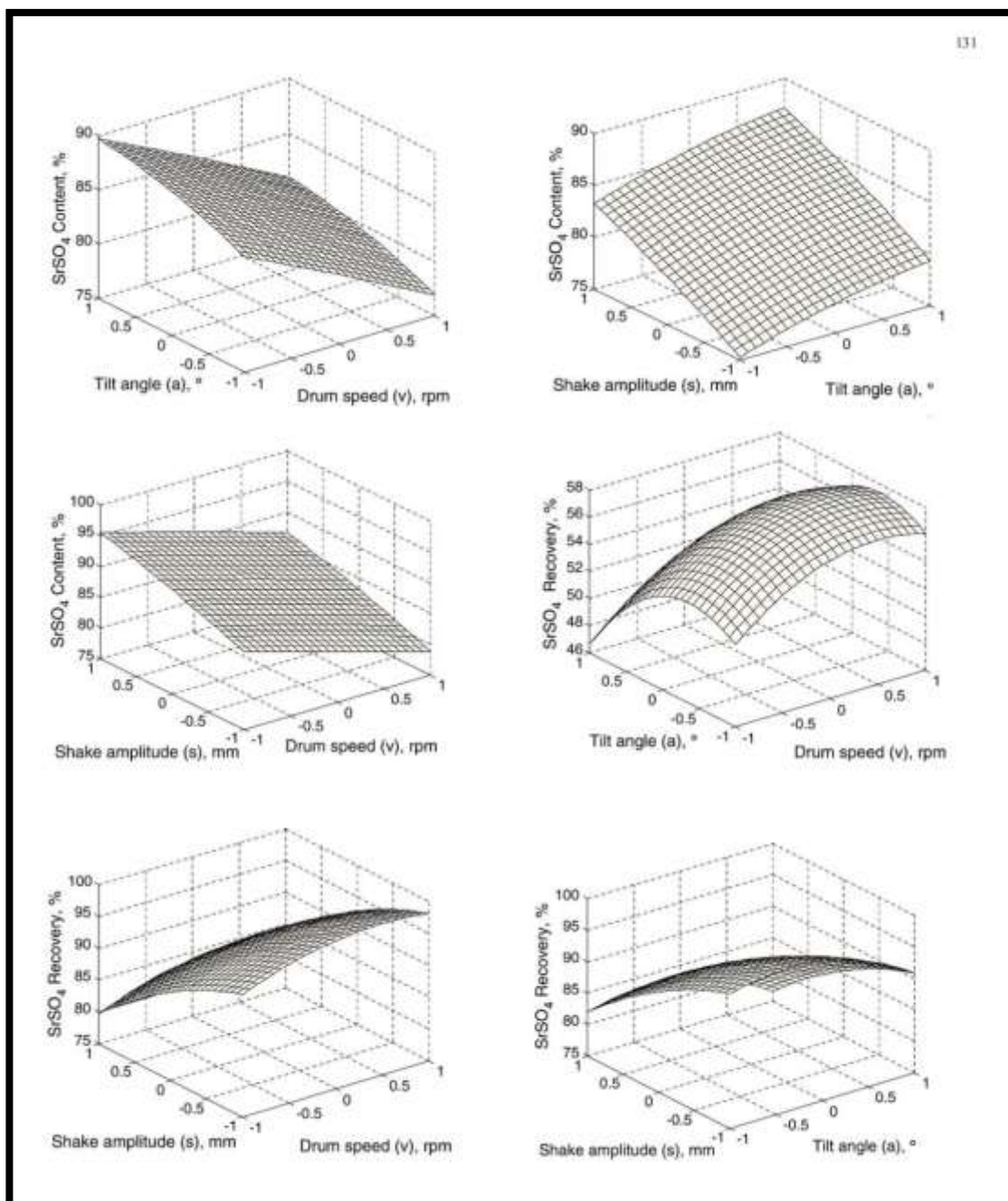


Fig. 11: Modelado y optimización del separador de gravedad múltiple. (N. Alan, 2007)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1. Tipo de investigación.

De acuerdo con el problema planteado referido a establecer los parámetros óptimos en la concentración gravimétrica en superficiales de agua de acuerdo con el criterio de concentración, y en función de sus objetivos se realiza el tipo de investigación experimental. La misma consiste en controlar los parámetros de concentración gravimétrica sometiendo las muestras a determinadas condiciones, tratamiento y tamaños, para determinar el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables mediante la aplicación de técnicas estadísticas.

3.2. Diseño de la investigación.

El diseño de investigación es cuasiexperimental. Esta investigación es experimental debido a que se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes como el caudal, la inclinación de la superficie de la mesa y las sacudidas por minuto de la mesa, para poder analizar las consecuencias que tienen sobre dos variables dependientes como sería la Razón de Enriquecimiento y el % de Recuperación. Así mismo, es cuasiexperimental, porque los grupos de variables no se asignan al azar, sino que dichos grupos ya están formados antes del experimento es decir las variables que serán manipuladas ya estas definidas antes de realizar los ensayos.

3.3. Objeto de estudio.

El equipo de concentración utilizado es el siguiente:

Mesa de sacudidas Wilfley: modelo 13 A standard, fabricado por Carpco, Florida USA, tablero de fibra de vidrio con dimensiones 100 cm de largo con 60 cm de ancho y pendiente transversal ajustable, riffles del mismo material del tablero con espaciamiento de 1,3 cm, altura máxima de 0,9 cm y ancho de 0,8 cm, motor eléctrico marca Baldor de 120 v y 60Hz y potencia de 1/3 HP, tolvas de recuperación, y en el extremo superior del tablero cajas de distribución de la pulpa de alimentación y de distribución de agua de lavado y splitters.

3.4. Metodología del trabajo.

A continuación, en la fig. 12 se observa el esquema de metodología, donde se presentan las pautas, herramientas e instrumentos que se van a utilizar para llevar a cabo la presente investigación.

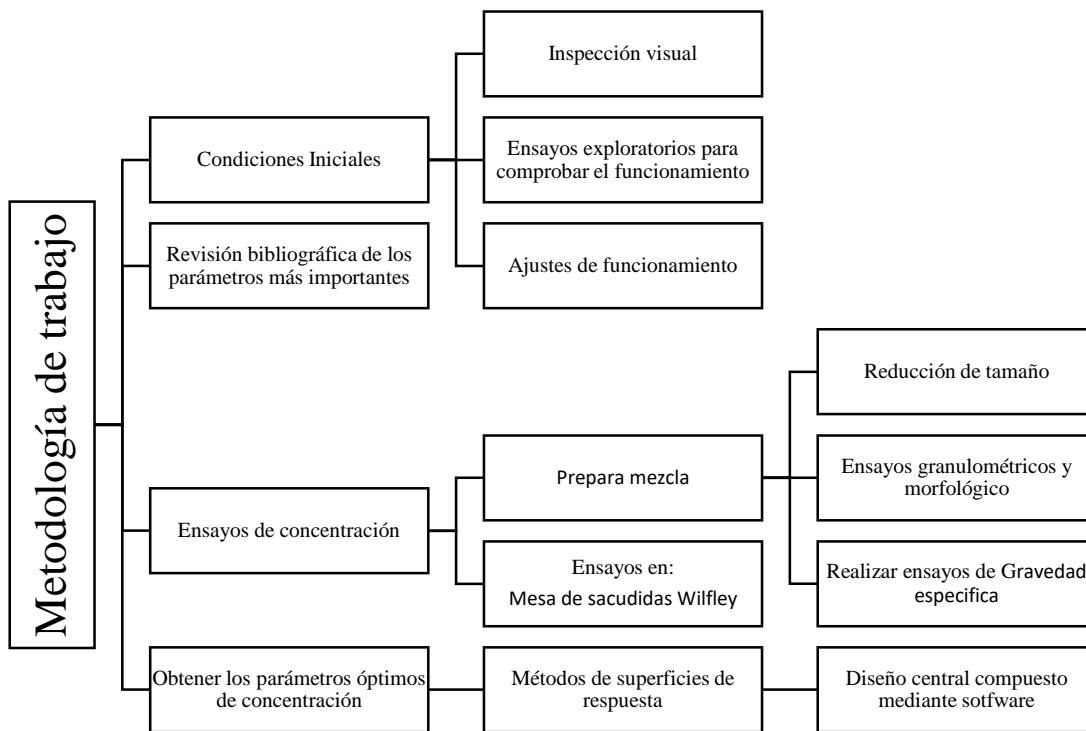


Fig. 12: Esquema de la Metodología de trabajo.

3.5. Condiciones iniciales de los equipos.

Conociendo en detalle el funcionamiento de la mesa de sacudidas y el fundamento del método concentración, se procede a una inspección del equipo chequeando las partes del mismo tales como:

- Motor
- Mecanismo de movimiento de la superficie de la mesa
- Correas de transmisión
- Niveles de aceites del mecanismo
- Sistema de alimentación de agua

Revisión de otros equipos:

- Revisión del alimentador vibratorio
- Revisión de la cinta transportadora del concentrador magnético
- Calibración de las balanzas analíticas

Estas revisiones se hicieron con la finalidad de poder corregir y mejorar los componentes de los equipos que fueron utilizados en los ensayos de concentración, además se realizaron ensayos exploratorios para comprobar el funcionamiento de los equipos, así como el comportamiento del material.

3.6. **Desarrollo experimental**

A continuación, se describe la metodología experimental, la cual se divide en: caracterización física, preparación de las mezclas y concentración en la mesa de sacudidas.

3.6.1. Molienda del material

- Equipo utilizado

Se utilizó sistema de rodillos y molino fabricado por Warman Galigher con carga de bolas de acero, la fuente que proporciona energía es un motor eléctrico General Electric 1/3 Hp (Fig. 13). La molienda se realiza con la finalidad de reducir el tamaño de grano de los minerales hasta pasante malla 30 (0,595 mm). Los parámetros utilizados por molienda son:

Carga moledora: 12 Kg

Peso del material: 1 Kg

Velocidad del equipo: 114 RPM

Los cálculos realizados para obtener los parámetros utilizados en este trabajo, se especifican en el anexo 1.

- Procedimiento

El proceso a seguir fue el siguiente:

- ✓ Se realizó la limpieza de la carga moledora con óxido de silicio (bolas de acero).
- ✓ Se colocó 12kg de carga moledora (bolas de acero).
- ✓ Se añadió 1 kg. de material.
- ✓ Colocar la tapa y montar el molino sobre los rodillos.
- ✓ Encender el motor por el tiempo programado.



Fig. 13: Sistema de rodillos y molino Warman Galigher, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

3.6.2. Análisis dimensional y morfológico

A. Análisis dimensional:

Para el ensayo se utilizó una balanza digital marca Mettler P2010 con capacidad máxima de 2000g y error de $\pm 0,1$ (Fig. 14), un juego de tamices estandarizados A.S.T.M y un agitador de tamices marca Doerr con motor de 1/6 hp (Fig. 15) y. El ensayo de granulometría se realizó con el fin de obtener

el decil 50 (d50) y decil 80 (d80) del material, de esta forma conoceremos la distribución del tamaño de las partículas del mineral.



Fig. 14: Balanza marca Mettler P2010 Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.



Fig. 15: Agitador de tamices marca Doerr y tamices estandarizados A.S.T.M, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

- Procedimiento

El procedimiento que se realizó en el ensayo granulométrico fue siguiente:

- ✓ Se seleccionaron y secaron las muestras a estudiar.
- ✓ Se realizó el pesado de 1kg de las muestras.
- ✓ Se realizó la limpieza de cada tamiz.
- ✓ Se colocó las muestras en el agitador de tamices durante 10 minutos haciéndola pasar por todo el juego de tamices seleccionados: malla 30, malla 50, malla 60, malla 80, malla 100 y malla 200.
- ✓ Se pesaron las fracciones de mineral retenidos en cada tamiz.
- ✓ Se realizó el llenado las tablas granulométricas con los datos obtenidos (tablas 4, 5 y 6).
- ✓ Se Elaboró la curva granulométrica para cada muestra y se calculó el d50 y d80 (fig. 27, 28 y 29).

Los cálculos realizados para obtener el d50 y d80 se especifican en el anexo 3.

B. Análisis Morfológico

El tamaño y la forma determinada de una partícula influye en el modo en que esta se transporta en el agua, ya que determina si la partícula rodará o será cargada en suspensión. De este modo, la forma controla de manera parcial el comportamiento de una partícula que viaja a través de un fluido.

El análisis morfológico se realizó en el laboratorio de Geología y Geoquímica de la escuela de Geología, Minas y Geofísica de la facultad de ingeniería. Para establecer la morfología se utilizó una lupa binocular marca Zeiss modelo Stemi SV 11 con un sistema de luz reflejada modelo KL 1500 Electronic (Fig. 16).



Fig. 16: binocular con un sistema de luz reflejada, Laboratorio de geología y geoquímica.

- Procedimiento

El procedimiento que se realizó para determinar la morfología de las partículas fue el siguiente:

- ✓ Se seleccionó al azar 50 granos de cada una de las muestras.
- ✓ Para cada grano, se analizó la relación redondez-esfericidad a través de las Cartas de apreciación visual mostrada en la Fig. 30.
- ✓ Se realizó el llenado de tablas de datos que contienen el coeficiente de redondez-esfericidad y su frecuencia (Tablas 7, 8 y 9).
- ✓ Se generaron histogramas de frecuencias de Redondez y de Esfericidad (Fig. 31, 33 y 35).

3.6.3. Ensayos de gravedad específica

Los ensayos de gravedad específica se realizaron con la finalidad de poder calcular el criterio de concentración de las mezclas utilizadas. La determinación de la gravedad específica de los materiales de trabajo se realizó tomando como referencia la norma venezolana COVENIN 2224-84 "determinación de gravedad específica por inmersión en agua".

Para poder realizar los ensayos se utilizaron una balanza analítica marca Mettler H10W con un error de $\pm 0,001$ y capacidad máxima de 160gr y un picnómetro de volumen de 50ml con error de $\pm 0,001$ (Fig. 17).



Fig. 17: Balanza analítica Mettler H10W y Picnómetro, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

- Procedimiento

El procedimiento que se utilizó para realizar los ensayos de gravedad específica fue el siguiente:

- ✓ Se coloca el picnómetro en una estufa a una temperatura entre 105 y 110 °C, se deja enfriar y se pesa en una balanza analítica y se registra el peso del picnómetro vacío como P.
- ✓ Se llena el picnómetro con agua destilada a temperatura ambiente (20 ± 5 °C). Se elimina el exceso de agua del extremo capilar, de tal manera, que no se extraiga agua del mismo. Se seca toda la porción de agua adherida a la parte externa del picnómetro, se pesa y se registra el valor como w_1 .
- ✓ Se vacía el picnómetro y se seca nuevamente a una temperatura comprendida entre 105 y 110 °C. Se transfiere de 5 gr de la muestra a ensayar en el picnómetro seco, se tapa, se pesa y se registra como w.
- ✓ Se llena el picnómetro con agua destilada, se enfría a temperatura ambiente, se elimina el exceso de agua del extremo del tubo capilar, se seca nuevamente el picnómetro. Se pesa finalmente el picnómetro y su contenido y se registra el peso como w_2 .
- ✓ Las determinaciones se deberán registrar con dos decimales. Si los valores obtenidos discrepan entre sí $\pm 0,03$, el ensayo se deberá repetir.
- ✓ Para poder obtener el valor de la densidad real, se multiplica por el valor de la densidad específica del agua a temperatura de ensayo.

Las expresiones matemáticas empleadas para el cálculo de la gravedad específica se pueden observar en el anexo 5.

La tabla de la Densidad de agua como función de temperatura se puede observar en el anexo 5.

3.6.4. Preparación de las mezclas

En los ensayos de concentración se utilizaron dos tipos de mezclas (A y B), cada una de ellas estaba conformada por dos tipos de material, uno con mayor densidad que el otro. Estas fueron preparadas de la misma manera y con una proporción de pesado-liviano igual. Para cada tipo de muestra se seleccionó un tamaño pasante 20 mallas (0,841 mm).

Para la realización de las dos mezclas se siguieron los siguientes pasos:

- ✓ Se realizó un cuarteo a cada una de los materiales.
- ✓ Se pesó 50 gr de material de menor densidad.
- ✓ Se pesó 950 gr de material de mayor densidad.
- ✓ Se realizó la mezcla de la muestra pesada con la liviana, generando así una mezcla de 1000gr con una proporción de 5% de material de menor densidad.

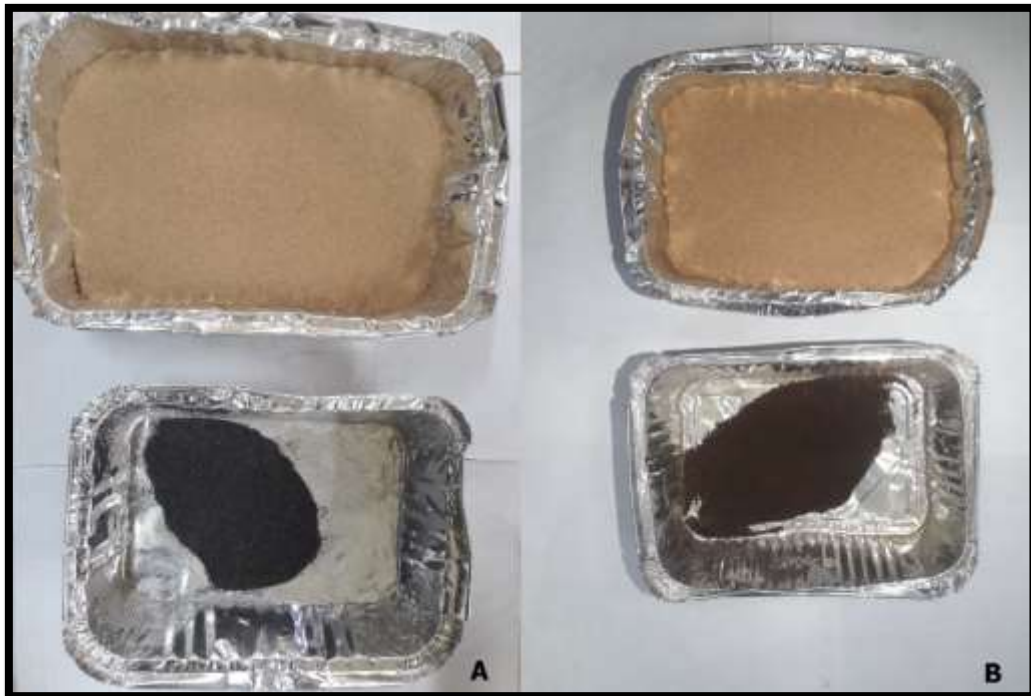


Fig. 18: Mezcla A Y B con 5% de liviano.

3.6.5. Ensayos en la mesa de sacudidas

Las pruebas en la mesa de sacudidas Wilfley modelo 13 A standard fabricado por Carpco, consistieron en la realización de 20 ensayos de concentración para la mezcla A y 20 ensayos de concentración para la mezcla B variando las variables independientes de **ángulo de inclinación de la superficie, número de sacudidas por minuto y caudal de agua en la zona de alimentación de material** de forma aleatoria según el diseño experimental de superficie de respuesta realizado en el software Minitab versión 18.1, con la finalidad de poder calcular las variables dependientes % Recuperación y Razón de Enriquecimiento.

Para poder realizar estos ensayos se necesitó conocer y medir los valores de los parámetros operativos del alimentador vibratorio y las variables anteriormente mencionadas con los que trabaja la mesa de sacudidas Wilfley del Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica. A continuación, se describe detalladamente cada proceso.

A. Determinación del caudal de alimentación del material.

Para obtener un caudal de alimentación constante se utilizó un alimentador vibratorio marca Eriez Magnetics modelo 15A, el cual cuenta con una de caja de mando que regula la intensidad de vibración de la tolva del equipo (Fig. 19), se realizaron varias pruebas en varias posiciones de la perilla intensidad. El procedimiento de medición fue el siguiente:

- ✓ Se pesó 100 gr de mezcla.
- ✓ Se cargó el alimentador vibratorio con el material.
- ✓ Se pasó el material por el alimentador vibratorio, variando en cada una de las posiciones de la perilla que controla la intensidad de vibración (la perilla va desde posición 1 hasta posición 9).
- ✓ Se tomó nota de cuánto tiempo tarda el alimentador vibratorio en pasar los 100 gr de material en cada posición de la perilla (tabla 10).



Fig. 19: Alimentador vibratorio marca Eriez Magnetics, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

B. Determinación del caudal de agua en la zona de alimentación.

Conocer el caudal con el que trabaja la mesa es de gran importancia, ya que es un equipo que realiza separación en corrientes superficiales de agua, la rapidez con la que esta fluye sobre el tablero afecta el movimiento de la partícula.

Para calcular el caudal de agua en la zona de alimentación se realizó variando la posición la llave que controla dicho caudal y la principal que controla el paso de agua al sistema (Fig.17), el procedimiento fue el siguiente:

- ✓ Se colocaron las llaves que regulan el caudal de agua de limpieza y el caudal de agua secundaria en la zona de alimentación a $\frac{1}{4}$ de giro aproximadamente y se dejaron fijas.
- ✓ La llave que controla el caudal de agua en la zona de alimentación se colocó en dos posiciones ($\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$).

- ✓ La llave principal que controla el caudal de agua que entra al sistema se colocó en tres posiciones ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y abertura completa).
- ✓ Las mediciones se tomaron realizando una combinación de las posiciones entre las dos llaves anteriormente mencionadas.
- ✓ El agua fue recolectada en una cubeta graduada de 10 L y se tomó el tiempo en el que tardó en llenarse.
- ✓ Se realizó una tabla con los datos y se calculó el promedio (tabla 11).

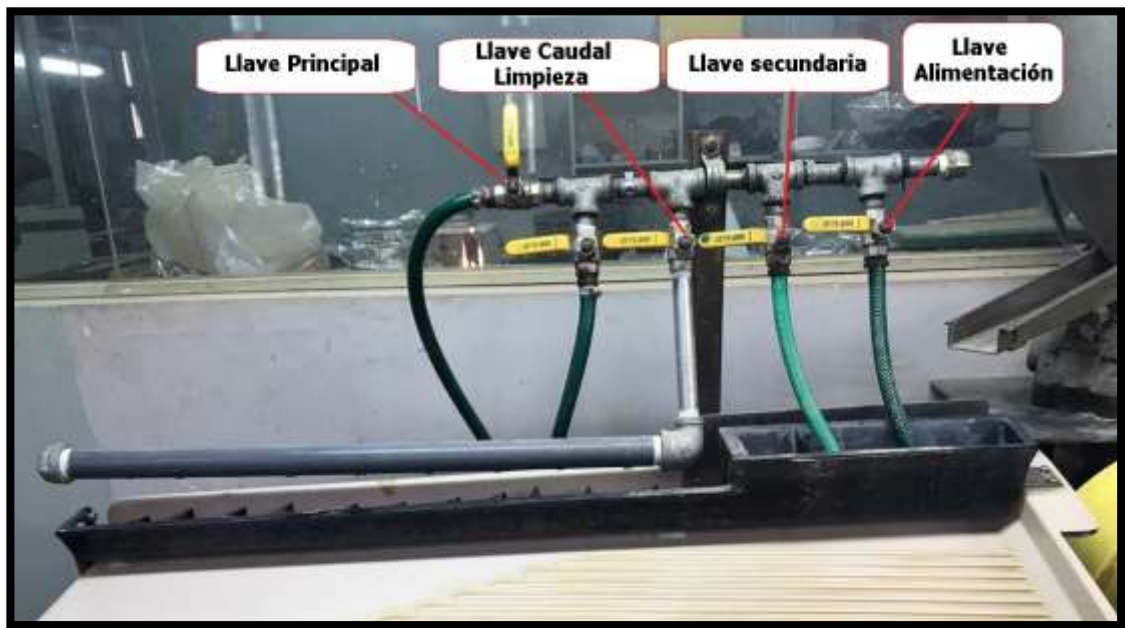


Fig. 20: Sistema de alimentación de agua, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

C. Determinación del ángulo de inclinación de la superficie.

Para poder determinar el ángulo de inclinación de la superficie de la mesa se utilizó una inclinómetra marca Inogon modelo L25 (Fig. 21). En los ensayos se utilizaron tres ángulos diferentes variándolos según el diseño experimental de superficie de respuesta.

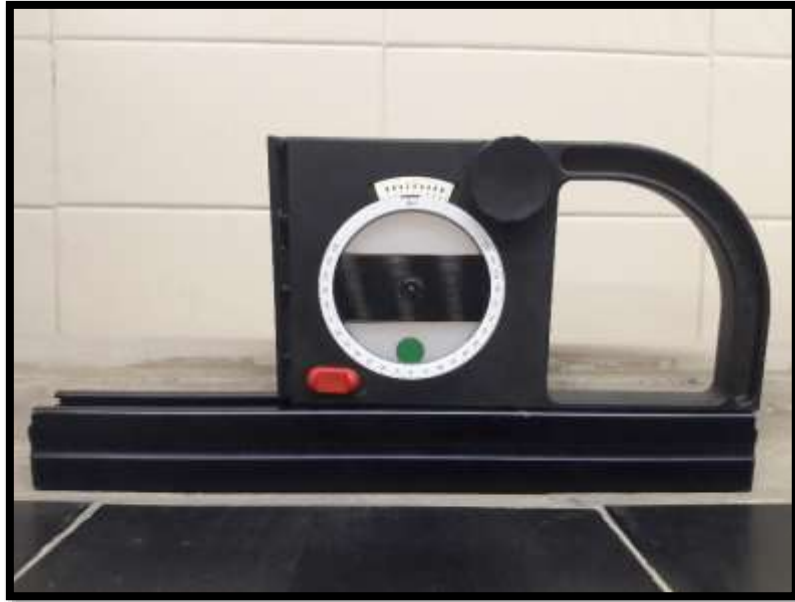


Fig. 21: Inclinómetro marca Inogon.

D. Determinación del número de sacudidas por minuto.

El cálculo de número de sacudidas por minuto de la superficie de la mesa se realizó midiendo la cantidad de giros que realiza la polea de mayor tamaño en el sistema de transmisión, ya que un giro de esta es equivalente al desplazamiento hacia adelante y hacia atrás de la superficie. Para medir estos giros se utilizó una App de un teléfono inteligente llamada Efectum versión 1.12.9, a continuación, se muestra el procedimiento utilizado:

- ✓ Se colocó una cinta adhesiva de color sobre la polea de mayor tamaño (Fig. 22.A).
- ✓ Se encendió el equipo y a continuación se graba la polea utilizando la app Efectum versión 1.12.9.
- ✓ Se contó en cámara lenta cuántos giros dio en 10 seg y se realizó la equivalencia en minutos.
- ✓ Se llenó los datos en una tabla y se calculó el promedio.

- ✓ Las mediciones se realizaron posicionando la perilla que controla la velocidad de la superficie de la mesa en tres posiciones diferentes (Fig. 22.B).



Fig. 22: A. Polea que conecta motor con mecanismo; B. Perilla que controla la velocidad de la superficie de la mesa, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

E. Ensayos en la mesa de sacudidas.

En la mesa de sacudidas se realizaron un total de 40 ensayos, 20 para la mezcla A y 20 para la mezcla B, para garantizar que las condiciones fueron iguales para ambas mezclas el procedimiento realizado fue el mismo. A continuación, se muestra el procedimiento seguido:

- ✓ El alimentador vibratorio marca Eriez Magnetics (Fig. 19) se cargó con 1 kg de mezcla la cual está conformada por 950gr de material liviano y 50 gr de material pesado y la perilla que controla la intensidad del alimentador se colocó en posición 5,5 que entrega un caudal de alimentación de mezcla de 150 gr/min, cabe destacar que el alimentador debe estar sobre una superficie horizontal ya que si posee inclinación el caudal de la mezcla calculado varía.

✓ Se ajustó el caudal de agua en la zona de alimentación, variando en tres valores diferentes 7,45 lpm, 11,45 lpm y 15,45 lpm según el diseño experimental de superficie de respuesta, en la Fig. 20 se puede observar el sistema de alimentación de agua.

✓ Se ajustó la inclinación de la superficie de la mesa, variando en tres posiciones diferentes 6°, 8° y 10° según el diseño experimental de superficie de respuesta, utilizando una inclinómetra marca Inogon (Fig. 21).

✓ Se colocó la perilla que controla la velocidad de la superficie de la mesa reflejada en la Fig. 22.B en tres posiciones diferentes: posición 4 que entrega 258 sacudidas por minuto, posición 3,25 que entrega 360 sacudidas por minuto y en posición 2,75 que entrega 462 sacudidas por minuto, estas variaciones se realizaron según el diseño experimental de superficie de respuesta.

✓ Al tener todas las variables ajustadas según el diseño experimental de superficie de respuesta se realiza el ensayo.

✓ la mesa de sacudidas posee un sistema de recolección de material que lo clasifica en pesados, mixtos y livianos (Fig. 23). Cada material clasificado es recolectado por recipientes.



Fig. 23: Sistema de recolección de material, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

- ✓ El material recolectado (pesado, mixto y liviano) fue secado en horno industrial a 550 C° marca The Grieve Corporation modelo MT550 (Fig. 24).



Fig. 24: Horno industrial marca The Grieve Corporation, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

- ✓ Cada material después de ser secado se pesó con una balanza digital marca Mettler P2010 (Fig. 14) y se registra el peso de cada zona de concentración.
- ✓ Luego de ser pesado cada material es pasado por el concentrador magnético marca Eriez modelo 72 (Fig. 25) con una intensidad de campo de 2 tesla para poder separar el material liviano del pesado, el concentrador magnético posee dos variables operativas las cuales son: velocidad de alimentación y velocidad de giro del tambor magnético, ambas se regulan en una caja de mandos, la primera variable se utilizó en la posición 40 y la segunda en posición 3.



Fig. 25: Concentrador magnético marca Eriez, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

- ✓ Luego de separar la muestra, el material de mayor densidad recolectado en cada zona de concentración es pesado con la balanza digital marca Mettler P2010 (Fig. 14) y se registra su peso.

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Condiciones Iniciales y Arreglos de equipos

Para realizar cualquier ensayo de laboratorio es necesario conocer las condiciones iniciales de los equipos con los que se desea trabajar, es por ello que se realizó una inspección visual y ensayos exploratorios de cada equipo que se utilizó en los en la concentración gravimétrica para evaluar su funcionamiento y así poder corregir las fallas. Dicha información se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 3: Condiciones iniciales de los equipos y arreglos.

EQUIPOS
Mesa de sacudidas Wilfley
<ul style="list-style-type: none">▪ Al realizar ensayos exploratorios se pudo observar que el sistema de alimentación de agua, contaba con un riego por mangueras, no regaba de manera uniforme todas las zonas de la superficie de la mesa (Fig. 26.A), es por ello que se decidió sustituir este sistema por una tubería perforada la cual moja de manera uniforme toda la superficie (Fig. 26.B).▪ El mecanismo que produce el movimiento de la mesa de sacudidas se encuentra en buenas condiciones, solo fue necesario agregar nuevo aceite para que lubricara las partes.▪ El motor eléctrico marca Baldor de 120 v y 60Hz y potencia de 1/3 HP del equipo se encuentra en buenas condiciones.▪ Los riffles y la superficie de la mesa se encuentran en buen estado.▪ La correa que transmite la potencia del motor al mecanismo está en buenas condiciones.

- Se limpiaron las graseras de las dos poleas que posee el equipo.
- El sistema de inclinación está en buenas condiciones, solo necesitaba lubricación.

Alimentador vibratorio

- Al realizar las pruebas en el alimentador vibratorio se pudo observar que al material no descargaba de manera uniforme en la boca de descarga, esto causado por una vibración excesiva en la tolva. Esto se pudo corregir colocando una goma como división entre la tolva y el soporte disminuyendo la vibración excesiva.
- Las demás partes del equipo están en buenas condiciones.

Separador magnético

- Fue necesario realizar una limpieza del equipo ya que contaba con gran cantidad de polvo y residuo material, además de un poco de corrosión en la tolva de carga.
- Fue removido el tambor magnético para poder quitarle los residuos de material que tenía, al quitarlo permite extraer la cinta transportadora.
- La cinta transportadora posee trozos que están rotos, por ser de un material costoso no se pudo reemplazar. La solución fue agregar cinta adhesiva de alta calidad para poder utilizarla.
- Se quitaron y limpiaron las graseras del sistema de rodamiento del tambor magnético.

El resto de los equipos utilizados en los ensayos como: las balanzas analíticas, el molino de bolas, los tamices, el agitador de tamices y el horno industrial se encontraban en óptimas condiciones y no fue necesario ningún tipo de modificación ni arreglo.



Fig. 26: A. Riego con mangueras; B. Riego con tubería perforada, Laboratorio de Beneficio Mineral de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

4.2. Recopilación Bibliográfica

Luego de hacer revisiones bibliográficas, se realizó una recopilación de los parámetros y valores más importantes en la operatividad de la mesa de sacudidas tipo Wilfley para una concentración gravimétrica. A continuación, en la siguiente tabla se muestra la recopilación realizada.

Tabla: Recopilación de parámetros y valores operativos de mesa Wilfley.

Autor	Parámetros	Valores	Parámetros Seleccionados	Valores seleccionados
Córdova A. (2015)	Inclinación	6°	Inclinación de superficie	Bajo = 6° Medio = 8° Alto = 10°
	N° de sacudidas	290		
	Caudal de lavado	9 lpm		
Condoretty R. (2003)	Inclinación	6°		
	N° de sacudidas	325		
	Amplitud de sacudidas	1 cm		
Hurtado C. (2003)	Inclinación	6°	Sacudidas por minuto	Bajo = 258 Medio = 360 Alto = 462
	N° de sacudidas	300		
	Caudal de agua alimentación	7,25 lpm		
Bolivar B. (1995)	Inclinación	10°		
	N° de sacudidas	190		
	Caudal de agua alimentación	2,4 lpm		
Boada C. (1990)	Inclinación	5°, 8° y 10°	Caudal de agua en la alimentación	Bajo = 7,45 lpm Medio = 11,45 lpm Alto = 15,45 lpm
	N° de sacudidas	240 y 300		
	Caudal de agua alimentación	8,5 y 12 lpm		
Peláez. (1980)	Inclinación	6°		
	N° de sacudidas	150 a 300		
	Caudal de agua alimentación	7,9 lpm		

4.3. Análisis dimensional y morfológico

4.3.1. Análisis dimensional:

A continuación, se muestran las tablas y gráficos que contienen los datos del análisis dimensional del material 1, 2 y 3.

Tabla 4: Análisis granulométrico del material 1.

Material 1					
MALLAS NORMA ASTM	ANÁLISIS GRANULOMETRÍA				
	ABERTURA (mm)	MASA RET (g)	MASA (%)	MASA ACUM (%)	MASA PASA (%)
N° 30	0,595	0,50	0,05	0,05	99,95
N° 50	0,297	90,33	9,03	9,08	90,92
N° 60	0,250	174,14	17,41	26,50	73,50
N° 80	0,177	388,34	38,83	65,33	34,67
N° 100	0,149	225,63	22,56	87,90	12,10
N° 200	0,074	121,05	12,10	100,00	0,00
TOTAL		1000,00	100,00		
d50	0,203				
d80	0,267				

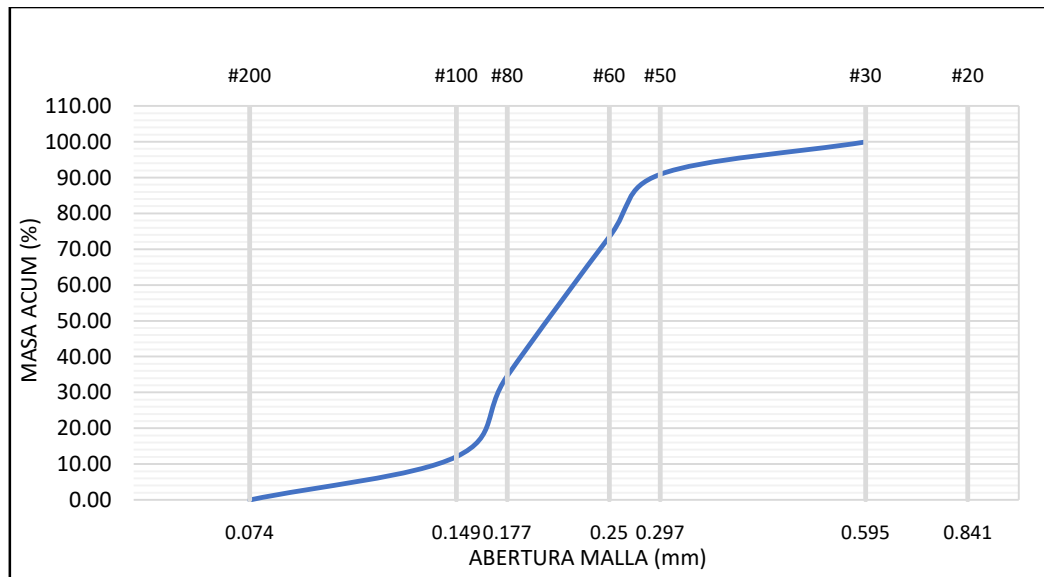


Fig. 27: Curva granulométrica del material 1.

En el análisis granulométrico realizado al material 1, se pudo calcular un d80 y d50 lo que significa que un 80% del material 1 es inferior a 0,267mm y un 50% de este material es inferior a 0,203mm.

Tabla 5: Análisis granulométrico del material 2.

Material 2					
MALLAS NORMA ASTM	ANÁLISIS GRANULOMETRÍA				
	ABERTURA (mm)	MASA RET (g)	MASA (%)	MASA ACUM (%)	MASA PASA (%)
N° 30	0,595	0,80	0,08	0,08	99,92
N° 50	0,297	351,27	35,13	35,21	64,79
N° 60	0,250	221,02	22,10	57,31	42,69
N° 80	0,177	153,59	15,36	72,67	27,33
N° 100	0,149	184,75	18,48	91,14	8,86
N° 200	0,074	88,57	8,86	100,00	0,00
TOTAL		1000,00	100,00		
d50	0,265				
d80	0,401				

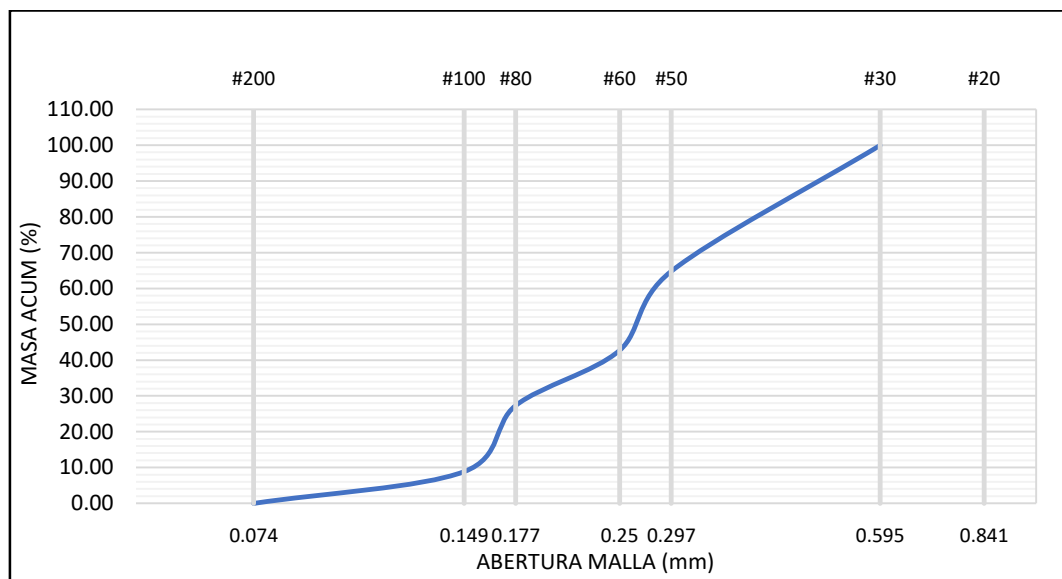


Fig. 28: Curva granulométrica del material 2.

En el análisis granulométrico realizado al material 2, se pudo calcular un d80 y d50 lo que significa que un 80% del material 2 es inferior a 0,401mm y un 50% de este material es inferior a 0,265mm.

Tabla 6: Análisis granulométrico del material 3.

Material 3					
MALLAS NORMA ASTM	ANÁLISIS GRANULOMETRÍA				
	ABERTURA (mm)	MASA RET (g)	MASA (%)	MASA ACUM (%)	MASA PASA (%)
N° 30	0,595	4,00	0,40	0,40	99,60
N° 50	0,297	381,20	38,12	38,52	61,48
N° 60	0,250	294,10	29,41	67,93	32,07
N° 80	0,177	185,80	18,58	86,51	13,49
N° 100	0,149	82,90	8,29	94,80	5,20
N° 200	0,074	52,00	5,20	100,00	0,00
TOTAL		1000,00	100,00		
d50	0,278				
d80	0,416				

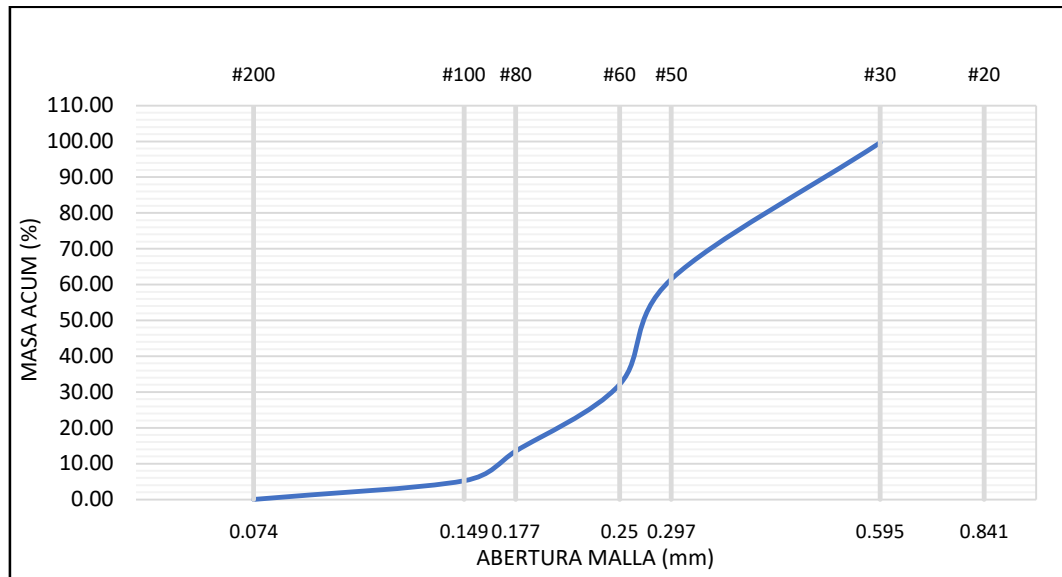


Fig. 29: Curva granulométrica del material 3.

En el análisis granulométrico realizado al material 3, se pudo calcular un d_{80} y d_{50} lo que significa que un 80% del material 3 es inferior a 0,416mm y un 50% de este material es inferior a 0,278mm.

4.3.2. Análisis morfológico

Luego de seleccionar 50 granos de cada muestra, se analizó la relación redondez-esfericidad a través de la Carta de apreciación visual mostrada en la Fig. 30.

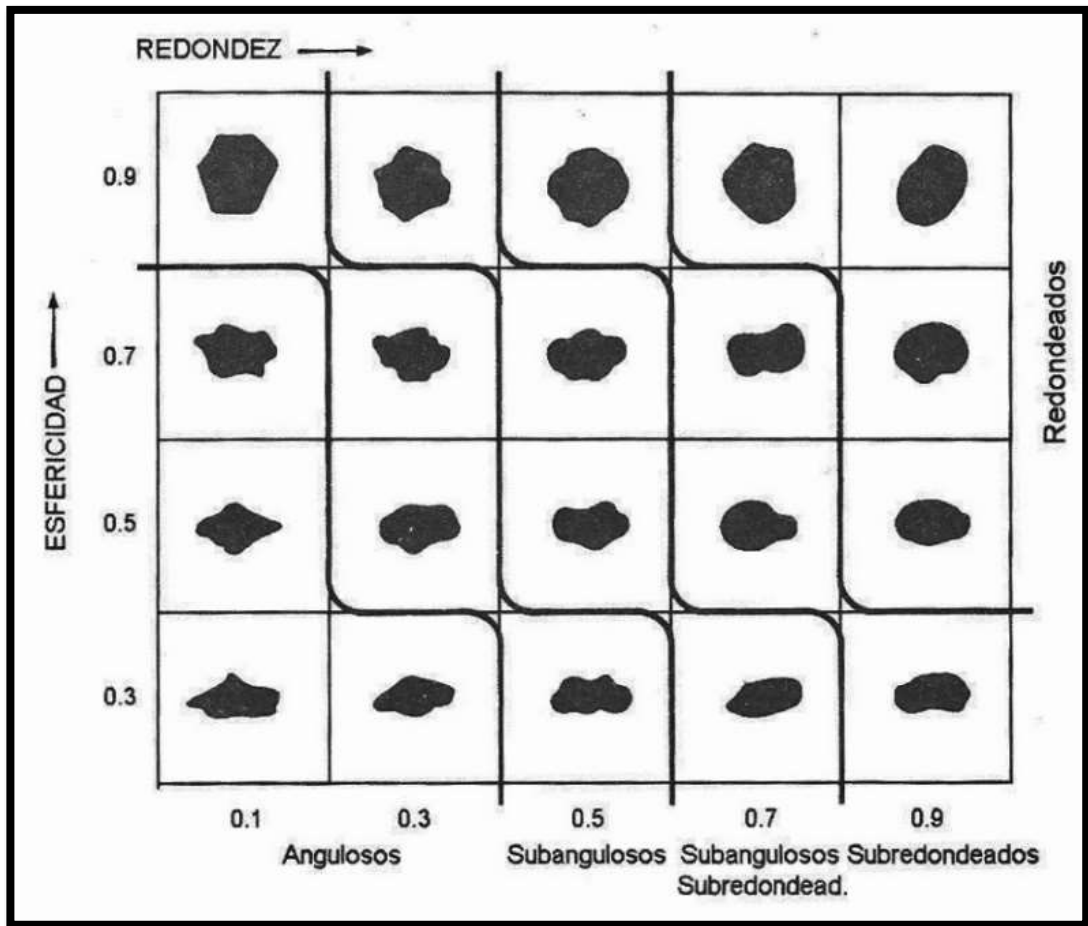


Fig. 30: Carta visual para la determinación de la esfericidad y redondez (Corrales, 1977).

A continuación, se muestran las tablas e imágenes de referencia del análisis realizado a los materiales usados:

Tabla 7: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 1.

Material 1					
Esfericidad			Redondez		
Coeficiente	Frecuencia	%	Coeficiente	Frecuencia	%
0,3	4	8	0,1	2	4
0,5	7	14	0,3	6	12
0,7	13	26	0,5	12	24
0,9	26	52	0,7	17	34
Total	50	100	0,9	13	26
			Total	50	100

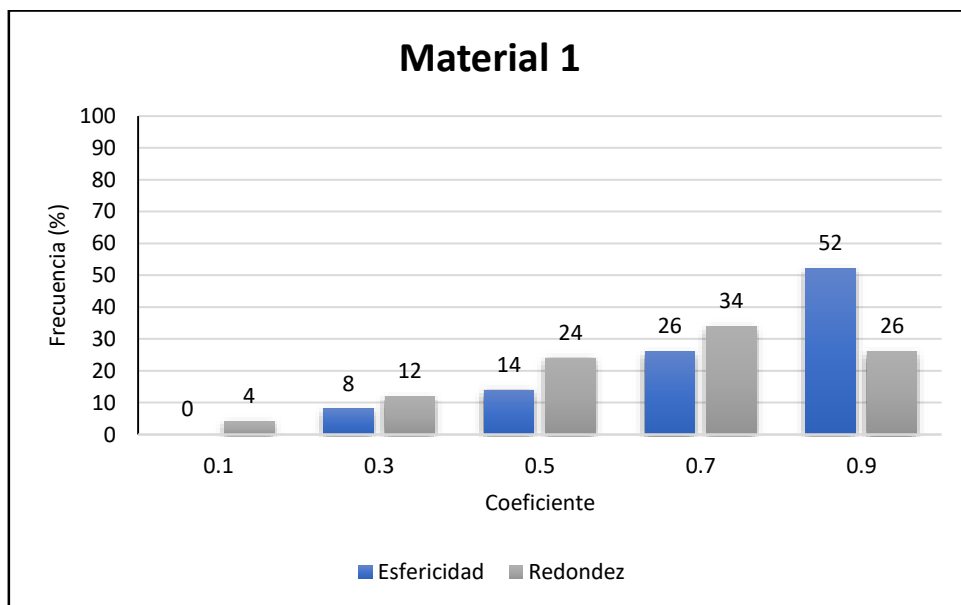


Fig. 31: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 1.

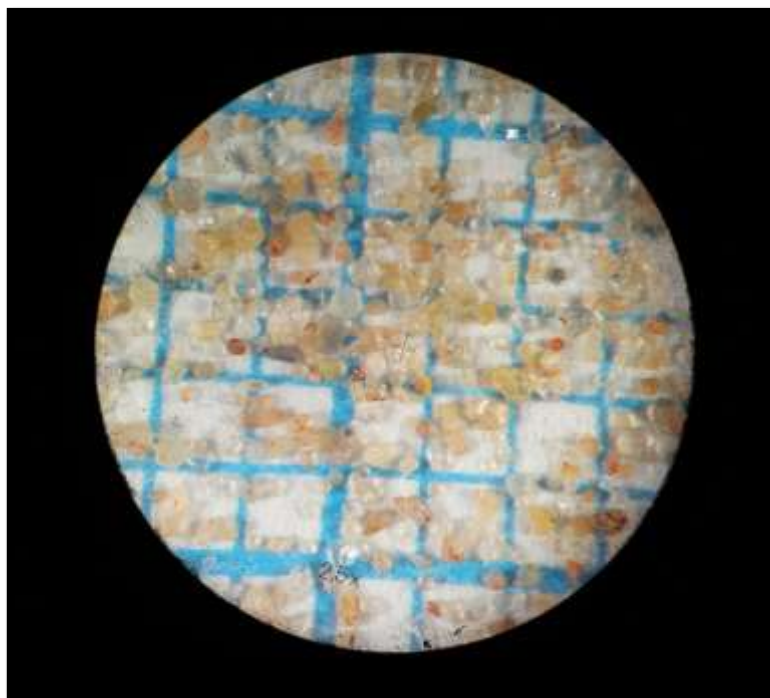


Fig. 32: Imagen del Material 1 con lupa binocular 2,5x.

Los coeficientes obtenidos (tabla 7) comparando los granos del Material 1 con la carta de apreciación visual al ser observados con una lupa binocular en un aumento de 2,5x se pudo determinar que predomina una relación de esfericidad alta y una redondez subangulosa–subredondeada.

Tabla 8: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 2.

Material 2					
Esfericidad			Redondez		
Coeficiente	Frecuencia	%	Coeficiente	Frecuencia	%
0,3	8	16	0,1	15	30
0,5	7	14	0,3	13	26
0,7	12	24	0,5	6	12
0,9	23	46	0,7	12	24
Total	50	100	0,9	4	8
			Total	50	100

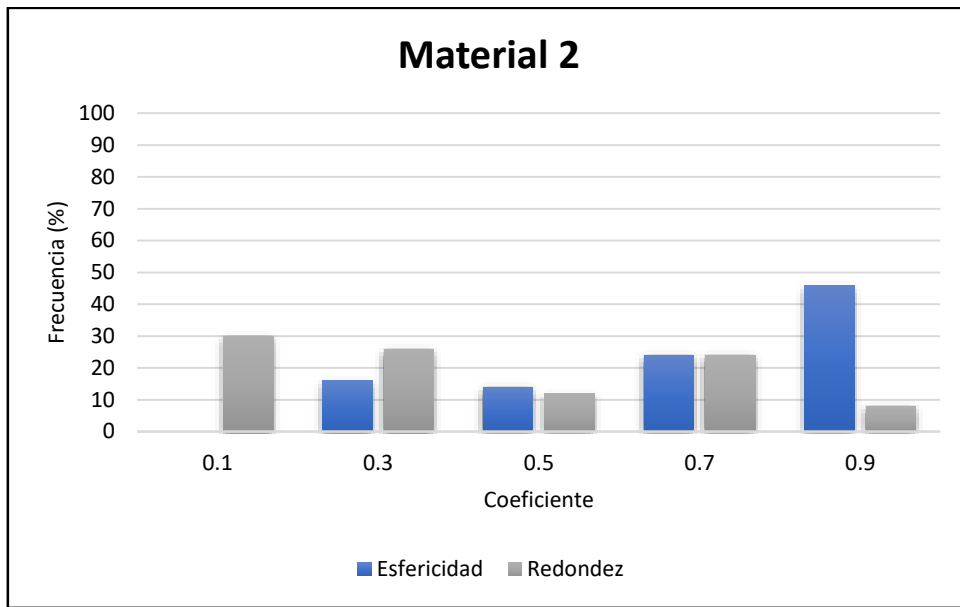


Fig. 33: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 2.

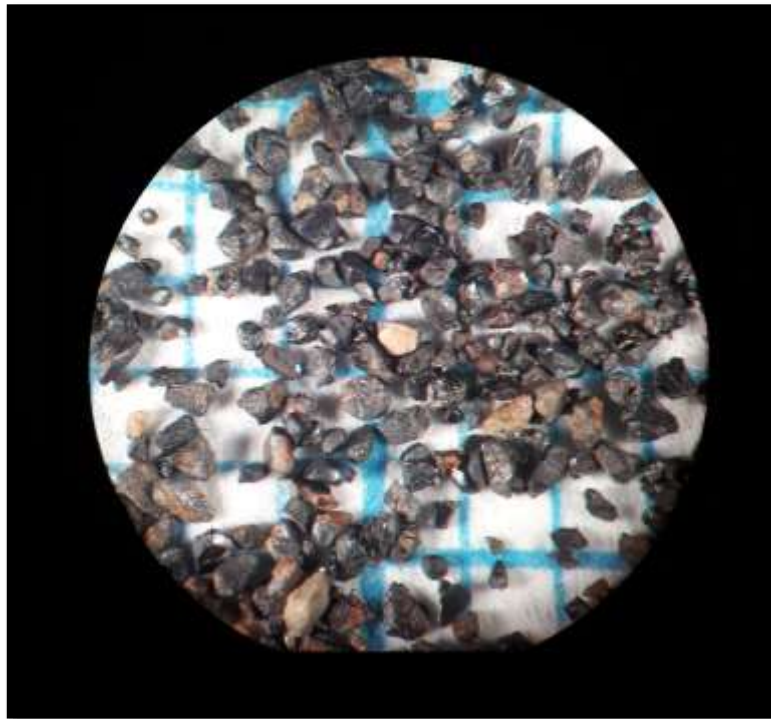


Fig. 34: Imagen del Material 2 con lupa binocular 2,5x.

Los coeficientes obtenidos (tabla 8) comparando los granos del Material 2 con la carta de apreciación visual al ser observados con una lupa binocular en un aumento de 2,5x se pudo determinar que predomina una relación de esfericidad alta y una redondez angulosa.

Tabla 9: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 3.

Material 3					
Esfericidad			Redondez		
Coeficiente	Frecuencia	%	Coeficiente	Frecuencia	%
0,3	50	100	0,1	50	100
0,5	0	0	0,3	0	0
0,7	0	0	0,5	0	0
0,9	0	0	0,7	0	0
Total	50	100	0,9	0	0
			Total	50	100

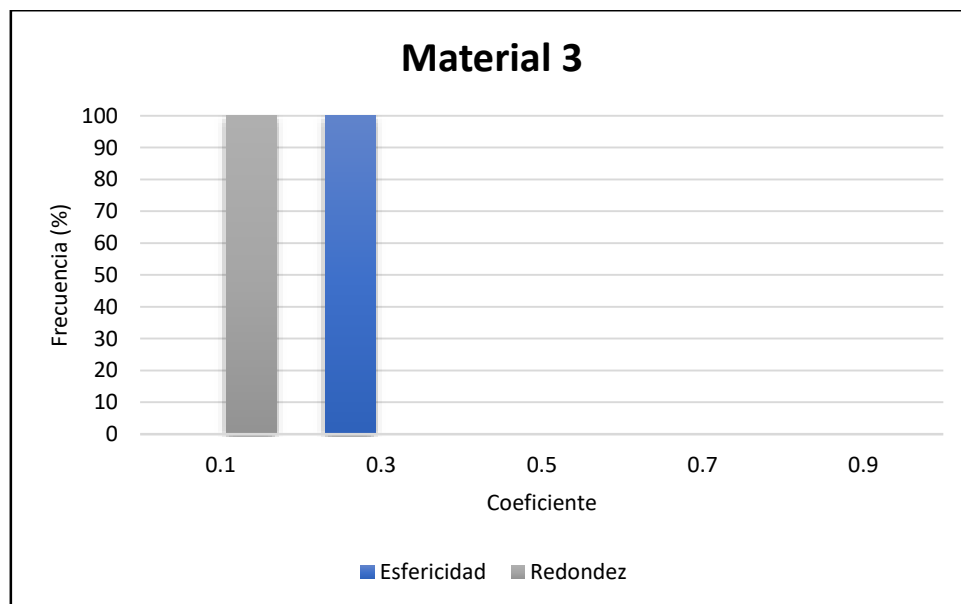


Fig. 35: Frecuencia de esfericidad y redondez, Material 3.

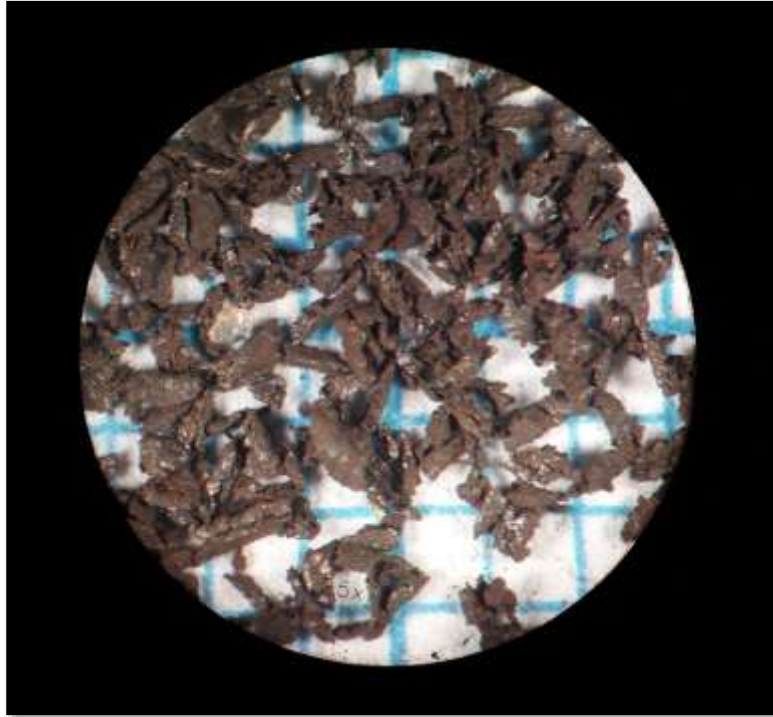


Fig. 36:Imagen del Material 3 con lupa binocular 2,5x.

Los coeficientes obtenidos (tabla 9) comparando los granos del Material 3 con la carta de apreciación visual al ser observados con una lupa binocular en un aumento de 2,5x se pudo determinar que posee una relación de esfericidad baja y una redondez muy angulosa.

4.4. Cálculo de caudal de alimentación del material

A continuación, se muestran los datos obtenido en las mediciones del cálculo de caudal de alimentación del alimentador vibratorio:

Tabla 10: Datos de caudales del alimentador vibratorio.

Posición 4			Posición 7		
medición	tiempo (min)	g/min	medición	tiempo (min)	gr/min
1	2,40	41,67	1	0,61	162,16
2	2,42	41,32	2	0,61	166,67
3	2,44	40,98	3	0,61	166,67
Promedio		41,32	Promedio		165,17
Posición 5			Posición 8		
medición	tiempo (min)	g/min	medición	tiempo (min)	gr/min
1	1,50	66,67	1	0,40	250,00
2	1,49	67,11	2	0,40	250,00
3	1,54	64,94	3	0,38	260,87
Promedio		66,24	Promedio		253,62
Posición 6			Posición 9		
medición	tiempo (min)	g/min	medición	tiempo (min)	gr/min
1	1,15	86,96	1	0,23	428,57
2	1,16	86,21	2	0,23	428,57
3	1,17	85,47	3	0,23	428,57
Promedio		86,21	Promedio		428,57

Los datos fueron medidos a partir de la posición 4, ya que, las posiciones de intensidad de alimentación son muy lentas como para llegar a ser eficientes.

4.5. Cálculos de caudal de agua

A continuación, se muestran los datos obtenidos en las mediciones del cálculo de caudal de agua en la zona de alimentación:

Tabla 11: Datos para cálculo del Caudal de agua en la zona de alimentación.

llave principal full; llave en la alimentación 1/4			llave principal 1/2; llave en la alimentación 1/4		
medición	tiempo (seg)	lpm	medición	tiempo (seg)	lpm
1	52,27	11,48	1	57,35	10,46
2	52,32	11,47	2	57,04	10,52
3	52,45	11,44	3	57,03	10,52
4	52,4	11,45	4	57,11	10,51
5	52,42	11,45	5	57,48	10,44
	promedio	11,46		promedio	10,49
llave principal 1/2; llave en la alimentación 1/2			llave principal 1/4; llave en la alimentación 1/2		
medición	tiempo (seg)	lpm	medición	tiempo (seg)	lpm
1	38,41	15,62	1	46,95	12,78
2	39,76	15,09	2	47,11	12,74
3	38,43	15,61	3	47,01	12,76
4	38,04	15,77	4	46,85	12,81
5	39,16	15,32	5	47,44	12,65
	promedio	15,48		promedio	12,75
llave principal full; llave en la alimentación 1/2			llave principal 1/4; llave en la alimentación 1/4		
medición	tiempo (seg)	lpm	medición	tiempo (seg)	lpm
1	28,87	20,78	1	81,51	7,36
2	29,01	20,68	2	80,2	7,48
3	29,2	20,55	3	80,35	7,47
4	29,69	20,21	4	80,62	7,44
5	29,15	20,58	5	79,97	7,5
	promedio	20,56		promedio	7,45

Para el cálculo de los datos de la tabla 11, las llaves de caudal de agua en la zona de limpieza y la llave secundaria en la zona de alimentación se colocaron en 1/4 de giro.

Para la realización del diseño experimental de superficie de respuesta se tomó los valores redondeados a 7,45, 11,45 y 14,45 lpm.

4.6. Ensayos de gravedad específica, cálculo de densidad y preparación de las mezclas

Se realizaron los ensayos de gravedad específica, cuyo valor fue multiplicado por la densidad absoluta del agua a 24°C para poder obtener la densidad real de los materiales 1,2 y 3 arrojando los siguientes datos:

Tabla 12: Datos para cálculo de Gravedad Específica, Material 1.

Material 1						
Medición	P	W	W1	W2	GER	ρ
1	30,9737	35,9125	80,6750	83,7554	2,6576	2,6501
2	30,9728	36,0498	80,6730	83,8399	2,6580	2,6505
3	30,9723	36,0777	80,6621	83,8410	2,6501	2,6427
Promedio						2,6478

Tabla 13: Datos para cálculo de Gravedad Específica, Material 2.

Material 2						
Medición	P	W	W1	W2	GER	ρ
1	30,9777	36,1964	80,6680	84,7534	4,6049	4,5920
2	30,9748	36,2425	80,6600	84,7850	4,6099	4,5970
3	30,9712	36,1997	80,6655	84,7595	4,6086	4,5957
Promedio						4,5949

Tabla 14: Datos para cálculo de Gravedad Específica, Material 3.

Material 3						
Medición	P	W	W1	W2	GER	ρ
1	30,9775	36,1253	80,6780	85,0807	6,9089	6,8895
2	30,9783	35,9244	80,6545	84,8844	6,9060	6,8867
3	30,9790	35,8771	80,6786	84,8676	6,9075	6,8881
Promedio						6,8881

Donde:

- GER = gravedad específica.
- P = peso del picnómetro, expresada en g.
- W = peso del picnómetro y la muestra, expresada en g.
- W₁ = peso del picnómetro lleno de agua, expresado en g.
- W₂ = peso del picnómetro, muestra y agua, expresado en g.
- ρ = densidad real, expresada en g/cm³.

Luego de haber calculado la densidad real de los materiales se realizó la mezcla A estando formada por el material 1 y el material 2, de mismo modo se realizó la mezcla B estando formada por el material 1 y el material 3. Para ambas mezclas se calculó el criterio de concentración utilizando la ecuación 1, a continuación, se muestra los datos obtenidos:

Tabla 15: Criterio de Concentración, Mezcla A y B.

Criterio de Concentración				
Mezcla	λp	λl	λf (24°C)	CC
A	4,59	2,64	0,99	2,17
B	6,88	2,64	0,99	3,56

El CC de la mezcla B es mayor a 2,5 es decir se puede separar con facilidad prácticamente a cualquier tamaño, por otra parte, el CC de la mezcla A esta entre 2,5 y 1,75, la concentración tendrá mayor probabilidad de tener éxito para tamaños de partícula superiores a la malla 100 (0,15 mm).

4.7. Ensayos en la mesa de sacudidas

En la mesa de sacudidas se realizaron ensayos con las mezclas A y B variando los parámetros de ángulo de inclinación de la superficie, numero de sacudidas por minuto y caudal de agua en la zona de alimentación de material de forma aleatoria según el diseño experimental de superficie de respuesta realizado en el software Minitab versión 18.1.

4.7.1. Ensayos de concentración, mezcla A

El nivel de las variables independientes y la aleatoriedad de los ensayos realizados a la mezcla A, estuvieron determinados según el diseño experimental de superficie de respuesta realizado en el software Minitab versión 18.1, que se muestra a continuación:

Tabla 16: Diseño experimental de superficie de respuesta, Mezcla A.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	caudal	inclinacion	sacudidas
1	18	1	0	1	11,45	8	360
2	4	2	1	1	15,45	10	258
3	1	3	1	1	7,45	6	258
4	11	4	-1	1	11,45	6	360
5	12	5	-1	1	11,45	10	360
6	9	6	-1	1	7,45	8	360
7	14	7	-1	1	11,45	8	462
8	20	8	0	1	11,45	8	360
9	2	9	1	1	15,45	6	258
10	13	10	-1	1	11,45	8	258
11	19	11	0	1	11,45	8	360
12	8	12	1	1	15,45	10	462
13	10	13	-1	1	15,45	8	360
14	17	14	0	1	11,45	8	360
15	15	15	0	1	11,45	8	360
16	5	16	1	1	7,45	6	462
17	7	17	1	1	7,45	10	462
18	3	18	1	1	7,45	10	258
19	16	19	0	1	11,45	8	360
20	6	20	1	1	15,45	6	462

La tabla 16 contiene los valores de Razón de Enriquecimiento y % Recuperación de la mezcla A, los datos en detalle recolectados en los 20 ensayos se pueden observar en el anexo 6.

Tabla 17: Razón de Enriquecimiento y % Recuperación de la mezcla A.

Mezcla A					
Orden Corrida	caudal (lpm)	inclinación (grados)	Sacudidas x min	Razón de Enriquecimiento	% Recuperación
1	11,45	8,00	360,00	7,20	52,60
2	15,45	10,00	258,00	6,26	24,80
3	7,45	6,00	258,00	2,82	73,00
4	11,45	6,00	360,00	1,91	97,40
5	11,45	10,00	360,00	8,96	11,20
6	7,45	8,00	360,00	3,23	98,80
7	11,45	8,00	462,00	10,59	69,60
8	11,45	8,00	360,00	12,48	31,20
9	15,45	6,00	258,00	3,40	60,00
10	11,45	8,00	258,00	4,13	24,80
11	11,45	8,00	360,00	7,28	39,00
12	15,45	10,00	462,00	7,50	78,40
13	15,45	8,00	360,00	4,89	80,00
14	11,45	8,00	360,00	9,43	43,20
15	11,45	8,00	360,00	9,95	62,40
16	7,45	6,00	462,00	1,02	100,00
17	7,45	10,00	462,00	6,06	85,60
18	7,45	10,00	258,00	3,95	19,40
19	11,45	8,00	360,00	5,24	62,60
20	15,45	6,00	462,00	1,63	100,00

En la tabla 17 se puede observar como en los ensayos con una inclinación de la superficie de 6 °C y un valor de sacudidas de 462 rpm se obtuvo valores de Razón de Enriquecimiento bajo y % de Recuperación altos, esto se debe que al poseer una inclinación baja y un valor alto de sacudidas por minuto las partículas se mueven de manera rápida por la superficie del tablero, pero no logran pasar por encima de los riffles de la mesa por lo tanto van hasta la zona final donde se recolecta el concentrado. En la Fig. 37 se puede observar este comportamiento.

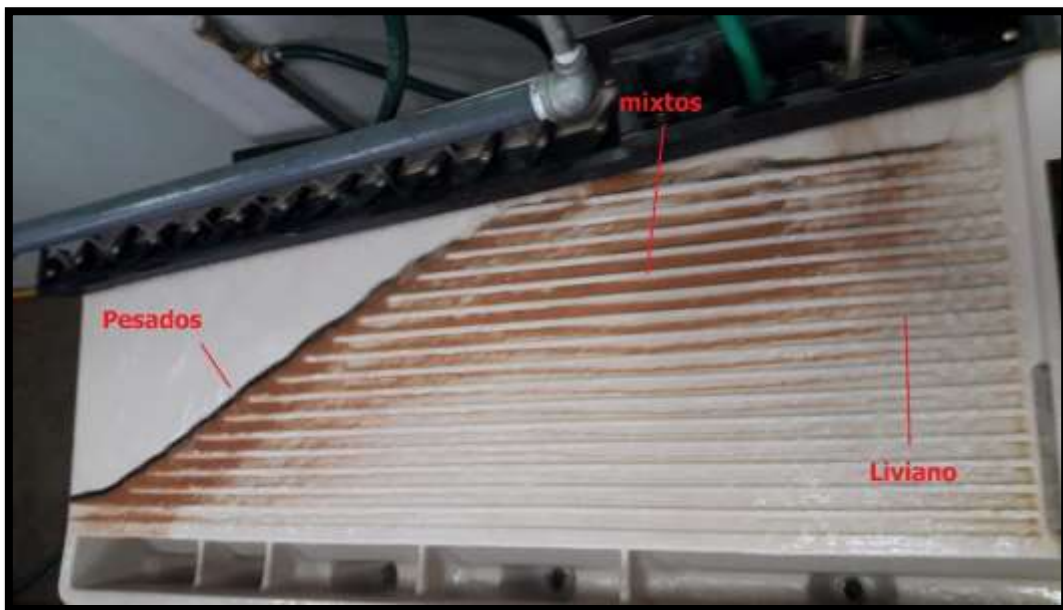


Fig. 37: Comportamiento de corrida 16, Razón de Enriquecimiento bajo y % de Recuperación altos, Mezcla A.

Del mismo modo se puede observar como con una inclinación de la superficie de 8 °C, caudal de 11,45 lpm y un valor de sacudidas de 360 rpm se obtuvo valores de Razón de Enriquecimiento altos y con un valor de sacudidas de 258 rpm se obtuvo valores de % de Recuperación bajos, esto se debe a que con valores medios en los parámetros del equipo el material 1 (liviano) cae en la zona inicial y media de la superficie de la mesa y con un nivel bajo de sacudidas por minuto el material 2 (pesado) cae mayormente en la zona media de la superficie de la mesa. En la Fig. 38 se puede observar este comportamiento.

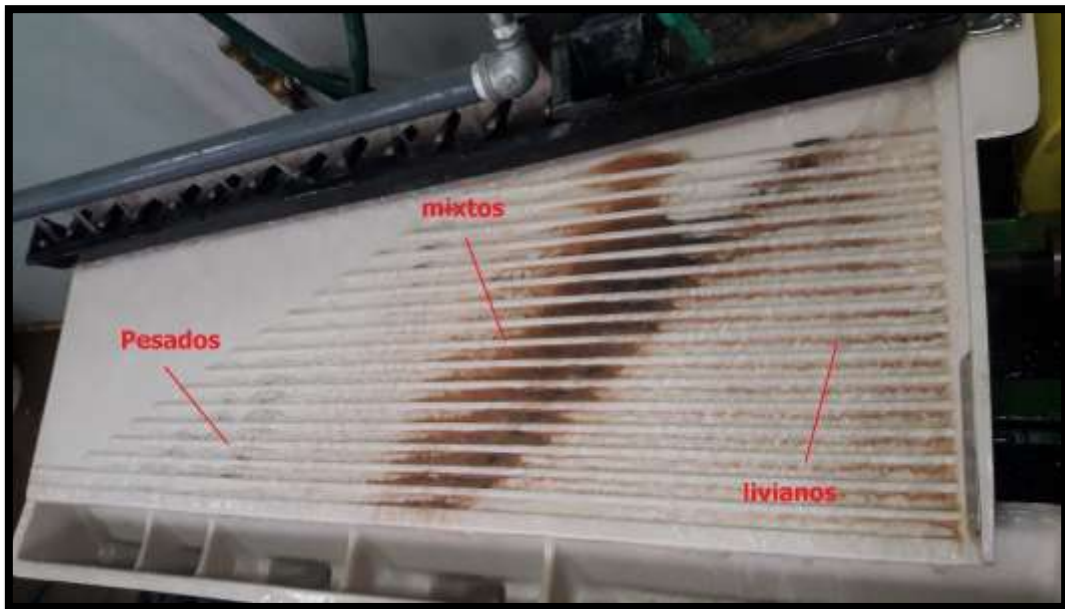


Fig. 38: Comportamiento de corrida 10, % de Recuperación bajo, Mezcla A.

El ensayo que se realizó en la corrida 17 (Fig.39) se pudo comprobar visualmente que fue uno de los mejores ensayos realizados a la mezcla A, en el cual los materiales se separaron de manera eficiente yendo el material 2 (pesado) hacia la zona de concentrados de la mesa y el material 1 (liviano) a la zona inicial y zona media de la superficie de la mesa.



Fig. 39: Comportamiento de corrida 17, Razón de Enriquecimiento y % de Recuperación buenos, Mezcla A.

El ensayo de la corrida 17 el material 1, el de menor densidad se movió por encima de los riffles a causa de la alta inclinación. Un caudal bajo y velocidad alta de sacudidas permitió que el material 2 permaneciera en los canales como causa de ser de mayor densidad y este se desplazó de manera rápida hacia la zona final de la superficie.

4.7.2. Ensayos de concentración, mezcla B

El nivel de las variables independientes y la aleatoriedad de los ensayos realizados a la mezcla B, estuvieron determinados según el diseño experimental de superficie de respuesta realizado en el software Minitab versión 18.1, que se muestra a continuación:

Tabla 18: Diseño experimental de superficie de respuesta, Mezcla B.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	caudal	inclinacion	sacudidas
1	9	1	-1	1	7,45	8	360
2	10	2	-1	1	15,45	8	360
3	3	3	1	1	7,45	10	258
4	20	4	0	1	11,45	8	360
5	1	5	1	1	7,45	6	258
6	7	6	1	1	7,45	10	462
7	19	7	0	1	11,45	8	360
8	12	8	-1	1	11,45	10	360
9	18	9	0	1	11,45	8	360
10	4	10	1	1	15,45	10	258
11	5	11	1	1	7,45	6	462
12	15	12	0	1	11,45	8	360
13	8	13	1	1	15,45	10	462
14	2	14	1	1	15,45	6	258
15	11	15	-1	1	11,45	6	360
16	13	16	-1	1	11,45	8	258
17	14	17	-1	1	11,45	8	462
18	6	18	1	1	15,45	6	462
19	17	19	0	1	11,45	8	360
20	16	20	0	1	11,45	8	360

La tabla 18 contiene los valores de Razón de Enriquecimiento y % Recuperación de la mezcla B, los datos en detalle recolectados en los 20 ensayos se pueden observar en el anexo 6.

Tabla 19: Razón de Enriquecimiento y % Recuperación de la mezcla B.

Mezcla B					
Orden Corrida	Caudal (lpm)	Inclinación (grados)	Sacudidas x min	Razón de Enriquecimiento	% Recuperación
1	7,45	8	360	2,73	96,0
2	15,45	8	360	4,72	83,0
3	7,45	10	258	2,83	43,0
4	11,45	8	360	13,00	85,4
5	7,45	6	258	2,35	52,6
6	7,45	10	462	2,34	100,0
7	11,45	8	360	3,23	96,4
8	11,45	10	360	18,48	19,4
9	11,45	8	360	5,37	81,6
10	15,45	10	258	5,46	35,2
11	7,45	6	462	1,10	100,0
12	11,45	8	360	8,61	74,4
13	15,45	10	462	14,39	80,0
14	15,45	6	258	3,57	92,8
15	11,45	6	360	1,16	99,4
16	11,45	8	258	9,58	60,0
17	11,45	8	462	3,57	91,0
18	15,45	6	462	1,69	99,6
19	11,45	8	360	9,40	88,4
20	11,45	8	360	11,59	80,0

Los valores de % Recuperación y Razón de Enriquecimiento de la mezcla B fueron calculados utilizando la ecuación 2 y la ecuación 3 respectivamente. En la tabla 19 se puede observar como en los ensayos con una inclinación de la superficie de 6 °C y un valor de sacudidas de 462 rpm se obtuvo valores de Razón de Enriquecimiento bajo y % de Recuperación altos, esto se debe que al poseer una inclinación baja y un valor alto de sacudidas por minuto las partículas se mueven de manera rápida por la superficie del tablero, pero no logran pasar por encima de los riffles de la mesa por lo tanto van hasta la zona final donde se recolecta el concentrado. En la Fig. 40 se puede observar este comportamiento.



Fig. 40: Comportamiento de corrida 11, Razón de Enriquecimiento bajo y % de Recuperación altos, Mezcla B.

Del mismo modo se puede observar como con una inclinación de la superficie de 10 °C, caudal de 15,45 lpm y un valor de sacudidas de 258 rpm se obtuvo valores de Razón de Enriquecimiento medios y con un valor de sacudidas de 258 rpm se obtuvo valores de % de Recuperación bajos, esto se debe a que con valores altos en los parámetros de inclinación y caudal del

equipo el material 1 (liviano) cae en la zona inicial y media de la superficie de la mesa y con un nivel bajo de sacudidas por minuto el material 2 (pesado) cae mayormente en la zona media de la superficie de la mesa. En la Fig. 41 se puede observar este comportamiento.

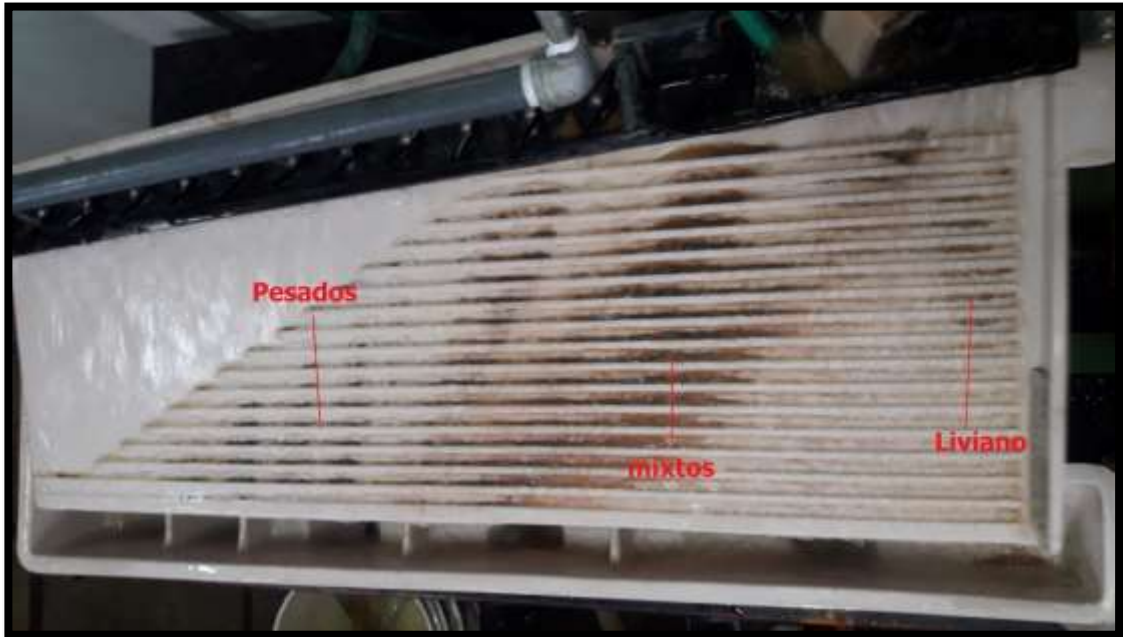


Fig. 41: Comportamiento de corrida 10, % de Recuperación bajo, Mezcla B.

El ensayo que se realizó en la corrida 13 se pudo comprobar visualmente que fue uno de los mejores ensayos realizados a la mezcla B, en el cual los materiales se separaron de manera eficiente yendo el material 2 (pesado) hacia la zona de concentrados de la mesa y el material 1 (liviano) a la zona inicial y zona media de la superficie de la mesa. El ensayo de la corrida 13 el material 1, el de menor densidad se movió por encima de los riffles a causa de la alta inclinación. Un caudal bajo y velocidad alta de sacudidas permitió que el material 2 permaneciera en los canales como causa de ser de mayor densidad y este se desplazó de manera rápida hacia la zona final de la superficie.

4.8. Parámetros óptimos de concentración gravimétrica, utilizando metodología de superficie de respuesta.

4.8.1. Análisis estadístico del diseño de superficie de respuesta de la Mezcla A

Mediante la utilización del software Minitab versión 18.1 se realizó un análisis estadístico del diseño de superficie de respuesta de la mezcla A, a continuación, se presentan una serie de gráficos de dichos análisis estadísticos.

- Diagramas de Pareto de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento.

En el siguiente diagrama de Pareto se muestran los valores absolutos de los efectos desde el más grande hasta el efecto más pequeño. El diagrama también muestra una línea de referencia para indicar cuáles efectos son estadísticamente significativos, en consecuencia, las barras que cruzan la línea de referencia son estadísticamente significativas.

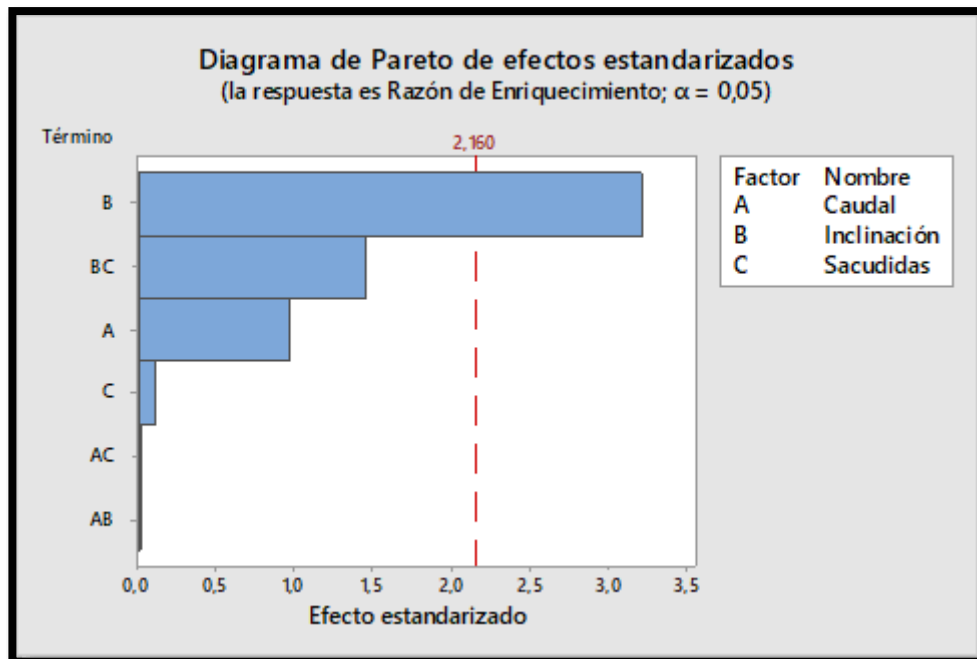


Fig. 42: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla A.

En la Fig. 42 la barra que representa la variable independiente inclinación denotado con la letra B, cruza la línea de referencia siendo estadísticamente significativo.

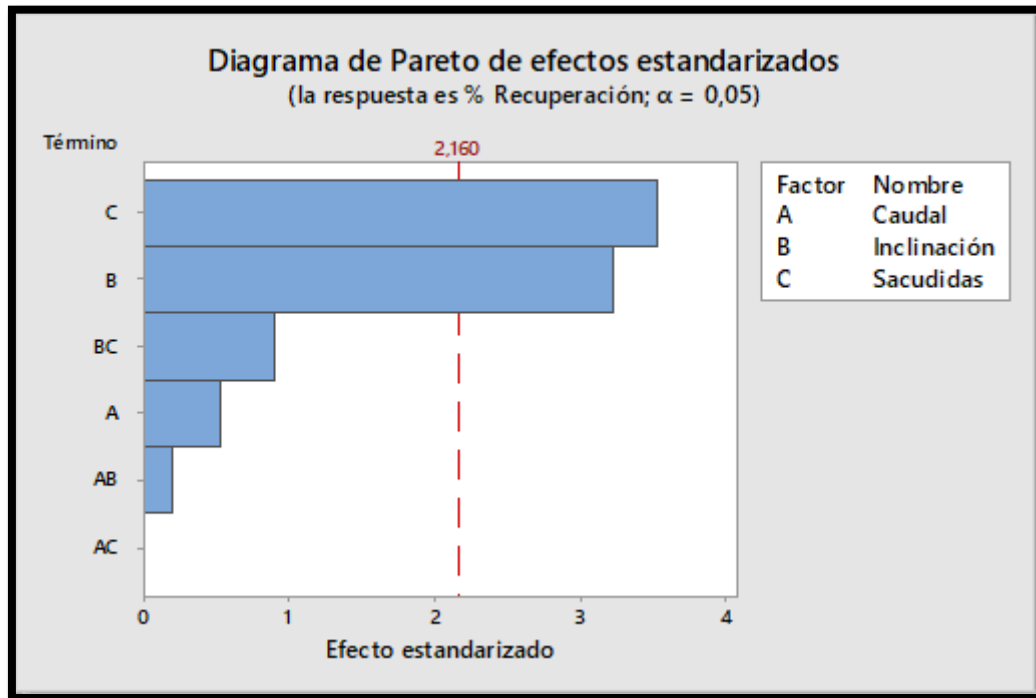


Fig. 43: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla A.

En la Fig. 43 las barras que representan las variables independientes de sacudidas por minuto e inclinación denotadas con las letras C y letra B respectivamente, cruzan la línea de referencia siendo estadísticamente significativas.

En las gráficas de Pareto se puede observar que para la variable dependiente Razón de Enriquecimiento solo la inclinación tiene significancia estadística, mientras que para la variable dependiente % de Recuperación la inclinación y sacudidas por minuto tienen significancia estadística.

- Gráfica normal de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento.

En las siguientes gráficas normales de los efectos muestra los efectos de las variables, estandarizados en relación con una línea de ajuste de distribución

para el caso en que todos los efectos son 0. Además, en estas gráficas se muestran los efectos negativos en el lado izquierdo de la gráfica, los cuales disminuyen la variable de respuesta (dependiente) cuando la configuración de la variable independiente cambia del valor bajo a valor alto y los efectos positivos en el lado derecho de la gráfica, los cuales aumentan la variable de respuesta (dependiente) cuando la configuración de la variable independiente cambia del valor bajo a valor alto.

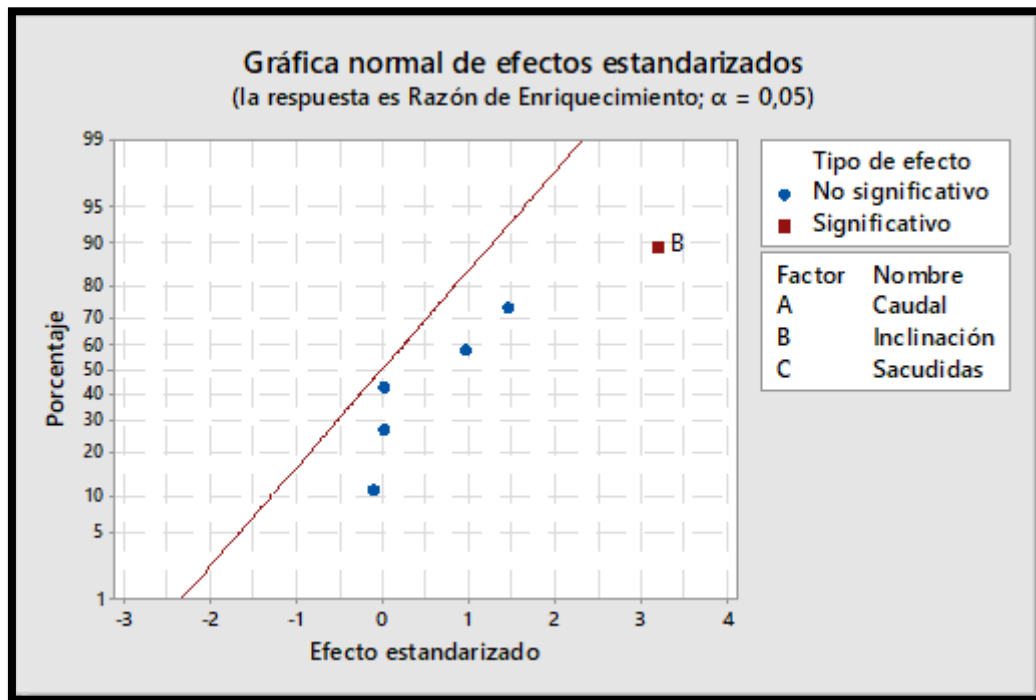


Fig. 44: Gráfica normal de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla A. En la Fig. 44 se puede observar como la variable de la inclinación es estadísticamente significativa, además muestra como esta variable tiene un efecto positivo por estar en el lado derecho de la línea de ajuste, lo que significa que al aumentar de nivel en la inclinación también aumentará la Razón de Enriquecimiento en la mezcla A.

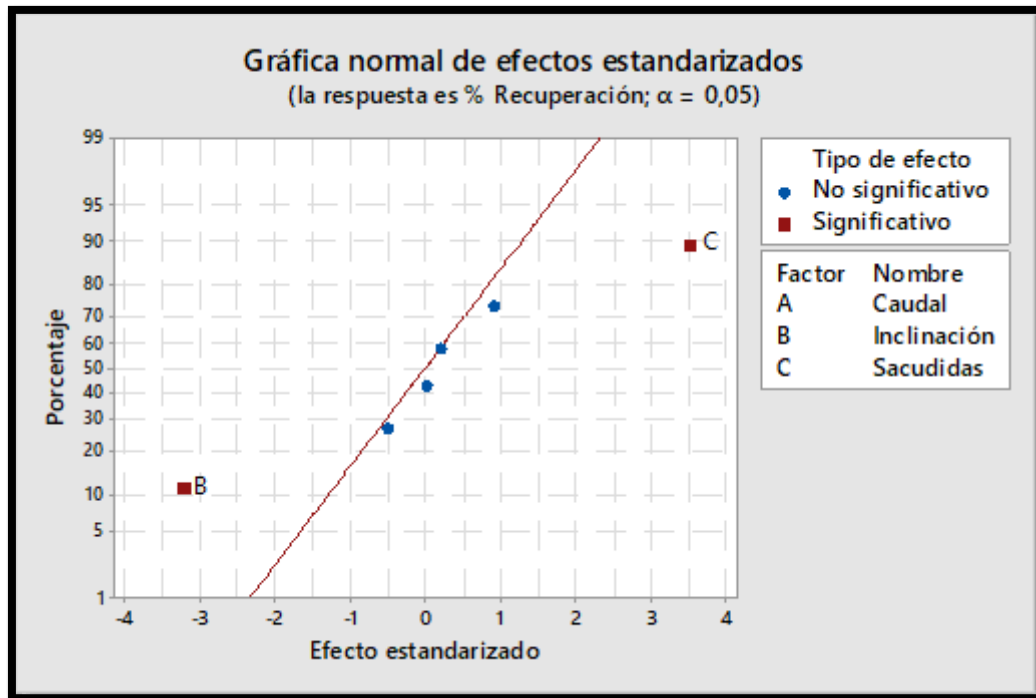


Fig. 45: Gráfica normal de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla A.

En la Fig. 45 se puede observar cómo las variables de inclinación y sacudidas son estadísticamente significativas, la primera se encuentra a la izquierda de la línea de ajuste lo que significa que cuando aumenta de nivel el porcentaje de recuperación disminuye mientras que la variable de sacudidas se encuentra a la derecha de la línea de ajuste y cuando ésta aumenta el porcentaje de recuperación también.

- Gráficas de contorno de % Recuperación y Razón de Enriquecimiento

En las gráficas de contorno se muestra la relación tridimensional en dos dimensiones, graficando las variables de inclinación y sacudidas en las escalas horizontal y vertical y los valores de respuesta se representan mediante contornos. En las siguientes gráficas de contorno no se tomó en cuenta la variable de caudal ya que en el análisis realizado al gráfico de Pareto y al gráfico normal de efectos estandarizados demostraron que no es una variable significativa estadísticamente.

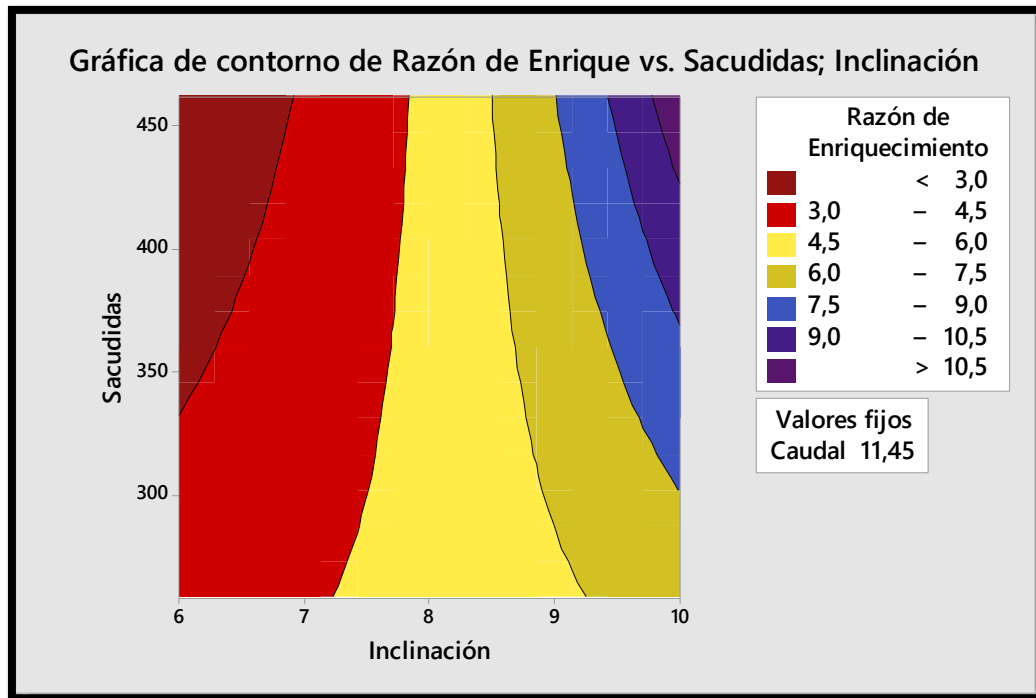


Fig. 46: Gráfica de contorno de Razón de Enriquecimiento, Mezcla A.

En la Fig. 46 se puede observar que para valores altos de sacudidas e inclinación la Razón de Enriquecimiento aumenta, esto se debe a que estas variables al poseer un valor alto, es más difícil para el material 1 que posee menor densidad llegue a la zona final de la superficie de la mesa ya que es lavado en la zona inicial y parte del material 2 de mayor densidad si llega a la zona de concentración.

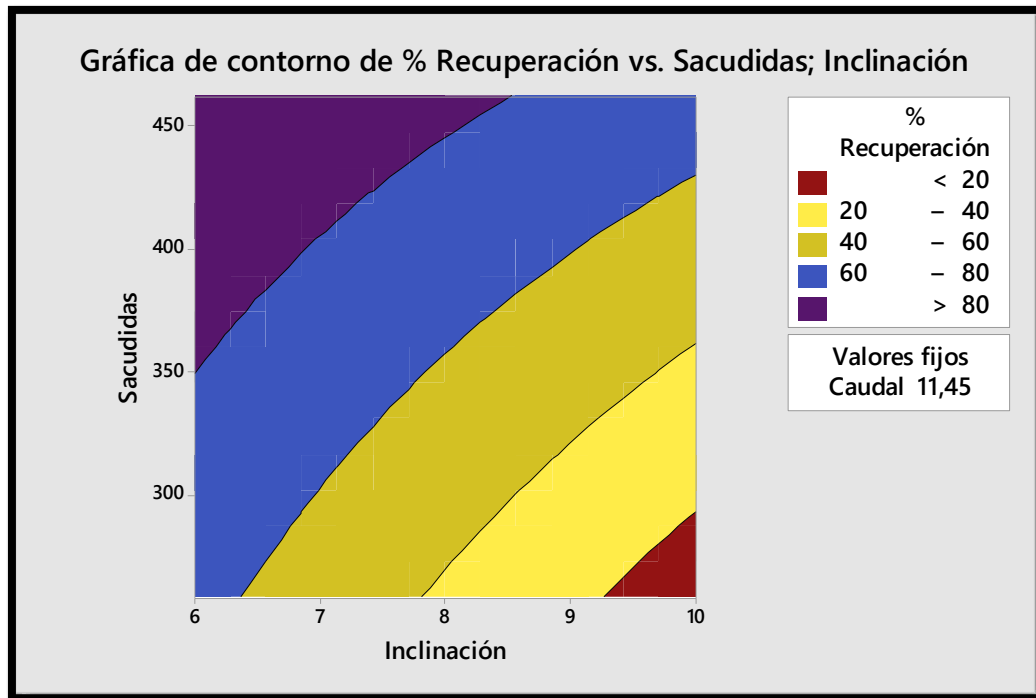


Fig. 47: Gráfica de contorno de % Recuperación, Mezcla A.

En la Fig. 47 se puede observar que para valores altos de sacudidas y valores bajos de inclinación el % de Recuperación aumenta, esto se debe a que la variable de inclinación al poseer un bajo valor todo el material llega a la zona de concentración.

- Gráficas de superficies 3d

En estas gráficas se puede observar la relación entre tres variables. Las variables de inclinación y sacudidas se muestran en las escalas X, Y, y la variable de dependiente o de respuesta se representa mediante una superficie lisa (gráfica de superficie 3D). En las siguientes gráficas de superficie no se tomó en cuenta la variable de caudal ya que en el análisis realizado al gráfico de Pareto y al gráfico normal de efectos estandarizados demostraron que no es una variable significativa estadísticamente.

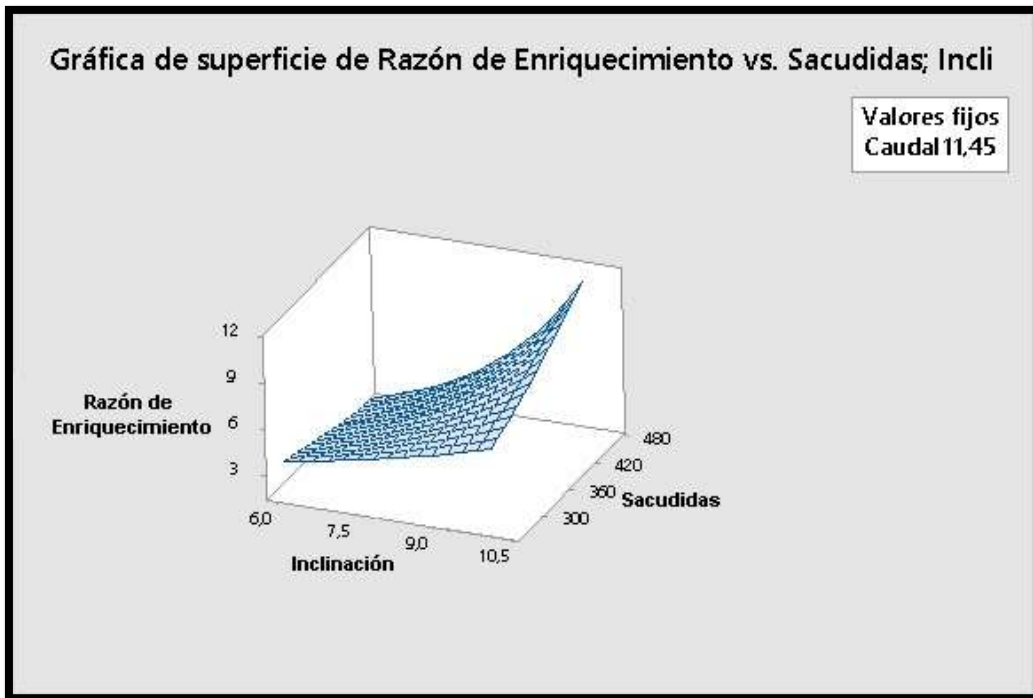


Fig. 48: Gráfica de superficie de Razón de Enriquecimiento, Mezcla A

En la Fig. 48 se observa como la superficie alcanza un máximo de Razón de Enriquecimiento con valores altos en las variables de sacudidas e inclinación, este comportamiento se debe a que una alta inclinación genera que la mayor parte del material 1 pase por encima de los riffles y el material 2 llegue a la zona de concentración limpio.

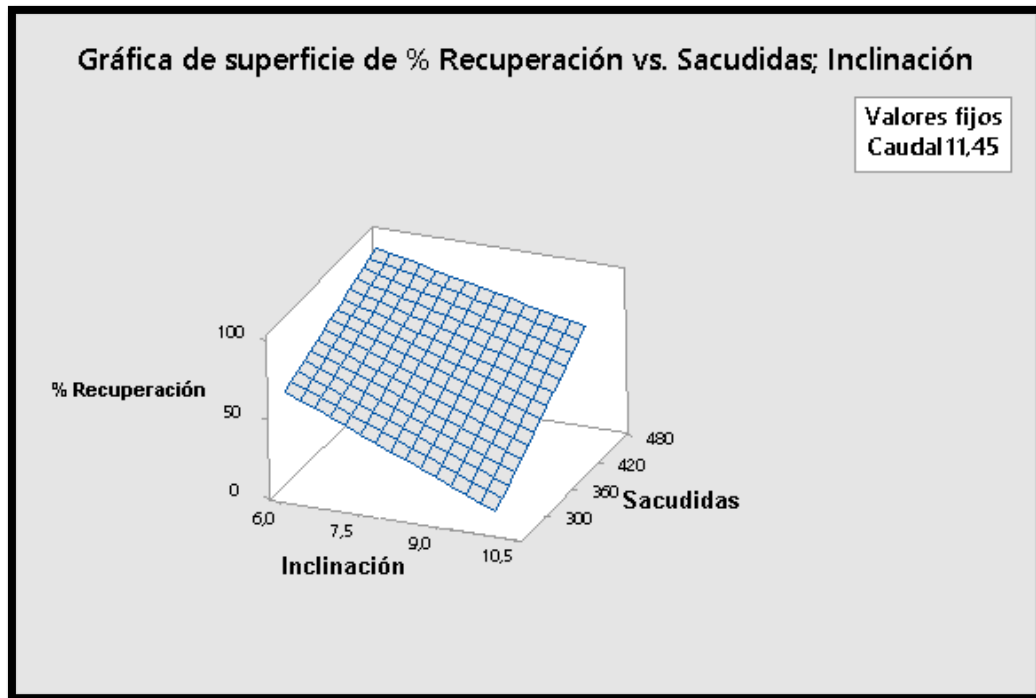


Fig. 49: Gráfica de superficie de % de Recuperación, Mezcla A.

En la Fig. 49 se puede observar que para valores altos de sacudidas y valores bajos de inclinación el % de Recuperación aumenta, esto se debe a que la variable de inclinación al poseer un bajo valor toda la mezcla llega a la zona de concentración. Un valor alto de sacudidas produce que el material no sedimente en los canales entre los riffles y se desplace más rápido lo que favorece que el material llegue a la zona final de la superficie.

- Gráfica superpuesta de contornos

Normalmente en una operación de concentración los valores de las variables dependientes de % Recuperación y Razón de enriquecimiento son completamente opuestas Fig. 8, es por ello que se realizó una gráfica superpuesta de contornos para poder identificar visualmente los valores factibles de las variables independientes para múltiples respuestas con respecto al diseño experimental de superficie de respuesta.

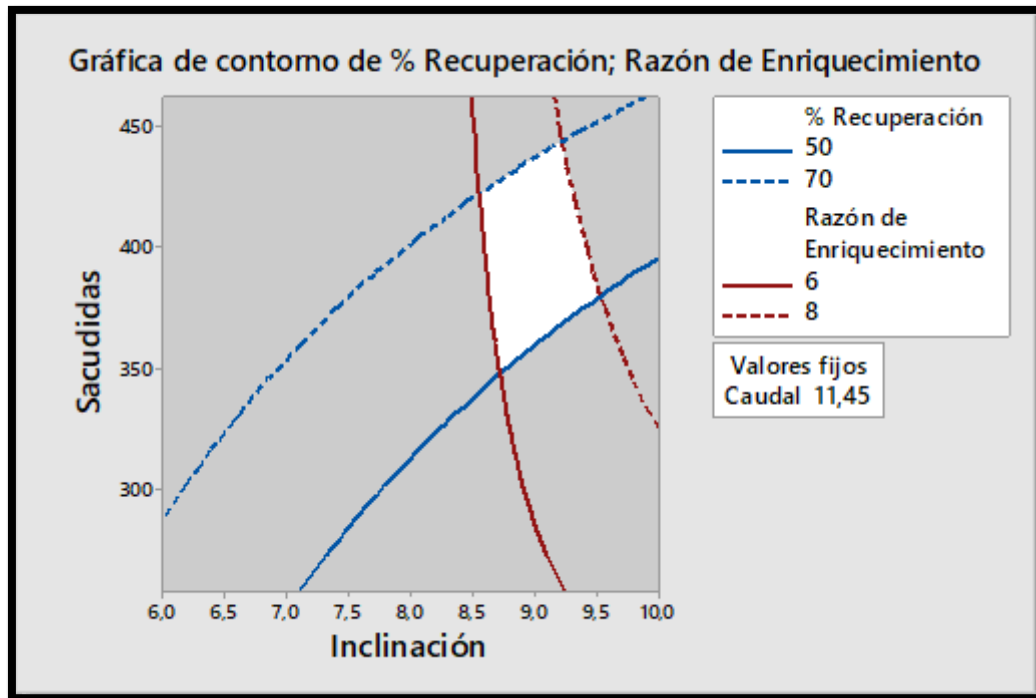


Fig. 50: Gráfica superpuesta de contornos, Mezcla A.

En la Fig. 50 la región blanca es donde todas las variables dependientes están dentro de sus límites. Esto se conoce como la región factible, ésta está delimitada por un rango de % de Recuperación de 50% a 70% y una Razón de Enriquecimiento de 6 a 8, en esta zona se encuentran los valores óptimos de las variables independientes, con una inclinación de aproximadamente $8,5^{\circ}$ a $9,5^{\circ}$ y un ritmo de 350 a 450 sacudidas por minuto estableciendo un caudal fijo de 11,45 lpm.

4.8.2. Análisis estadístico del diseño de superficie de respuesta de la Mezcla B

Mediante la utilización del software Minitab versión 18.1 se realizó un análisis estadístico del diseño de superficie de respuesta de la mezcla B, a continuación, se presentan una serie de gráficos de dichos análisis estadísticos.

- Diagramas de Pareto de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento.

En el siguiente diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos desde el más grande hasta el efecto más pequeño. El diagrama también muestra una línea de referencia para indicar cuáles efectos son estadísticamente significativos, en consecuencia, las barras que cruzan la línea de referencia son estadísticamente significativas.

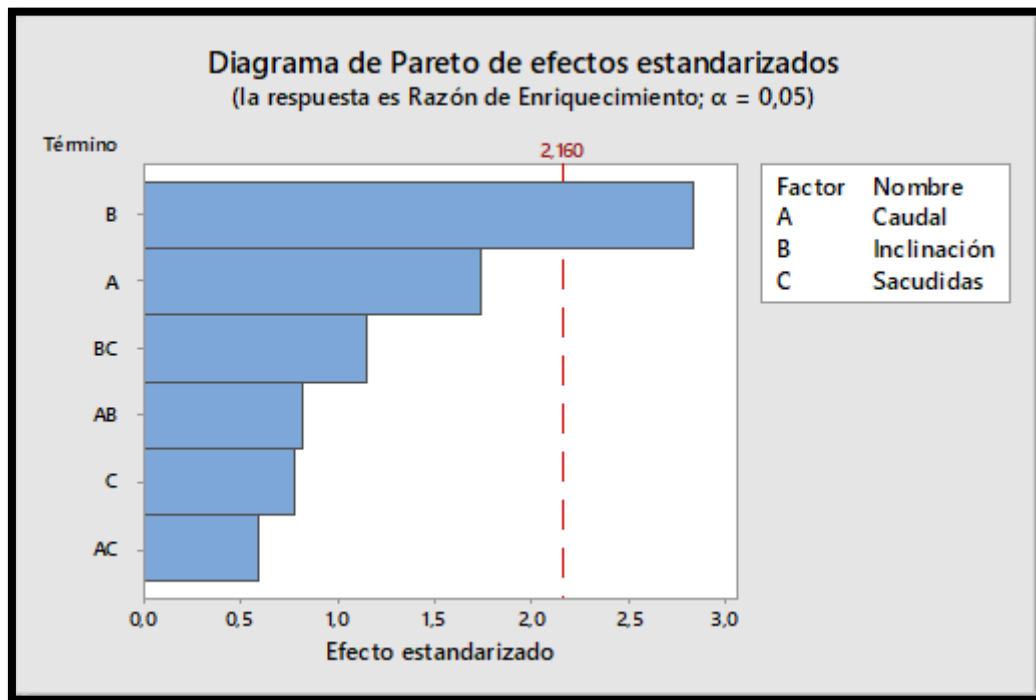


Fig. 51: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla B.

En la Fig. 51 referente a Razón de Enriquecimiento la barra que representa la variable independiente inclinación denotado con la letra B, cruza la línea de referencia siendo estadísticamente significativo.

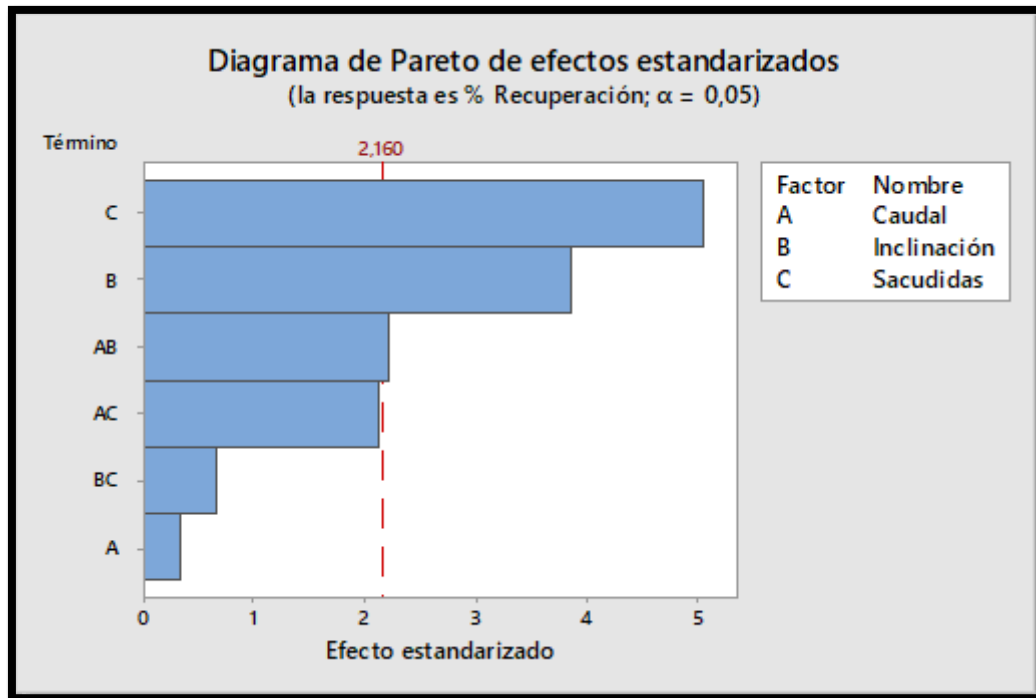


Fig. 52: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla B.

En la Fig. 52 las barras que representan las variables independientes de sacudidas por minuto, inclinación y el efecto de la combinación de caudal más inclinación, cruzan la línea de referencia siendo estadísticamente significativas.

En las gráficas de Pareto se puede observar que para la variable dependiente Razón de Enriquecimiento solo la inclinación tiene significancia estadística, mientras que para la variable dependiente % de Recuperación, la inclinación, las sacudidas por minuto y la combinación de inclinación más caudal tienen significancia estadística.

- Gráfica normal de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento.

En las siguientes gráficas normal de los efectos muestra los efectos de las variables estandarizados en relación con una línea de ajuste de distribución para el caso en que todos los efectos son 0. Además, en estas gráficas se muestran los efectos negativos en el lado izquierdo de la gráfica, los cuales disminuyen la variable de respuesta (dependiente) cuando la configuración de la variable independiente cambia del valor bajo a valor alto y los efectos positivos en el lado derecho de la gráfica, los cuales aumentan la variable de respuesta (dependiente) cuando la configuración de la variable independiente cambia del valor bajo a valor alto.

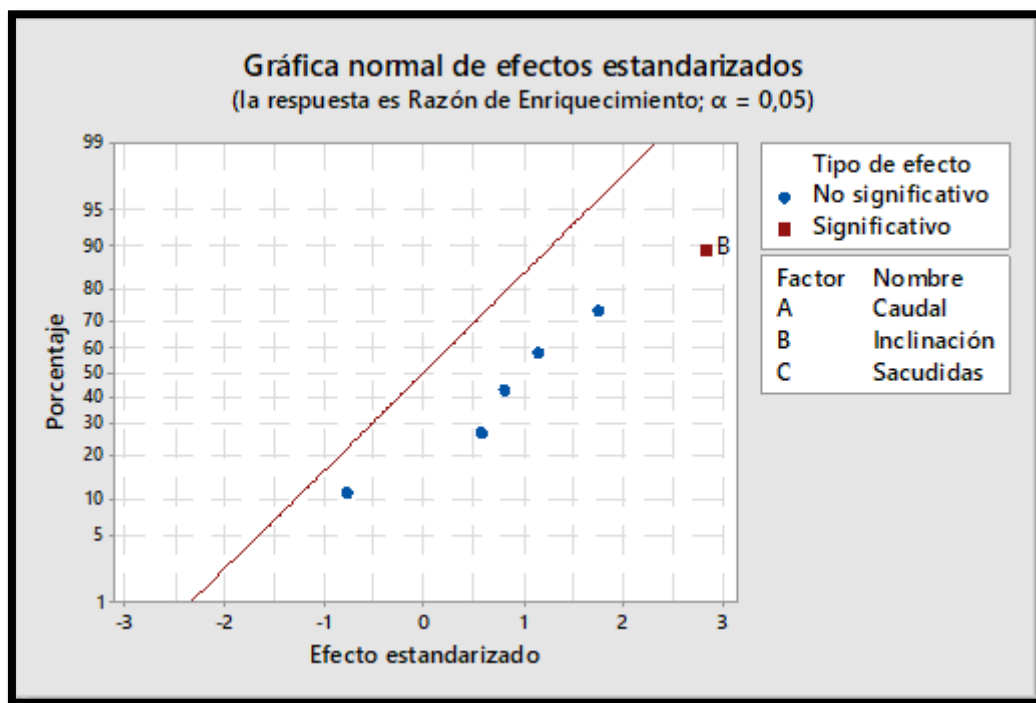


Fig. 53: Gráfica normal de efectos estandarizados para Razón de Enriquecimiento, mezcla B.

En la Fig. 53 se puede observar como la variable de la inclinación es estadísticamente significativa, además muestra como esta variable tiene un efecto positivo por estar en el lado derecho de la línea de ajuste, los que significa que al aumentar de nivel en la inclinación también aumentara la Razón de Enriquecimiento en la mezcla B.

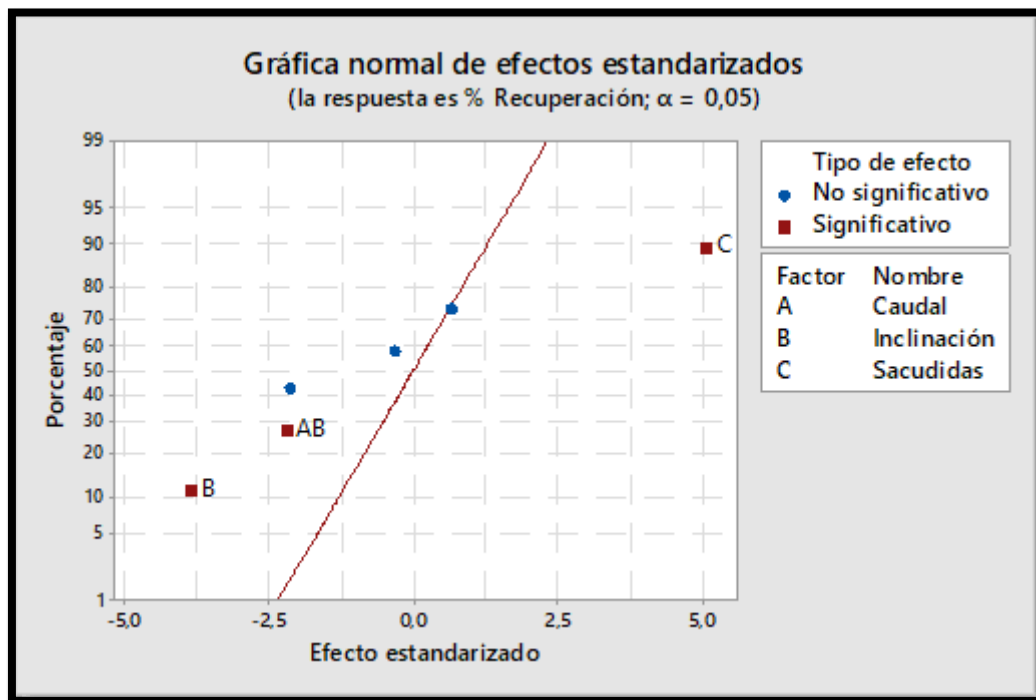


Fig. 54: Gráfica normal de efectos estandarizados para % de Recuperación, mezcla B.

En la Fig. 54 se puede observar cómo las variables de inclinación, la combinación de caudal más inclinación y sacudidas por minuto son estadísticamente significativas, las primeras se encuentran a la izquierda de la línea de ajuste lo que significa que cuando aumentan de nivel el porcentaje de recuperación disminuye mientras que la variable de sacudidas se encuentra a la derecha de la línea de ajuste y cuando esta aumenta de valor el porcentaje de recuperación también.

- Gráficas de contorno de % Recuperación y Razón de Enriquecimiento

En las gráficas de contorno se muestra la relación tridimensional en dos dimensiones, graficando las variables de inclinación y sacudidas en las escalas horizontal y vertical y los valores de respuesta se representan mediante contornos. En las siguientes gráficas de contorno no se tomó en cuenta la variable de caudal ya que en el análisis realizado al gráfico de Pareto y al gráfico normal de efectos estandarizados demostraron que no es una variable significativa estadísticamente.

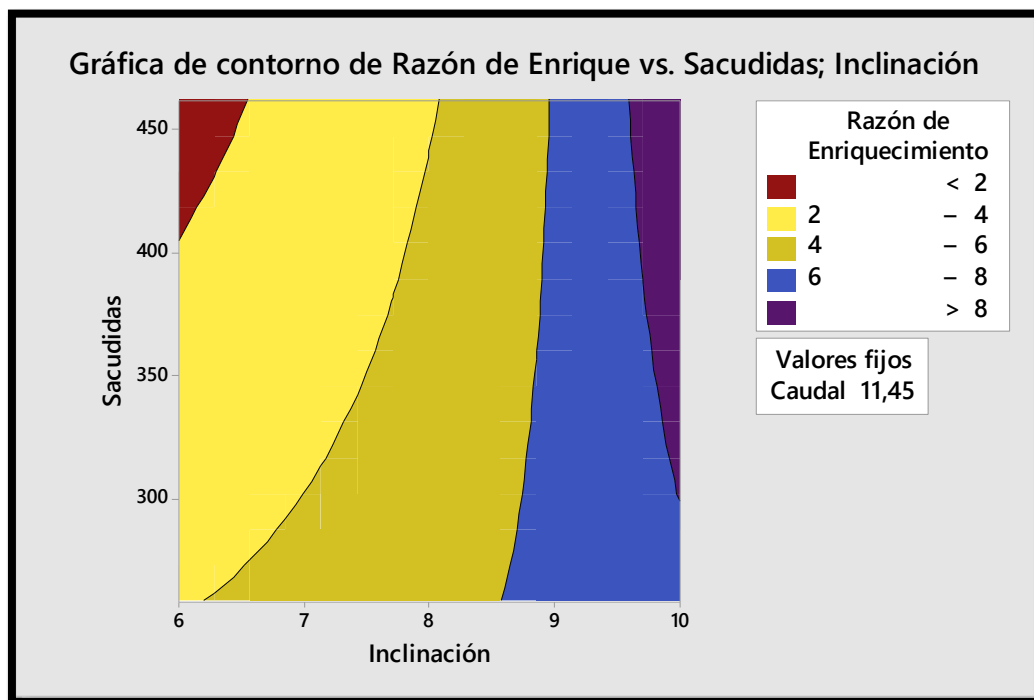


Fig. 55: Gráfica de contorno de Razón de Enriquecimiento, Mezcla B.

En la Fig. 55 se puede observar que para valores altos de inclinación la Razón de Enriquecimiento aumenta, esto se debe a que esta variable al poseer un valor alto, es más difícil para el material 1 que posee menor densidad llegue a la zona final de la superficie de la mesa ya que es lavado en la zona inicial mientras que parte del material 3 de mayor densidad sí llega a la zona de concentración.

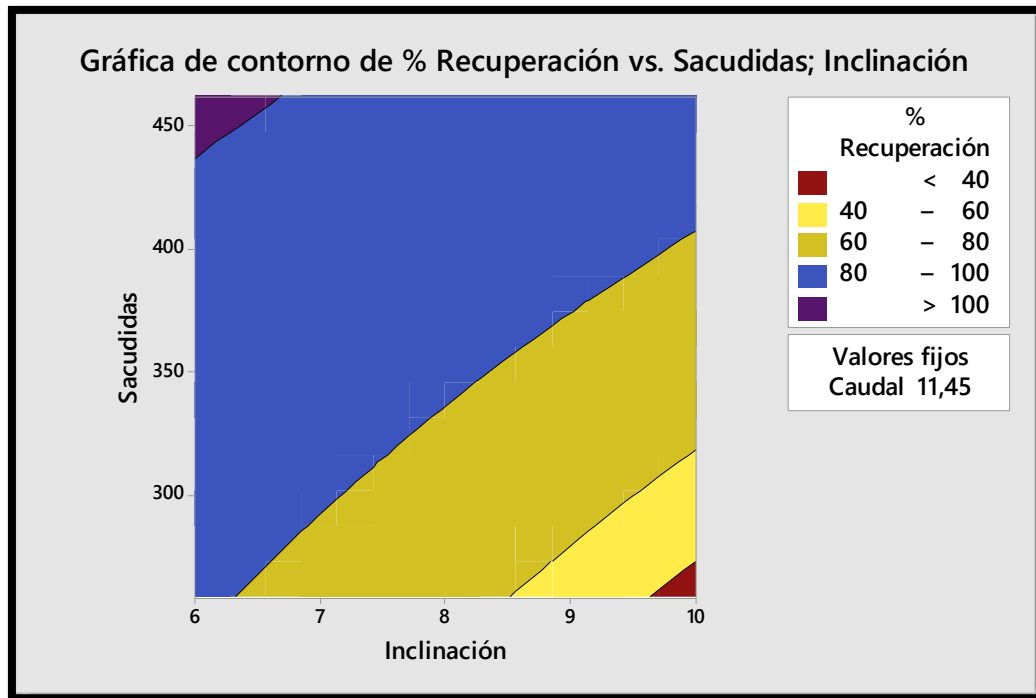


Fig. 56: Gráfica de contorno de % Recuperación, Mezcla B.

En la Fig. 56 se puede observar que para valores altos de sacudidas y valores bajos de inclinación el % de Recuperación aumenta, esto se debe a que la variable de inclinación al poseer un bajo valor todo el material permanece en los canales entre los riffles terminando en la zona de concentración.

- Gráficas de superficies 3d

En estas gráficas se puede observar la relación entre tres variables. Las variables de inclinación y sacudidas se muestran en las escalas X, Y, y la variable de dependiente o de respuesta se representa mediante una superficie lisa (gráfica de superficie 3D). En las siguientes gráficas de superficie no se tomó en cuenta la variable de caudal ya que en el análisis realizado al gráfico de Pareto y al gráfico normal de efectos estandarizados demostraron que no es una variable significativa estadísticamente.

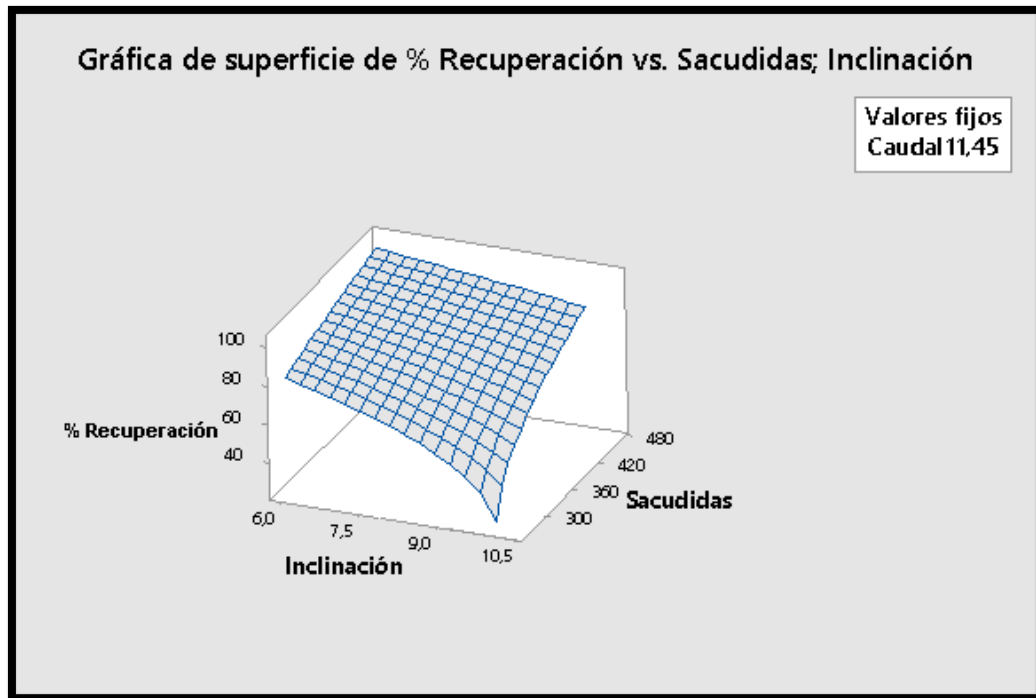


Fig. 57: Gráfica de superficie de % de Recuperación, Mezcla B.

En la Fig. 57 se puede observar que para valores altos de sacudidas y valores bajos de inclinación el % de Recuperación aumenta, esto se debe a que la variable de inclinación al poseer un bajo valor toda la mezcla llega a la zona de concentración. Un valor alto de sacudidas produce que el material no sedimente en los canales entre los riffles y se desplace más rápido lo que favorece que el material llegue a la zona final de la superficie. Para valores de sacudidas bajos y valores de inclinación altos el % de Recuperación es muy malo.

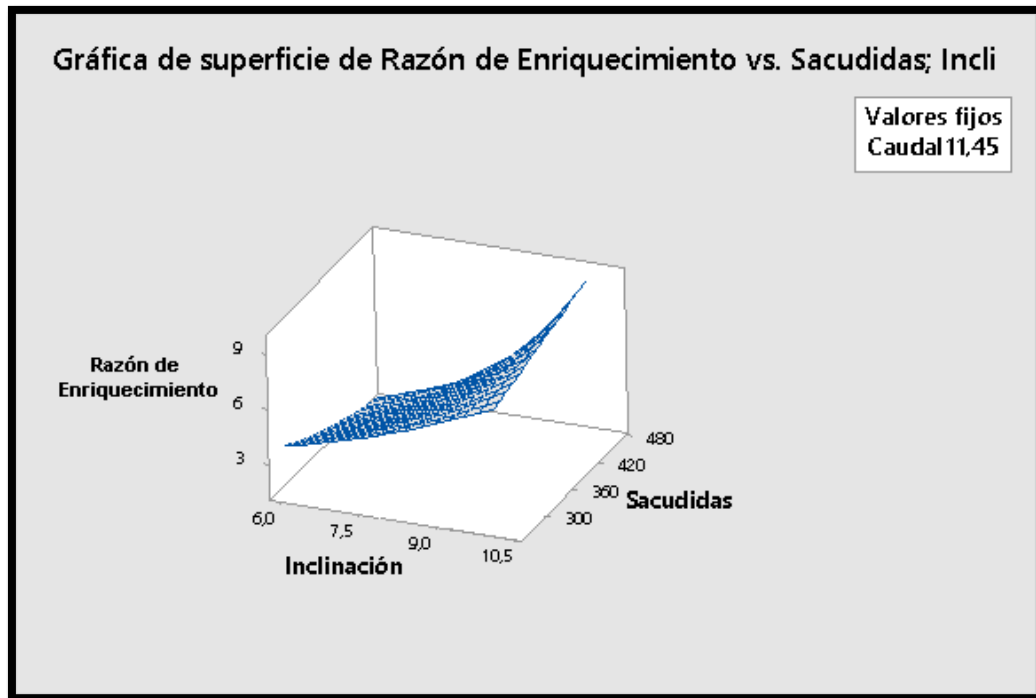


Fig. 58: Gráfica de superficie de Razón de Enriquecimiento, Mezcla B.

En la Fig. 58 se observa como la superficie alcanza un máximo de Razón de Enriquecimiento con valores altos en las variables de sacudidas e inclinación, este comportamiento se debe a que una alta inclinación genera que la mayor parte del material 1 pase por encima de los riffles y el material 3 llegue a la zona de concentración limpio.

- Gráfica superpuesta de contornos

En los ensayos de concentración realizados, los valores de las variables dependientes de % Recuperación y Razón de enriquecimiento son completamente opuestas en la mayoría de los casos, es por ello que se realizó una gráfica superpuesta de contornos para poder identificar visualmente los valores factibles de las variables independientes para múltiples respuestas con respecto al diseño experimental de superficie de respuesta.

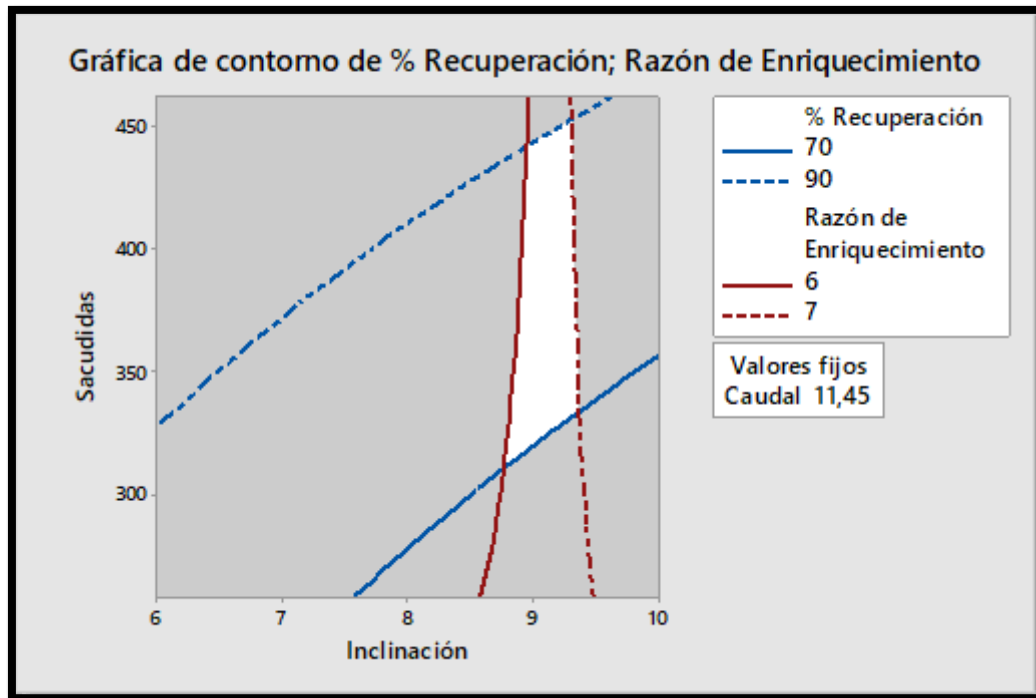


Fig. 59: Gráfica superpuesta de contornos, Mezcla B.

En la Fig. 59 la región blanca es donde todas las variables dependientes están dentro de sus límites. Esto se conoce como la región factible, esta está delimitada por un rango de % de Recuperación de 70% a 90% y una Razón de Enriquecimiento de 6 a 7, en esta zona se encuentran los valores óptimos de las variables independientes, con una inclinación de aproximadamente $8,5^{\circ}$ a $9,5^{\circ}$ y un ritmo de 300 a 450 sacudidas por minuto estableciendo un caudal fijo de 11,45 lpm.

CONCLUSIONES

1. Las herramientas estadísticas permitieron la creación de diagramas de Pareto y gráficas normales de efectos estandarizados, las cuales demostraron que la elección de la variable independiente de caudal de agua en la zona de alimentación no fue la correcta, ya que esta variable no tuvo significancia estadística trabajando con estas de mezclas.
2. En el análisis realizado se pudo observar que para ensayos con los mismos parámetros no hubo una diferencia notable entre la mezcla A y B con respecto a la obtención de los índices metalúrgicos.
3. En la gráfica normal de efectos estandarizados cuando la superficie de la mesa está inclinada 6° se obtiene un alto % de Recuperación, es decir, afecta negativamente a la variable dependiente, caso contrario cuando la superficie de la mesa está inclinada 10° afecta positivamente la Razón de Enriquecimiento.
4. En la gráfica normal de efectos estandarizados se observa como las sacudidas por minutos afectan positivamente la recuperación de la mezcla A y la de la mezcla B, es decir cuando las sacudidas aumentan la respuesta también lo hace. Para la obtención del índice metalúrgico Razón de Enriquecimiento la frecuencia de sacudida no tiene significancia estadística.
5. En la gráfica superpuesta de contornos de la mezcla A se muestra la zona donde la variable de inclinación de la superficie teniendo un valor de 9° y con sacudidas que van desde 350 a 450 por minuto están optimizadas para la obtención de un 50 a 70% de Recuperación y de un 6 a 8 de Razón de Enriquecimiento.

6. En la gráfica superpuesta de contornos de la mezcla B se muestra la zona donde la variable de inclinación de la superficie teniendo un valor de 9° y con sacudidas que van desde 300 a 450 por minuto están optimizadas para la obtención de un 70 a 90% de Recuperación y de un 6 a 7 de Razón de Enriquecimiento.
7. Para materiales con un criterio de concentración comprendido entre 2 y 3,5, un tamaño de grano pasante malla 30 y con una esfericidad media y una redondez angulosa los valores óptimos de la inclinación de la superficie será aproximadamente 9° , un rango de 350 a 450 sacudidas por minuto y un caudal fijo de 11,5 litros por minuto.

RECOMENDACIONES

Una vez desarrollado el estudio se tienen recomendaciones referentes a las instalaciones y otras de Investigaciones, las mismas deberán tomarse dependiendo de los requerimientos de las líneas de investigación y proyectos a desarrollar:

Instalaciones del Laboratorio

- Instalar una tubería para el sistema de agua en la zona de alimentación del material de la mesa para así irrigar de manera uniforme toda la zona.
- Evaluar cómo recuperar y clarificar el agua que sale de la mesa.
- Reparar de forma adecuada la cinta transportadora del concentrador magnético y evitar la manipulación de la misma.

Línea de investigación

- Realizar un diseño de superficie de respuesta tomando en cuenta otras variables como el tamaño de partícula, caudal en la zona de limpieza, velocidad de alimentación de material o amplitud de movimiento de la mesa.
- Proponer un diseño de superficie de respuesta utilizando una mezcla con un criterio de concentración menor a 2 o mayor a 3,5 para completar los estudios realizados.
- Evaluar los parámetros planteados para concentración de minerales pesados con Tenores reales.

Prácticas operativas

- Es importante tomar en cuenta para cualquier tipo de material, la realización de análisis morfológicos a las muestras para determinar la redondez y esfericidad.

- Realizar reducción de tamaño pasante malla 30 (0,595 mm) para obtener un mejor comportamiento de la partícula sobre la superficie, ya que ayuda a que las partículas livianas de mayor tamaño no compitan con las partículas pesadas de menor tamaño.
- Utilizar un preparador de pulpa antes de la mesa, para facilitar la alimentación en estado líquido y así obtener un mejor comportamiento del material en la zona inicial de la superficie de la mesa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boada S. (1990) Obtención de pre-concentrado de zircón, rutilo e ilmenita por método gravimétrico a partir de las arenas negras de la zona de Boquerones, Distrito Cedeño, estado Bolívar. Trabajo especial de grado.
- Bolívar J. (1995) Obtención de pre-concentrado de minerales de titanio, a partir de las arenas negras de la zona de Boquerones – Horeda - Gavilanes, del Distrito Cedeño, estado Bolívar. Trabajo especial de grado.
- Bustamante *et al* (2008) I.M Cemex Concentración de Minerales. Colombia, Universidad Nacional.
- Condoretty J. (2003) Obtención de concentrados de cromita a partir de los depósitos de peridotita ubicados en el Rodeo, Carirubana, estado Falcón. Trabajo especial de grado.
- Gupta A. y Yan D.S (2006) Mineral Processing Design and Operations. 1ra edición, editorial El Sevier, Holanda.
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2004). Análisis y diseño de experimentos, 2da ed. México, Mc Graw-Hill. 591 p.
- Jordão H., Sousa A. y Carvalho M. Optimization of wet shaking table process using response Surface methodology applied to the separation of copper and aluminum from the fine fraction of shredder ELVs. *El Sevier*, 48, 366-373.
- KELLY E. y SPOTTISWOOD D. (1990). Introducción al Procesamiento de Minerales. 1era Ed., Editorial Limusa S.A., México.
- López W. (2009) Aplicación de técnicas estadísticas a la flotación en columna para optimizar la recuperación de grafito proveniente del cerro Osumita, estado Cojedes. Trabajo especial de grado.

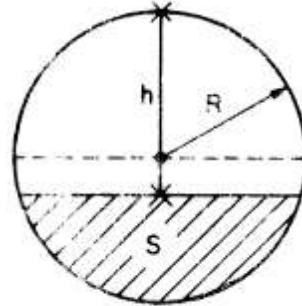
- N. Alan (2008) Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. *ScienceDirect*, 185, 80-86.
- N. Alan (2007) Modeling and optimization of Multi-Gravity Separator to produce celestite concentrate. *ScienceDirect*, 174, 127–133.
- Navarro L. (1999), Modificación: Fajardo L. (2011) *et al.* Practica 2 de Sedimentología. UCV, Caracas.
- Norma COVENIN-2224 (1984) Materiales Refractarios. Determinación de la Gravedad Especifica Real por inmersión en Agua.
- PELÁEZ, E. (1981). Preparación y Concentración de Minerales. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Caracas.
- PEÑA, J. (1981). Guía de Concentración por Corrientes Laminares. Facultad de Ingeniería. Caracas.
- R.O. Burt, Gravity Concentration Technology, Developments in Mineral Processing, volume 5, Elsevier, Amsterdam, 1984.
- TAGGART A. (1966). Elementos de Preparación de Minerales. 1era Ed. española, ediciones Interciencia, Madrid España.
- WILLS. (1987). Tecnología de Procesamiento de Minerales. 1era Ed., Editorial Limusa S.A., México.

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de Molienda del material.

Datos:

- $D_i = 0,195 \text{ m}$
- $R = 0,0975 \text{ m}$
- $D_{ext} = 0,215 \text{ m}$
- $L = 0,180 \text{ m}$
- $h = 0,100 \text{ m}$
- $p = 4650 \text{ kg/m}^3$



Volumen y peso de la carga moledora:

$$S = \frac{\pi \cdot R^2}{2} - 2 \cdot R \cdot (h - R)$$

$$S = 0,0144 \text{ m}^2$$

$$v = \frac{S \cdot L}{\pi \cdot R^2 \cdot L}$$

$$V = 0,482$$

Para calcular el peso de la carga moledora se utilizó una densidad de bola p

$$T = \pi \times R^2 \times L \times v \times p$$

Ecuación 4: Carga moledora de molino.

$$T = 12,04 \text{ kg}$$

Donde T son kilogramos, R y L el radio y longitud interna del molino en metros, v el porcentaje ocupado por la carga moledora y p la densidad de la carga moledora.

Anexo 2. Serie de Tamices ASTM.

Tabla 20: Serie de Tamices ASTM

Serie de tamices de Estados Unidos y equivalentes de Tyler (ASTM E-11-61)

Designación del tamiz		Abertura de la malla		Diámetro nominal del alambre		Designación equivalente de Tyler
Estándar	Alternativa	mm.	In (equiv. Aprox.)	mm	In (equiv. Aprox.)	
107.6mm	4.24in.	107.6	4.24	6.40	0.2520	
101.6mm	4 in. †	101.6	4.00	6.30	0.2480	
90.5mm	3 ½ in.	90.5	3.5	6.08	0.2394	
76.1mm	3in.	76.1	3.00	5.80	0.2283	
64.0mm	2 ½ in	64.0	2.50	5.50	0.2165	
53.8mm	2.12in.	53.8	2.12	5.15	0.2028	
50.8mm	2 in. †	50.8	2.00	5.05	0.1988	
45.3mm	1 ¾ in.	45.3	1.75	4.85	0.1909	
38.1mm	1 ½ in.	38.1	1.50	4.59	0.1807	
32.0mm	1 ¼ in.	32.0	1.25	4.23	0.1665	
26.9mm	1.06 in.	26.9	1.06	3.90	0.1535	1.050 in
25.4mm	1 in. †	25.4	1.00	3.80	0.1496	
22.6mm	7/8 in.	22.6	0.875	3.50	0.1378	0.883 in
19.0mm	¾ in.	19.0	0.750	3.30	0.1299	0.742 in
16.0mm	5/8 in.	16.0	0.625	3.00	0.1181	0.624 in
13.5mm	0.530 in.	13.5	0.530	2.75	0.1083	0.525 in
12.7mm	½ in. †	12.7	0.500	2.67	0.1051	
11.2mm	7/16 in.	11.2	0.438	2.45	0.0965	0.441 in
9.51mm	3/8 in.	9.51	0.375	2.27	0.0894	0.371 in
8.00mm	5/16 in.	8.00	0.312	2.07	0.0815	2 ½ malla
6.73mm	0.265 in.	6.73	0.265	1.87	0.0736	3 malla
6.35mm	¼ in. †	6.35	0.250	1.82	0.0717	
5.66mm	No. 3 ½	5.66	0.223	1.68	0.0661	3 ½ malla
4.76mm	No. 4	4.76	0.187	1.54	0.0606	4 malla
4.00mm	No. 5	4.00	0.157	1.37	0.0539	5 malla
3.36mm	No. 6	3.36	0.132	1.23	0.0484	6 malla
2.83mm	No. 7	2.83	0.111	1.10	0.0430	7 malla
2.38mm	No. 8	2.38	0.0937	1.00	0.0394	8 malla
2.00mm	No. 10	2.00	0.0787	0.900	0.0354	9 malla
1.68mm	No. 12	1.68	0.0661	0.810	0.0319	10 malla
1.41mm	No. 14	1.41	0.0555	0.725	0.0285	12 malla
1.19mm	No. 16	1.19	0.0469	0.650	0.0256	14 malla
1.00mm	No. 18	1.00	0.0394	0.580	0.0228	16 malla
841micras	No. 20	0.841	0.0331	0.510	0.0201	20 malla
707micras	No. 25	0.707	0.0278	0.450	0.0177	24 malla
595micras	No. 30	0.595	0.0234	0.390	0.0154	28 malla
500micras	No. 35	0.500	0.0197	0.340	0.0134	32 malla
420micras	No. 40	0.420	0.0165	0.290	0.0114	35 malla
354micras	No. 45	0.354	0.0139	0.247	0.0097	42 malla
297micras	No. 50	0.297	0.0117	0.215	0.0085	48 malla
250micras	No. 60	0.250	0.0098	0.180	0.0071	60 malla
210micras	No. 70	0.210	0.0083	0.152	0.0060	65 malla
177micras	No. 80	0.177	0.0070	0.131	0.0052	80 malla
149micras	No. 100	0.149	0.0059	0.110	0.0043	100 malla
125micras	No. 120	0.125	0.0049	0.091	0.0036	115 malla
105micras	No. 140	0.105	0.0041	0.076	0.0030	150 malla
88micras	No. 170	0.88	0.0035	0.064	0.0025	170 malla
74micras	No. 200	0.74	0.0029	0.053	0.0021	200 malla
63micras	No. 230	0.63	0.0025	0.044	0.0017	250 malla
53micras	No. 270	0.53	0.0021	0.037	0.0015	270 malla
44micras	No. 325	0.44	0.0017	0.030	0.0012	325 malla
37micras	No. 400	0.37	0.0015	0.025	0.0010	400 malla

Anexo 3. Cálculo del d50 y d80.

$$\log(Dx) = \log(d_i) + \frac{\log(d_{i+1}) - \log(d_i)}{p_{i+1} - p_i} (x - p_i)$$

Ecuación 5: Interpolación logarítmica, cálculo decil.

$$D_x = d_i \left(\frac{d_{(i+1)}}{d_i} \right)^{\left(\frac{x-p_i}{p_{(i+1)}-p_i} \right)}$$

Ecuación 6: Interpolación logarítmica despejado, cálculo decil.

Anexo 5. Cálculo de la gravedad específica.

$$GER = \frac{w - p}{(w_1 - p) - (w_2 - w)}$$

Ecuación 7: Gravedad específica.

Donde:

- ✓ GER = gravedad específica
- ✓ p = peso del picnómetro
- ✓ w = peso del picnómetro y la muestra, expresada en gr.
- ✓ w₁ = peso del picnómetro lleno de agua, expresado en gr.
- ✓ w₂ = peso del picnómetro, muestra y agua, expresado en gr.

Tabla 21: Densidad de agua como función de temperatura.

Temperatura (°C)	Densidad g/cm ³
15	0,999099
16	0,998943
17	0,998774
18	0,998595
19	0,998405
20	0,998203
21	0,997992
22	0,997770
23	0,997538
24	0,997296
25	0,997044
26	0,996783
27	0,996512
28	0,996232
29	0,995646
30	0,995646

Anexo 6: Datos completos de los ensayos realizados a la mezcla A y B

Tabla 22: Datos de los ensayos, Mezcla A

Masa en cada zona después del ensayo (liviano + pesado)				Masa del pesado ya separado (después del magnético)				
Masa C (g)	Masa M (g)	Masa L (g)	Total (g)	Pesado C (g)	Pesado M (g)	Pesado L (g)	Tenor C	Total Pesado (g)
73,10	806,60	108,80	988,50	26,30	23,30	0,40	35,98	50,00
39,60	522,20	416,00	977,80	12,40	30,80	6,80	31,31	50,00
259,30	191,20	527,60	978,10	36,50	12,00	1,20	14,08	49,70
511,00	407,30	67,10	985,40	48,70	0,90	0,20	9,53	49,80
12,50	640,90	327,00	980,40	5,60	41,00	3,10	44,80	49,70
305,70	467,20	215,20	988,10	49,40	0,60	0,00	16,16	50,00
65,70	624,40	301,60	991,70	34,80	12,10	3,10	52,97	50,00
25,00	649,50	312,70	987,20	15,60	30,00	4,00	62,40	49,60
176,60	618,00	180,00	974,60	30,00	18,30	0,50	16,99	48,80
60,00	694,60	228,60	983,20	12,40	36,10	1,30	20,67	49,80
53,60	730,00	196,40	980,00	19,50	28,80	0,80	36,38	49,10
104,60	186,50	700,80	991,90	39,20	8,00	2,50	37,48	49,70
163,70	635,20	184,60	983,50	40,00	9,20	0,40	24,43	49,60
45,80	216,90	727,80	990,50	21,60	24,50	3,40	47,16	49,50
62,70	675,70	244,20	982,60	31,20	16,30	2,20	49,76	49,70
980,80	13,60	1,20	995,60	50,00	0,00	0,00	5,10	50,00
141,20	123,40	717,30	981,90	42,80	5,70	0,30	30,31	48,80
49,10	481,00	460,00	990,10	9,70	25,90	12,50	19,76	48,10
119,40	764,20	92,00	975,60	31,30	18,10	0,00	26,21	49,40
615,20	220,00	98,20	933,40	50,00	0,00	0,00	8,13	50,00

Tabla 23: Datos de los ensayos, Mezcla B.

Masa en cada zona después del ensayo (liviano + pesado)				Masa del pesado ya separado (después del magnético)				
Masa C (g)	Masa M (g)	Masa L (g)	Total (g)	Pesado C (g)	Pesado M (g)	Pesado L (g)	Tenor C	Total Pesado (g)
352,10	553,60	80,00	985,70	48,00	1,00	0,50	13,63	49,50
175,70	473,00	334,70	983,40	41,50	6,00	1,50	23,62	49,00
152,00	549,00	291,70	992,70	21,50	27,00	1,40	14,14	49,90
65,70	624,40	301,60	991,70	42,70	4,50	2,30	64,99	49,50
224,30	62,90	699,50	986,70	26,30	3,10	17,00	11,73	46,40
426,50	501,00	60,00	987,50	50,00	0,00	0,00	11,72	50,00
298,00	589,50	88,70	976,20	48,20	1,30	0,00	16,17	49,50
10,50	595,00	345,00	950,50	9,70	35,70	3,30	92,38	48,70
152,00	722,30	114,50	988,80	40,80	9,00	0,20	26,84	50,00
64,50	763,30	160,00	987,80	17,60	31,20	1,10	27,29	49,90
908,70	48,70	31,00	988,40	50,00	0,00	0,00	5,50	50,00
86,40	732,50	173,60	992,50	37,20	12,80	0,00	43,06	50,00
55,60	394,90	530,00	980,50	40,00	1,20	8,80	71,94	50,00
260,00	268,50	458,20	986,70	46,40	3,50	0,40	17,85	50,30
855,70	82,50	47,90	986,10	49,70	0,20	0,10	5,81	50,00
62,60	577,00	350,80	990,40	30,00	19,20	0,80	47,92	50,00
255,20	624,00	109,30	988,50	45,50	4,30	0,00	17,83	49,80
590,00	361,20	29,60	980,80	49,80	0,10	0,00	8,44	49,90
94,00	774,50	127,00	995,50	44,20	5,30	0,50	47,02	50,00
69,00	801,40	120,70	991,10	40,00	9,40	0,20	57,97	49,60