



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE METALURGIA

“Evaluación de reactivos orgánicos para depresión de carbón en la flotación de galena y calcopirita.”

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA DE MINERALES**

PRESENTA:

I.S.P.I. José Luis Ricardo Aguilar Galván

ASESORADO POR:

Dr. Iván Alejandro Reyes Domínguez

CO-ASESORADO POR:

M.C. Ramón Alanís Orozco

SAN LUIS POTOSÍ S.L.P., OCTUBRE DEL 2020





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE METALURGIA

“Evaluación de reactivos orgánicos para depresión de carbón en la flotación de galena y calcopirita.”

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA DE MINERALES

PRESENTA:

I.S.P.I. José Luis Ricardo Aguilar Galván

SINODALES:

Dr. Iván Alejandro Reyes Domínguez

M.C. Ramón Alanís Orozco

M.C. María del Carmen Ojeda Escamilla

Dr. Roel Cruz Gaona



SAN LUIS POTOSÍ S.L.P., OCTUBRE DE 2020

“Evaluación de reactivos orgánicos para depresión de carbón en flotación de galena y calcopirita.”



FACULTAD DE INGENIERÍA

6 de agosto de 2020

**ING. JOSÉ LUIS RICARDO AGUILAR GALVÁN
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Iván Alejandro Reyes Domínguez** y el **M.C. Ramón Alanís Orozco**, Asesor y Co-asesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería de Minerales**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 6 de agosto del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Evaluación de reactivos orgánicos para depresión de carbón en la flotación de galena y calcopirita”

Resumen.

1. Introducción.
 2. Antecedentes sobre la problemática del carbón en la flotación y aplicación de agentes depresores orgánicos para su control.
 3. Metodología experimental de la depresión de carbón con agentes orgánicos y aplicación de DOE.
 4. Resultados y análisis.
- Conclusiones.
Referencias.
Apéndice.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

“1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería”



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área de Investigación y Estudios de Posgrado

Aclaración

El presente trabajo que lleva por título:

Evaluación de reactivos orgánicos para depresión de carbón en la flotación de galena y calcopirita.

se realizó en el periodo Enero de 2017 a Octubre de 2020 bajo la dirección del Dr. Iván Alejandro Reyes Domínguez.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este documento y asume la responsabilidad total del mismo.

Este documento no ha sido sometido como tesis a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento de Tesis para fines académicos.

Nombre y Firma del autor

José Luis Ricardo Aguilar Galván



El que suscribe José Luis Ricardo Aguilar Galván,
con domicilio en Calle Del Sendero #1
Colonia / fraccionamiento La Noria
C.P. 98615 Tel. 4926585143 Ciudad Guadalupe
Zacatecas y en mi carácter de autor y titular de la tesis que
lleva como nombre: Evaluación de reactivos orgánicos para depresión de carbón
en flotación de galena y calcopirita, en lo sucesivo "LA OBRA" y por
ende, cedo y autorizo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para que
lleve a cabo la divulgación, publicación, reproducción, así como la digitalización
de la obra, en formato electrónico y sin fines de lucro.

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se compromete a respetar
en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente.

San Luis Potosí, S.L.P., a 19 de Octubre de 20020.

Atentamente,


FIRMA
AUTOR

Agradecimientos

Primeramente, a Dios nuestro señor por permitirme la vida, tener y disfrutar de una familia, que me motiva, apoya en cada decisión o proyecto que he emprendido, por permitir cumplir un logro más que me permitirá ser un mejor profesionalista.

A mis padres Vicente Aguilar Ortiz que a pesar de que ya son varios años que ya no está entre nosotros sigues en mi mente, Ma. Del Socorro Galván Martínez que todo lo que soy de lo debo a ella, que fue la que siempre me impulso a crecer.

A mi familia Ricardo Aguilar de la Garza por ser el mejor hijo del mundo, eres mi razón de ser, Renata Aguilar de la Garza, al igual que tu hermano, formas parte de mi motivación diaria, Yadira de la Garza, por apoyarme en este reto que emprendí.

A Peñoles por apoyarme con la beca para continuar con mi preparación y muy especialmente al M.C. Ramón Alanís Orozco por tomarme en cuenta para cursar este posgrado, así como a mis compañeros de trabajo.

A mi asesor y sinodales Dr. Iván Alejandro Reyes Domínguez, Dr. Roel Cruz Gaona y M.C. María del Carmen Ojeda Escamilla, por sus recomendaciones y apoyo en el proceso de realizar este trabajo.

A los maestros del Instituto de Metalurgia Dr. Israel Rodríguez, Dra. María Isabel Lázaro, Dr. Antonio Aragón, Dr. José A. Delgadillo, Dr. Cristóbal A. Pérez, Dr. Gilberto Rosales y Dr. Javier Aguilar Carrillo. Por compartir sus conocimientos profesionales.

¡A todos los compañeros y amigos que me apoyaron, gracias!

Índice

Resumen	8
I. Introducción	10
II. Antecedentes sobre la problemática del carbón en la flotación y aplicación de agentes depresores orgánicos para su control.	12
2.1. El carbón	12
2.1.1. Componentes de la materia orgánica.	12
2.2. Efectos del carbón en el proceso de concentración	13
2.2.1. Comportamiento de los macerales de carbón en la flotación.	14
2.2.2. Efecto del rango pureza de carbón en la flotación.....	15
2.3. Hidrofobicidad	16
2.3.1. Sustancias naturalmente hidrofóbicas.	17
2.4. Mecanismo de depresión	18
2.4.1. Depresores	18
2.4.2. Efecto del pH en flotación	20
2.4.3. Depresores orgánicos.....	22
2.4.4. Adsorción de depresores orgánicos.	31
2.5. Consideraciones con los depresores orgánicos.	32
2.6. Efecto del tamaño de partícula en la depresión de carbón.	35
2.7. Investigación de agentes depresores de carbón.	36
2.8. Estudio de dextrina como reactivo depresor de carbón.	39
2.9. Hipótesis	40
2.10. Objetivo General	40
2.10.1. Objetivos específicos	40
2.11. Justificación	41
III. Metodología experimental de la depresión de carbón con agentes orgánicos y aplicación de DOE	42
3.1. Proceso de Preparación de muestra de mineral.	42
3.2. Pruebas metalúrgicas de flotación a escala laboratorio.	45
3.4. Análisis químico de los productos de pruebas metalúrgicas.	48
3.5. Diseño de un experimento con Minitab.	51
3.5.1 Minitab	52
3.5.2. Diseño factorial.	53

3.6. Balances metalúrgicos	53
3.7. Como se realizará el análisis e Interpretación de resultados	54
3.7.1. Analizar el diseño de experimento.....	54
3.7.2. Identificar efectos importantes.	54
3.7.3. Interpretación de gráficas de efectos.	54
3.7.4. Interpretación de las gráficas factoriales	55
3.7.5. Gráficas de interacción.....	56
3.7.6. Predicción de respuesta.....	56
4. Resultados y análisis	58
4.1. Documentación histórica de la presencia de carbón	58
4.2. Pruebas metalúrgicas.	59
4.2.1. Efecto depresor de Dextrina para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.....	59
4.2.2. Efecto del Diésel como depresor para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.....	62
4.2.3. Efecto del Naftaleno como depresor para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.....	63
4.3.4. Pruebas de evaluación de dextrina y Flottec D-160 con variación de adición y agentes colectores.	65
4.3.5. Evaluación de potencial hidrogeno y el tamaño de partícula en depresión de carbón.....	70
4.3.6. Evaluación del D-30 (Compuesto Azo), D-40 (Nigrosina), CMC, D-160 (Naftaleno), Dextrina y lignosulfonato.	75
4.3.6.1. Evaluación depresor D-30 (Compuesto Azo).	75
4.3.6.2. Evaluación del depresor D-40 (Nigrosina).	76
4.3.6.3. Evaluación del depresor CMC (Carboximetilcelulosa).....	77
4.3.6.4. Evaluación del depresor D-160 (Ácido Naftaleno Sulfónico de Sodio).	79
4.3.6.5. Evaluación del depresor Dextrina.....	80
4.3.6.6. Evaluación del depresor Lignosulfonato.	81
4.5. Resultados del diseño de experimentos	82
4.6. Evaluación de Depresores Orgánicos con graficas factoriales.	86
4.7. Colectores en la depresión de carbón.	92
4.8. Predicción de resultados.	93
Conclusiones.	96
Conclusiones.....	96

Recomendaciones.....	98
Apéndice	105
1. Como crear un diseño de experimento en minitab.....	105
1.2. Seleccionar diseño.	105

Lista de tablas

Tabla 1 Cambios químicos durante el car bonificación (De Jager, 2002)	12
Tabla 2 Lista de reactivos depresores orgánicos del grupo polímero.....	23
Tabla 3 Ensayes de concentrado de colas de las pruebas con depresores (Grupa, 2017).....	37
Tabla 4 Composición Mineralógica de mena Francisco I Madero.	42
Tabla 5 Condiciones estándar de prueba metalúrgica.	47
Tabla 7 Presencia de carbón en el mineral (Aguilar., 2016).....	58
Tabla 8 Resultados de evaluación de Dextrina.....	60
Tabla 9 Resultados de la evaluación de Diesel como depresor de carbón.....	62
Tabla 10 Resultados de la evaluación de Naftaleno D-160 como depresor de carbón.	63
Tabla 11 Resultados de la evaluación de Dextrina y colector Ap-3418.	65
Tabla 12 Resultados de la evaluación dextrina sin colector X-343.....	66
Tabla 13 Evaluación de la D-160 reduciendo colector Ap-3418.	67
Tabla 14 Evaluación de D-160 colectores Ap-2202 y Ap-3418.	68
Tabla 15 Evaluación de incremento D-160 con colectores específicos.	69
Tabla 16 Evaluación pH 6, F80 y D-160 en depresión de carbón.....	71
Tabla 17 Evaluación depresión de carbón a pH 10, F80 y D-160.....	72
Tabla 18 Evaluación depresión de carbón a pH 6, F80 y Dextrina.....	73
Tabla 19 Evaluación depresión de carbón a pH 10, F80 y Dextrina.....	74
Tabla 20 Evaluación D-30 Compuesto Azo como depresor de carbón.	75
Tabla 21 Evaluación depresor de carbón D-40 (Nigrosina).	77
Tabla 22 Evaluación de CMC como depresor de carbón.....	78
Tabla 23 Evaluación de Naftaleno D-160 como depresor de carbón.....	79
Tabla 24 Evaluación Dextrina como depresor de carbón.	80
Tabla 25 Evaluación de Lignosulfonato como depresor de carbón.	81

Lista de Figuras

Figura 1 Influencia del pH en la flotación de calcosita (Wark., 1934).	21
Figura 2 La competencia del colector vs depresor (Wark y Cox., 1934).	22
Figura 3 Estructura química del Glucógeno.	28
Figura 4 Estructura química de la Nigrosina.	30
Figura 5 Mecanismo de adsorción de dextrina en galena (Laskowski et. Al., 1993).	33
Figura 6 Efecto de pH en la adsorción de dextrina en calcopirita y galena (Liu y Laskowski 1989c).	33
Figura 7 Adsorción de dextrina en función de pH sobre superficie oxidada y sin (Cabrera-Tejada., 2007).	34
Figura 8 Flotabilidad de calcopirita oxidada en función de la conc. de dextrina (Cabrera-Tejada., 2007).	34
Figura 9 Adsorción de dextrina en función de su concentración a pH 8 con Xantato (Celedon., 1997).	35
Figura 10 Pruebas de flotación con diferentes depresores de grafito (Gupta., 2017).	38
Figura 11 Molécula química de la dextrina.	39
Figura 12 Cortador de muestra de banda transportadora (UNC).	43
Figura 13 Quebradoras de quijada y Moy Crusher.	44
Figura 14 Reducción de muestra por la técnica de cono y cuarteo.	45
Figura 15 Prueba metalúrgica de flotación a nivel laboratorio.	46
Figura 16 Espectrofotómetro Perkin – Elmer ICP-OES modelo 8300.	49
Figura 17 Determinación de plomo -cobre por método tradicional volumétrico.	50
Figura 18 LecoCell II para determinación de carbón.	51
Figura 19 Diagrama de bloque de proceso a estudiar.	52
Figura 20 Diagrama de flujo experimentación.	57
Figura 21 Diagrama de Pareto de efecto estandarizados carbón.	83
Figura 22 Gráfica normal de efectos estandarizados carbón.	83
Figura 23 Gráfica de efectos normales (absolutos) estandarizados de carbón.	84
Figura 24 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Recuperación de carbón).	84
Figura 25 Gráfica normal de efectos estandarizados (Recuperación de carbón).	85
Figura 26 Gráfica de efectos normales (absolutos) estandarizados (Recuperación de carbón).	85
Figura 27 Gráfica de efectos principales para % depresión del carbón.	87
Figura 28 Gráfica de interacción para % depresión de carbón.	88
Figura 29 Gráfica de cubos (medias ajustadas) de % depresión de carbón.	89
Figura 30 Gráfica de contorno de la interacción F80 y D-160 en la depresión de carbón.	90
Figura 31 Gráfica de contornos de la interacción de pH y D-160 en la depresión de carbón.	91
Figura 32 Gráfica de contorno de la interacción D-160 y Ap-3418 en la depresión de carbón.	92
Figura 33 Gráfica de efectos principales de los colectores en la depresión de carbón.	93
Figura 34 Gráfica de predicción de condiciones optimizadas.	94
Figura 35 Gráfica de optimización de control de carbón.	95
Figura 36 Caratula para crear un diseño factorial (Minitab 17).	106
Figura 37 Caratula de tipos de factoriales disponibles (Minitab 17).	106
Figura 38 Pantalla para renombrar los factores (Minitab 17).	107
Figura 39 Pantalla para establecer los colores de nivel de los factores (Minitab 17).	108
Figura 40 Tabla resumen y series a desarrollar en el DOE (Minitab 17).	108

Nomenclatura

✓ **Abreviaturas mineralógicas**

C org = carbón orgánico

C total = Carbón total

Cp = calcopirita (CuFeS_2)

GNS = ganga no sulfurosa

Gn = galena (PbS)

Sp = esfalerita (ZnS)

Py = pirita (FeS_2)

✓ **Abreviatura de técnicas de caracterización mineralógica**

EDX = electrones restrodispersados

MEB = Microscopía Electrónica de Barrido

FTIR = Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

XPS = Espectroscopia de foto electrones emitidos por rayos X

✓ **Abreviatura de Operación**

Atm = Se define como presión atmosférica a la presión que ejerce la atmósfera sobre la tierra.

CMC = Carboximetilcelulosa

D-30 = Compuesto Azo

D-40 = Nigrosina

D-160 = Ácido naftaleno sulfónico

Dx = dextrina

-COOH = Ácido carboxílico

F80 = Abertura por la que pasa el 80 % del material de alimentación a un equipo

-OH = Hidroxilo

K80 = Abertura por la que pasa el 80 % de una muestra de un material granulado.

P80 = Abertura por la que pasa el 80% del material producto de un equipo

X = Xantato

Resumen

El uso de reactivos orgánicos como depresores en la flotación de sulfuros, ha tomado gran relevancia por ser considerados amigables con la naturaleza, ya que en su mayoría son biodegradables; menor riesgo para la salud, esto en comparación con los reactivos inorgánicos que se usan normalmente, como son los dicromatos, cianuros, entre otros.

El uso de depresores orgánicos para la depresión de carbón en la flotación de metales bases representa una alternativa. Por su alto peso molecular, gran número de grupos polares que se caracterizan por ser muy hidrofílicos y de bajo costo.

De acuerdo con los resultados del estudio, donde se buscó la depresión del carbón en la flotación, así como minimizar su impacto en los resultados metalúrgicos de las especies mineralógicas de los elementos plata, plomo y cobre; partiendo de pruebas sin adición de un depresor se identificó que por efectos físicos se logra una depresión del carbón. Esto debido sus propiedades macéreas y al proceso de molienda donde se presentan alteraciones en la superficie de las partículas de carbón por la fractura.

Con relación al P80 identificamos que los tamaños de partículas alrededor de 70 micrones favorecen la depresión de carbón, presentando un efecto hidrofílico en las pruebas, que se pudo identificar en el análisis realizado en el diseño de experimentos.

Con relación al pH se pudo identificar que a niveles bajos (ácidos) favorece la depresión del carbón.

Los diferentes agentes depresores orgánicos mostraron diferentes aportaciones adicionales en lo que respecta a la depresión de carbón, los cuales mostraron un comportamiento en función de su nivel de adición oscilando desde 5 hasta un 20%, que, acumulando con el logrado por el efecto de remolienda natural, se logra tener una depresión hasta del 98% del carbón.

Pudiendo resumir la respuesta de los elementos de interés económico, presentando un 98% resultado positivo, al incrementar sus leyes en el proceso de control de carbón por el mecanismo de depresión.

La recuperación ostento mayor sensibilidad al proceso de depresión del carbón, donde se obtuvieron resultados inferiores a la prueba de referencia, la plata con un 71%, el cobre 62% y el plomo 43% de superar los resultados de la prueba sin depresor.

Con relación a la efectividad de los depresores orgánicos, el Naftaleno D-160 exhibo resultados significativos para el carbón, seguido de la dextrina, compuestos azo y la nigrosina; en el caso lignosulfonato su efectividad fue menor, el que no mostró efecto depresor en este estudio fue CMC consistente, ya que al incrementar su adición disminuye la depresión.

I. Introducción

Desde tiempos remotos existe una interrelación estrecha entre la humanidad y los minerales. Los elementos que integran dichas sustancias han estado ligados en muchos aspectos al desarrollo de la civilización, siempre buscando bienestar y mejor calidad de vida; a partir de ellos, a través de un proceso de transformación se obtiene productos que son de uso común por la sociedad.

La industria del beneficio de minerales, junto con sus profesionales, están inmersos en un entorno operativo donde la constante es el cambio, que los impulsa a tomar acciones para asegurar el futuro, desarrollando tecnología, estructurando procesos, sin perder de vista los aspectos de seguridad; social y medioambiental que la sociedad demanda.

El procesamiento de minerales es la etapa de concentración en las operaciones mineras, que determina la capacidad de producción, calidad del producto y recuperación de especies de interés económico para el negocio. Es importante partir de una buena evaluación integral del mineral, que incluya análisis de proceso y modelamiento para asegurar un excelente resultado del proyecto, siempre tratando de maximizar el valor del mineral.

Es importante considerar que dentro de la mena están presentes otras especies que pueden complicar su beneficio, como la ganga no sulfurosa donde se identifica la presencia de carbón, que es el caso del presente estudio.

La materia orgánica (carbón) presente en algunos minerales se caracteriza por su alto grado de hidrofobicidad, la cual es considerada como una impureza nociva, en el proceso de concentración de especies minerales como la galena y calcopirita.

Varios autores mencionan que la presencia de lutitas y pizarras, son fuente de material carbonoso y se ha comprobado que tiene un efecto negativo en la flotación de minerales polimetálicos, afectando la recuperación de las especies de interés y la calidad de los concentrados.

El incremento del contenido de carbón en los concentrados de flotación en los últimos años se han incrementado, por la presencia de este en los yacimientos.

II. Antecedentes sobre la problemática del carbón en la flotación y aplicación de agentes depresores orgánicos para su control.

2.1. El carbón

El carbón es una roca sedimentaria, orgánica y combustible que se formó por la acumulación de mezcla heterogénea de restos alterados de la vegetación prehistórica acumulados en pantanos, ciénagas.

Está compuesto químicamente por oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre y materia mineral que con los movimientos tectónicos fueron enterrados y sometidos a altas temperaturas y presiones que provocaron cambios físicos y químicos con origen en procesos biológicos y geológicos, transformándola en turba y luego en carbón (grafito).

Los principales cambios desde turba a grafito son listados en la [tabla 1](#).

Tabla 1 Cambios químicos durante el car bonificación (De Jager, 2002)

Rango	% Carbón	% Hidrógeno	% Oxígeno	% Nitrogeno
Madera	50	6	43	0.5
Turba	59	5	33	2.5
Lignito	70	5.5	23	1
Bituminoso	82	5	10	2
Antracita	93	3	2.5	1
Grafito	100	0	0	0

2.1.1. Componentes de la materia orgánica.

Los macérales son los componentes orgánicos que constituyen el carbón, similar a los minerales que forman las rocas inorgánicas, con marcadas diferencias, los macérales no cuentan con una composición definida y estructura cristalina, pero reconocibles con el microscopio petrográfico con luz reflejada, por sus características de forma, color reflectancia, dureza y relieve de pulido, se utilizan para referirse a los componentes del carbón que se separaban por maceración.

Los macérales representan restos de plantas que constituyen algún tipo de estructura preservada y otros son productos de la degradación que están tan alterados que no se puede reconocer su procedencia concreta de las plantas.

Los macérales son clasificados en tres grupos: vitrinita, exinita (liptinita) e inertinita, la exinita por su origen similar, o diferencias en preservación vitrinita y inertinita, así como sus propiedades físicas, químicas y propiedades ópticas de los macérales tales como composición elemental, humedad, dureza, propiedades petrográficas que difieren durante el transcurso del contenido en densidad y características que cambian por el proceso de carbonificación.

Sus características son color gris claro a blanco amarillento, más clara que la vitrinita y mayor reflectancia con mayor contenido de carbono, no es fluorescentes con relieve de pulido debido a su dureza, (Piñeres y col., 2009).

Acorde a sus propiedades ópticas de los macérales, los cuales se caracterizan por tener diferencias en su composición química y propiedades físicas. Estas propiedades fisicoquímicas hacen que los grupos macérales se comporten de manera distinta en los procesos químicos y que se puedan utilizar de manera selectiva, (Denisse, 2011).

Tener el conocimiento sobre la presencia de estos grupos macérales en el carbón alimentado a un proceso, ofrece una ventaja en cuanto a la eficiencia de este. Para esto es necesario desarrollar métodos efectivos para la separación tomando en cuenta sus componentes petrográficos y de este modo, utilizarlos de acuerdo con sus comportamientos.

Los macérales no se producen de forma aislada, pero se forman en asociaciones en varias proporciones y con cantidades variables de materia mineral que dan lugar a las bandas características o capas de cada carbón. Estas asociaciones se les conocen como litotipos y microlitotipos. Los litotipos se reconocen macroscópicamente, mientras los microlitotipos son identificados mediante un microscopio.

2.2. Efectos del carbón en el proceso de concentración

El carbón orgánico desempeña un rol perjudicial en varios procesos metalúrgicos. En el método de concentración por flotación conduce a un mayor consumo de reactivo, altera condiciones de espuma, afecta la cinética de flotación de los sulfuros y crea dilución en la calidad del concentrado final de plomo-cobre, (Smith., 2008).

Para el control de carbón orgánico históricamente se han usado varios métodos para mitigar el impacto negativo como es el uso de concentración gravimétrica, depresión química, preflotación, cloración, oxidación por presión, oxidación biológica, cegador orgánico entre otros.

A pesar de que se han desarrollado diferentes modelos cinéticos de flotación de materia orgánica, se identifica que existe un vacío científico en estudios para evaluar constantes cinéticas de flotación de macérales de carbón.

2.2.1. Comportamiento de los macérales de carbón en la flotación.

Las partículas de carbón que varían de tamaño y composición petrográfica se comportan de manera diferente en el proceso de flotación, las partículas brillantes finas dominan en los primeros tiempos de flotación y sólo con el tiempo y la condición de haber agotado las partículas finas las gruesas, incluidas las no liberadas comienzan a flotar. Esto nos indica que los componentes petrográficos brillantes (vitrinita) son más hidrófobos y flotan mejor que los del grupo maceral exinita, esto indica una respuesta diferente de los componentes petrográficos a la flotación.

La flotación de los macérales se considera un asunto complicado porque por un lado estos grupos de carbón difieren en su composición química y propiedades, pero con el aumento de rango se vuelven químicamente similares y se convierten en menos distintos petrográficamente. De acuerdo con estas conclusiones Aplan, (1989) encontraron que la hidrofobicidad de los macérales de carbón siguen el siguiente patrón exinita > vitrinita > inertinita.

Bujnowska, (1985) Evaluó las propiedades de flotación de diferentes componentes petrográficos separados de un carbón su bituminoso que no flotaba en absoluto sin reactivos de flotación.

La flotación es posible con la adición de algunos reactivos heteropolares, como alcohol de la di cetona, en estas condiciones la inertinita fue la que mejor flotó, pero es afectada por la inmersión prolongada en el agua, en seguida la vitrinita que no presenta efectos por inmersión en el agua y por último exinita. Estos efectos probablemente explica las diferencias observadas por algunos investigadores.

[Klassen, \(1963\)](#) comento que como resultado de la alta porosidad de la inertinita esta se vuelve más hidrófila en el agua por tal motivo no flota, pero en el caso de estar oxidada mejora su cinética de flotación, por arriba de la vitrinita esto por su mayor resistencia a la oxidación, también señala la mejor flotación de componentes petrográficos de la vitrinita resultan de la adsorción orientada a moléculas heteropolares en su superficie.

En conclusión, el comportamiento de los macerales de carbón en la flotación se complica aún más por la presencia de los sulfuros. Queda demostrado que las propiedades de flotación de la composición petrográfica de las partículas de carbón solo pueden ser estudiadas sin oxidar y en muestras de bajo contenido de cenizas. Para muestras de más de 15 % de ceniza, las propiedades superficiales fueron determinadas predominantemente por la materia mineral.

2.2.2. Efecto del rango pureza de carbón en la flotación.

Los carbones bituminosos son más hidrófobos, esto en base a pruebas de flotación realizadas en condiciones estandarizadas con diferentes carbones, ([Shebanov, 1961](#)).

[Smith y col, \(1951\)](#) concluyeron que para obtener recuperaciones similares sin que afectar el rango de carbón, para antracitas y lignitos se requiere la adición de una mayor cantidad de reactivos, que para los carbones bituminosos. [Brown, \(1962\)](#) presenta los resultados en los que la cantidad necesaria para la flotación se correlaciona con el contenido de carbono del carbón, donde los carbones bituminosos de media y baja volatilidad flotan mejor.

Una publicación más reciente [Aplan y col., \(1993\)](#), demuestra que el MIBC por si solo es suficiente para flotar los carbones bituminosos muy hidrofóbicos, para carbones de rango inferior se necesita una combinación de MIBC como espumante y un petróleo como colector, observando una relación semilogarítmica entre el colector y el contenido de carbono en el carbón.

2.3. Hidrofobicidad

La hidrofobicidad es la capacidad que tiene un material de repeler el agua de su superficie, mientras que la hidroflicidad es la propiedad de atraer el agua. Esta propiedad normalmente se puede medir colocando una gota de agua sobre la superficie del material que se quiere medir, observamos el ángulo de contacto que forma la gota con la superficie. Si la gota presenta un ángulo mayor de 90° , una gota esférica el material tiene un comportamiento hidrófobo. Pero si la gota tiene un ángulo menor de 90° , una gota muy plana esparcida en superficie, el material es hidrófilo.

Es posible modificar la hidrofobicidad de los materiales mediante la interacción con un agente químico (ácido, base, sales o compuestos) que son agregados al sistema de flotación. Los compuestos que modifican la hidrofobicidad y por tanto la flotabilidad en los minerales se clasifican en cuatro grupos: colectores, reactivos de hidrofobización, electrolitos y modificadores (activadores, depresores y espumantes). Cada grupo se caracteriza por tener diferentes efectos en la hidrofobicidad.

Los colectores aumentan la hidrofobicidad de la superficie y el ángulo de contacto a través de un proceso de disminución de energía superficial de los minerales que se pretenden separar de la fase acuosa, volviéndolos hidrofóbicos., " γ_{sg} " Dicho fenómeno fue probado experimentalmente por [Smolders \(1961\)](#).

La función de los colectores es cambiar la interacción gas-sólido, en su caso los espumantes agua-gas y los modificadores (reactivos de pH y sales) las interfaces de agua-sólido.

La hidrofobicidad es regulada debido a que las energías de las tres interfaces disminuyen por la presencia de un colector en el entorno. De acuerdo con la ecuación Young cuando se registra una mayor caída de la energía de la interfase gas-sólido, esta condición promueve el aumento de la hidrofobicidad, su interpretación en términos operacionales es el incremento de la flotabilidad de las partículas.

De acuerdo con lo anterior es posible deducir que las sustancias que modifican la hidrofobicidad de las partículas son los colectores, ya que tiene la propiedad de poder aumentar el ángulo de contacto hasta niveles de 110° .

De acuerdo a los estudios realizados por [Fuerstenau, \(1988\)](#) donde aplica al método de concentración por flotación que también fue investigado una década más tarde por [Sablik, \(1998\)](#), concluyeron que la tensión superficial de humectación o tensión superficial crítica (γ_c), es un parámetro para comparar en las evaluaciones de las propiedades en la flotación de diferentes sustancias.

Enfatizando que γ_c no es equivalente a la energía superficial según la ecuación de Young, que asume que la superficie es perfectamente plana, y en muchos casos la rugosidad de la superficie y las impurezas causan una desviación en el ángulo de contacto en equilibrio ([Sherfrin, 1960](#)).

2.3.1. Sustancias naturalmente hidrofóbicas.

El azufre, talco, grafito y algunos sulfuros tienen una estructura cristalina muy específica que les permite ser naturalmente hidrofóbicos, esto por la formación de planos mutuamente conectados por fuerzas Van Der Waals. En las etapas de trituración y molienda se fraccionan las partículas principalmente a lo largo de estos planos donde las superficies son naturalmente hidrofóbicas. Los planos hidrofóbicos adsorben fácilmente diferentes reactivos en especial los no iónicos, que le aporta la capacidad de flotar con una variedad de colectores.

Otros suelen ser hidrofílicos porque tiene enlaces químicos rotos, esta condición permite que estas partículas adsorban fácilmente grupos hidroxilo altamente hidrófilos. Esta es la causa por las que en sustancias naturalmente hidrofóbicas al molerse se forman también planos hidrófilos.

En investigaciones realizadas se ha demostrado que el talco, (Micot, 1994), grafito, (Chander,1975), y carbón, (Drzymala,1999) conocidas como sustancias naturalmente hidrofóbicas, pueden ser ligeramente hidrófobas o completamente hidrofílicas, por efecto de molienda, donde las partículas adsorben componentes del aire tales como N₂, CO₂ y otros contaminantes en su superficie. Estos minerales se vuelven hidrofílicos cuando se elimina de su superficie la contaminación. La hidrofilización de sustancias naturalmente hidrofóbicas también pueden tener lugar como resultado de la adsorción de oxígeno.

La flotación ineficaz de materiales naturalmente hidrofóbicos se debe a la presencia de planos hidrofílicos, oxidación e hidroxilación. Para eso se usan los espumantes o colectores que le proporcionan las propiedades para flotar.

Todos los carbones presentan en principio un carácter hidrófobo, que puede ser disminuido por la adición de ciertos grupos superficiales, lo que puede conseguirse por oxidación con algún tipo de agente oxidante que crea grupos oxigenados, dando lugar a la adsorción de moléculas de agua, que a su vez adsorberán nuevas moléculas por la formación de puentes de hidrógeno; de esta forma se incrementa el carácter hidrófilo, que resulta beneficioso para la adsorción de compuestos en fase acuosa (Smisek, 1970)

2.4. Mecanismo de depresión

2.4.1. Depresores

Los depresores, cuando se adsorben sobre la superficie del mineral, encierran la superficie, no permitiendo que las partículas puedan ser hidrofóbicas, es decir hacer que la adsorción de un colector no sea posible. Cuando un colector ya está presente en la superficie, el depresor causa su desorción. La actividad de los depresores

depende de sus propiedades y reactividad (interacción de la superficie del mineral con fluidos) del material a flotar. En general, los resultados de la depresión es una competencia entre el depresor y los iones colectores para ocupar un lugar en la superficie de partículas flotantes.

La adsorción es un fenómeno dinámico que está contrarrestado por la desorción. El equilibrio adsorción-desorción se establece entre la interfase y la o las fases líquidas, pero típicamente está muy desplazado hacia la adsorción en la interfase donde el surfactante posee una energía libre menor. En consecuencia, se llega muy rápidamente a una saturación de todo el espacio disponible a la interfase, lo que resulta en lo que se llama una monocapa.

Los iones del depresor forman compuestos superficiales o pasan a la red cristalina por intercambio iónico y con esto impiden la adherencia del colector e incrementan la hidratación de la superficie mineral y aíslan la superficie del mineral de los iones del colector.

El mecanismo de acción de los depresores se describe por el uso de reacciones de intercambio. Tal descripción, no es simple, ya que la química de las reacciones superficiales no es bien conocida, se identifica la falta de una teoría completa de la doble capa eléctrica y la relación exacta entre la carga superficial y el potencial de superficie.

Este efecto se puede lograr con la adición en la pulpa de un ion que competirá con el ion colector por la superficie del mineral, recomendando que, si el colector es aniónico, el depresor también deberá ser igual.

El depresor más simple que compite con el colector por los lugares en la superficie de las partículas son iones hidrógeno (H^+). Los iones de hidrógeno regulan simultáneamente la acidez de las soluciones, mientras que la cal, el carbonato de sodio y la soda cáustica (NaOH) regulan la alcalinidad en flotación. Los resultados en la flotación que involucran reguladores de pH generalmente se presentan como recuperación versus curvas de pH.

2.4.2. Efecto del pH en flotación

El pH de la pulpa juega un papel muy importante en la flotación. La superficie, las características y el comportamiento de los minerales dependen del pH en la fase líquida, que a su vez regula la adsorción de todo tipo de reactivos, en la superficie mineral. No hay un pH específico para la flotación de una entidad mineral en particular, pero dependen de la naturaleza de los reactivos y en la mayoría de los casos hay un rango de pH donde los reactivos presentan los mejores resultados para el mineral en cuestión en particular.

[Stonestreet y col., \(1989\)](#), demostraron que el pH tiene efecto en la depresión de carbón, esto debido al hecho de que la adsorción de los colectores depende del pH. [Pawlik y col., \(2003\)](#) en su investigación mostraron que el pH no desempeña ningún papel en la adsorción de carbón bituminoso, pero en contraste con eso, la adsorción de un dispersante en el carbón oxidado disminuye al aumentar el pH y alcanza un máximo en pH normal. Con esto demuestra que la flotación de carbón bituminoso es independiente de pH.

Como ejemplo en la [figura 1](#) muestra la influencia del pH en la flotación de calcocita y se puede concluir de la figura que la depresión en la flotación se lleva a cabo con bajos y altos valores de pH.

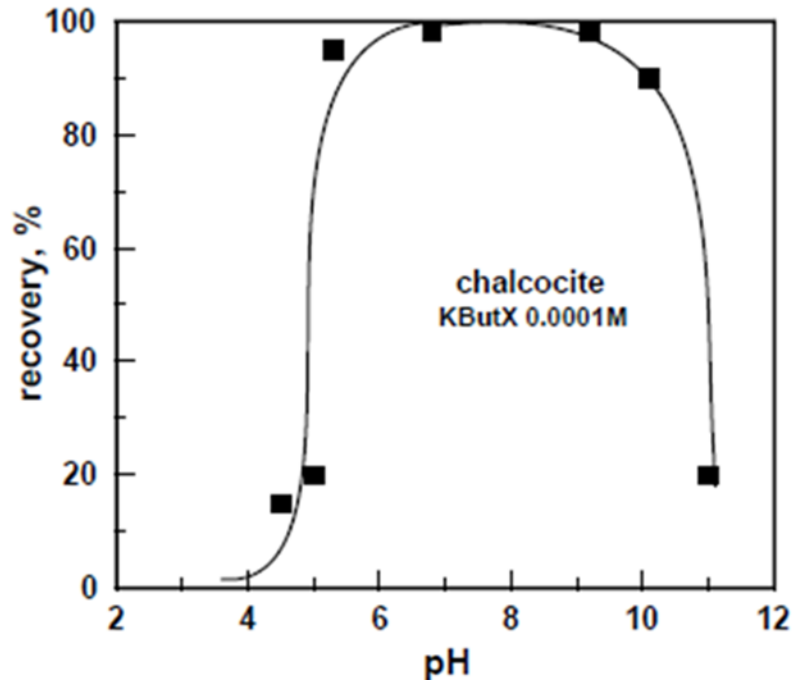


Figura 1 Influencia del pH en la flotación de calcocita (Wark., 1934).

Un sistema en particular de colector-depresor en minerales que presenta una disminución en la flotación deberá de existir una relación constante entre la concentración del colector y depresor. Significa que, si la concentración del colector aumenta en la solución, para obtener la depresión de flotación debemos agregar más depresor y que la relación estequiométrica de C a D es igual a 1. Cualitativamente, esta relación es válida para muchos sistemas depresores-colectores. Por ejemplo, la Figura 2 muestra líneas de flotación - sin transición de flotación para sulfuros en presencia de ditiofosfato a diferentes valores de pH.

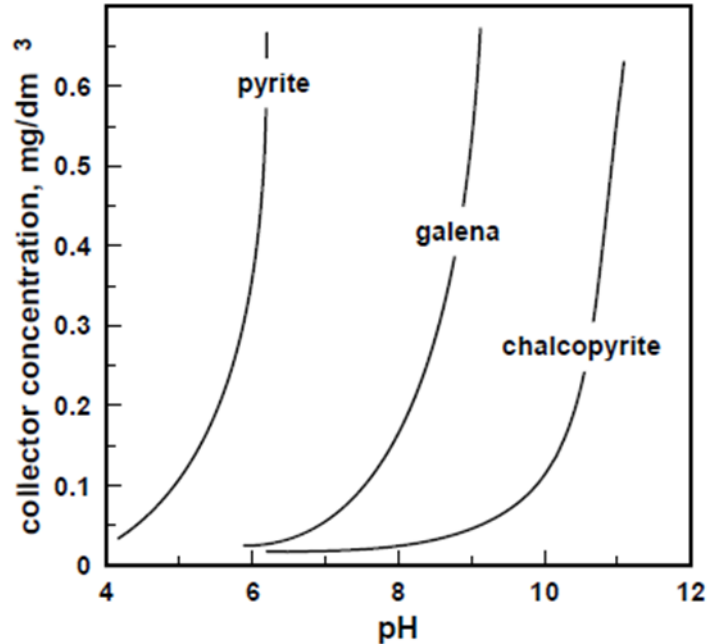


Figura 2 La competencia del colector vs depresor (Wark y Cox., 1934).

2.4.3. Depresores orgánicos.

En esta clasificación se incluyen los depresores orgánicos. Estos se pueden clasificar en dos grupos, los polímeros orgánicos y los ácidos orgánicos, donde el primer grupo es el mayoritario y se caracteriza por moléculas que contienen un gran número de grupos con una fuerte afinidad por el agua (OH, COOH, CO, COH, NH₂, SO₃H entre otros) (Sarquís, 2012).

Los depresores orgánicos pueden cambiar su carácter de aniónico a catiónico cuando reciben tratamiento previo a su utilización. Los almidones modificados pueden tener un carácter no-iónico o catiónico, el quebracho al ser tratado con aminas se convierte en anfotérico.

El mecanismo de interacción de estos con la superficie de los minerales depende del carácter de los grupos funcionales, lo que condiciona la fuerza de adsorción. Los grupos funcionales no-iónicos son: (-OH), (=CO) y (=NH) (Denisse, 2011); los aniónicos pueden ser (-COOH, (-SO₃H) y (-OSO₃H) y los catiónicos (-NH₂) y (=NH). Presentando variación en la afinidad con los distintos minerales y condiciones del medio, siendo menos específicos que los depresores inorgánicos, los depresores

orgánicos son particulares para cada aplicación. La diferencia de carácter de estos reactivos cumple con diversas funciones, que permite ser usados como dispersantes, coagulantes o depresores.

Con relación a la composición química de los depresores orgánicos, en su mayoría no están formados por un compuesto bien definido, están integrados por una mezcla de compuestos y su formulación es por lo general variable (Iwasaki y Choi, 1969). Al comparar los depresores orgánicos con la función de los colectores y modificadores inorgánicos, los polímeros tienen una química más compleja y por tal motivo su mecanismo de interacción no está bien entendido. A continuación, en la [tabla 2](#), se anexa una lista de reactivos depresores orgánicos del grupo de los polímeros.

Tabla 2 Lista de reactivos depresores orgánicos del grupo polímero.

Grupo	Polímero activo	Grupo polar
No iónicos	Almidones Dextrina Goma arábica Taninos Oxigelulosa Alcohol polivinílico	-OH, =CO
Catiónicos	Aminas polivinílicas Poli aminas Ácidos amínicos	-NH ₂ , =NH
Aniónicos	Carboxil metil celulosa Gomas celulósicas Gomas guar	-COOH -OSO ₃ H

	Poliacrilatos Lignin sulfonatos	
Anfotéricos	Colas (pegamentos) animales Quebrachos amínicos	Grupos catiónicos + aniónicos

Estos polímeros se clasifican en tres grupos, éter poli glicoles, polisacáridos y los polifenoles (Vargas, 2017).

1. Los éteres poli glicoles, tiene la misma estructura que los espumantes, con la diferencia del tipo de radical R y el número de grupos de óxidos de etileno n. Por medio de la manipulación de las moléculas, con R y n puede controlarse las características hidrofóbicas o hidrofílicas de la molécula.

Los poli glicoles son una familia de resinas poli éter que se producen a partir de la agrupación química entre sí de varios óxidos. Los materiales pueden ir de líquidos a plásticos resinosos, semejantes al polietileno en apariencia y en propiedades a granel. Los poli éteres tienen muchos usos debido a su solubilidad en agua y en varios disolventes.

2. Los polisacáridos son polímeros condensados de alto peso molecular que están basados en unidades de azúcares. Los que se usan en la flotación son los almidones, la dextrina, las gomas guar, el tanino y la carboxil metil celulosa (CMC), donde la mayoría son de origen natural, mientras que la CMC se obtiene de un proceso industrial. Estas biomoléculas que se encuentran entre los glúcidos y están formadas por la unión de una gran cantidad de monosacáridos y cumplen funciones diversas. Los polisacáridos son cadenas, ramificadas o no, de más de diez monosacáridos.

La carboximetilcelulosa (CMC) es un polisacárido biodegradable, que potencialmente puede reemplazar a los depresores peligrosos de uso frecuente.

Sin embargo, la falta de comprensión del mecanismo de interacción entre el CMC y los minerales ha dificultado su aplicación (Xuemin y col., 2018).

La adsorción de CMC se ve favorecida por la potencial zeta positivo pero obstaculizado por la protonación de los grupos carboxilo. Un estudio electroquímico mostró que la CMC redujo en gran medida la producción de sustancias hidrofóbicas. (Xuemin y col., 2018).

Muchos estudios han considerado la viabilidad de polisacáridos como un depresor. La carboximetilcelulosa (CMC), un polisacárido natural que se usa ampliamente como depresor de talco y aditivo alimentario (Khraisheh y col., 2005; Beaussart, y col., 2010), podría ser adecuado para este propósito. Se sabe que CMC inhibe la calcopirita bajo ciertas condiciones (Chen y Col., 2018; López-Valdivieso y Col., 2017). Sin embargo, el mecanismo de interacción entre CMC y la superficie de calcopirita rara vez se ha investigado.

Existen muchos trabajos donde concluyen que la interacción o la acción depresora es atribuida a uniones de los grupos hidroxilos de los reactivos con cationes en la superficie de los minerales. En diferentes estudios no fue posible precisar la existencia de otras reacciones que se puedan relacionar, además de este mecanismo.

Con relación a las reacciones superficiales se señala la existencia de uniones de tipo puente de hidrógeno (Bakinov,1964; Balajee & Iwasaki, 1969; Weissenborn, 1993; Somasundaran, 1969), propusieron también la existencia de otro mecanismo como la complejación, que fue identificada en reacciones entre el almidón y los cationes sobre la superficie de la calcita y de la hematita.

La ausencia de un conocimiento sobre el mecanismo de interacción entre los depresores orgánicos y las superficies de las especies minerales, encauso estudios de las reacciones que se producen entre la dextrina y algunas sales metálicas en solución. Encontrando reacciones entre la dextrina y los cationes metálicos son dependientes del pH dentro del rango de 7 a 11, después de este la adsorción decrece, lo que se puede relacionar con el aumento de carga negativa de las partículas y la repulsión electrostática con las micelas de

reactivos. Lo anterior se pudo evidenciar a través de determinaciones electrocinéticas donde los valores de movilidad de las partículas deprimidas disminuyen en forma proporcional a la adsorción de los polisacáridos. Afirmando que la interacción que se produce entre la dextrina y las especies metálicas es mediante la forma de hidróxido superficial (Brown, 1937; Laskowki & Liu, 1999; Iwasaki & Lai, 1965; Schulz, 2001).

De acuerdo con lo anterior se afirma que las interacciones entre los polisacáridos y los minerales, en particular los sulfuros, son dependientes del pH del medio; para la adsorción de los polisacáridos sobre minerales hidrofóbicos como el grafito y talco. (Nyamekye & Laskowski, 1991; Rath & Subramanian, 1997).

Como resultado del conjunto de pruebas de evaluación del agente Naftaleno Flottec (D-160). El ácido naftaleno-1-sulfónico es un compuesto orgánico con la fórmula $C_{10}H_7SO_3H$, ya que (Pawlik & Laskowski, 2003; Pawlik, 1997; Pawlik, 2002; Liu, 1988) mostraron que la depresión del carbón ocurrió cuando los valores potenciales de zeta se volvieron más negativos en presencia de ácido húmico.

Yang y col., (2019) estudió la estructura química de la superficie, las propiedades eléctricas de la superficie y la humectabilidad de la superficie de carbón mediante espectroscopía infrarroja, electroforesis y experimentos de penetración directa. Los resultados mostraron que la humectabilidad de una solución tensioactiva para el carbón dependía no solo de la tensión superficial gas-líquido de la solución sino también de la tensión interfacial sólido-líquido entre la solución y el carbón.

La tensión interfacial entre la solución y el polvo de carbón estaba estrechamente relacionada con la hidrofobicidad, la electronegatividad del carbón y las propiedades estructurales del tensioactivo.

El naftaleno sulfonato es un formaldehído condensado, donde su núcleo puede absorberse en la superficie no polar de las partículas, con el radical sulfonato apuntando hacia la fase líquida. El radical sulfonato es hidrofílico, por tal motivo

forma una barrera de energía alrededor de las partículas dispersas, provocando una exclusión mutua entre ellas.

Qiu, y Col., (2016) investigaron el efecto depresor del naftaleno sulfonato, realizando mediciones de minerales y ángulos de contacto utilizando las técnicas avanzadas de transformada de Fourier infrarroja espectroscopía (FTIR), espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) y mediciones de potencial zeta para explicar el mecanismo de adsorción.

Los resultados de los espectros FTIR demostraron que después de la adición del Naftaleno Sulfonato aparecieron nuevos picos de adsorción en las superficies del grafito, comprobándose que agente podría absorberse en la superficie del grafito sin la formación de un nuevo complejo.

Como resultado de la aplicación de la técnica XPS, en los espectros del grafito después de la interacción con Naftaleno Sulfonato se muestra que los elementos azufre (S) y Sodio (Na) aparecen en la superficie del grafito. Mientras tanto los cambios en el electrón, la energía de enlace fue relativamente pequeña. Esto significa que la interacción es meramente adsorción física sin la formación de nuevos complejos.

Como el núcleo del naftaleno se absorbe sobre la superficie de las partículas de grafito con el radical sulfonato apuntando al agua. La tensión superficial de las partículas disminuye debido a la asociación entre el radical sulfonato de la molécula de Naftaleno Sulfonato y el hidrogeno en el agua Xu y col., (2009), por lo que las partículas de grafito hidrofóbicas se vuelven hidrofílicas. El ángulo de contacto del grafito disminuyo después de la interacción con el Naftaleno Sulfonato.

En flotación, el efecto depresor del Naftaleno Sulfonato sobre el grafito se logró transformando la superficie de las partículas de grafito de hidrófoba a hidrófila, esta no puede flotar.

La interacción de Naftaleno Sulfonato con la superficie del grafito fue por enlaces de Van Der Waals y enlace de hidrógeno, confirmada por los espectros FTIR, fotoelectrón de rayos X espectroscopía y la disminución del potencial Zeta que se confirmó con su medición.

El efecto principal de este tipo de agentes es modificar el potencial Zeta con tendencia a valores negativos y disminuir el ángulo de contacto de avance a medida que aumenta la concentración del agente depresor (Pawlik., 2002).

El Lignosulfonato de acuerdo con el estudio realizado por Mahan y col., (2019) mejora la humectabilidad del carbón al reducir la tensión interfacial entre las partículas de carbón y el agua.

El Lignosulfonato mejora la estabilidad de las partículas de carbón al introducir la fuerza de repulsión entre las partículas en la suspensión.

Los polisacáridos son carbohidratos y por lo tanto contienen carbono, hidrogeno y oxígeno; con la formula general $C_x(H_2O)_y$. que se representa con la estructura que se muestra en la figura 3.

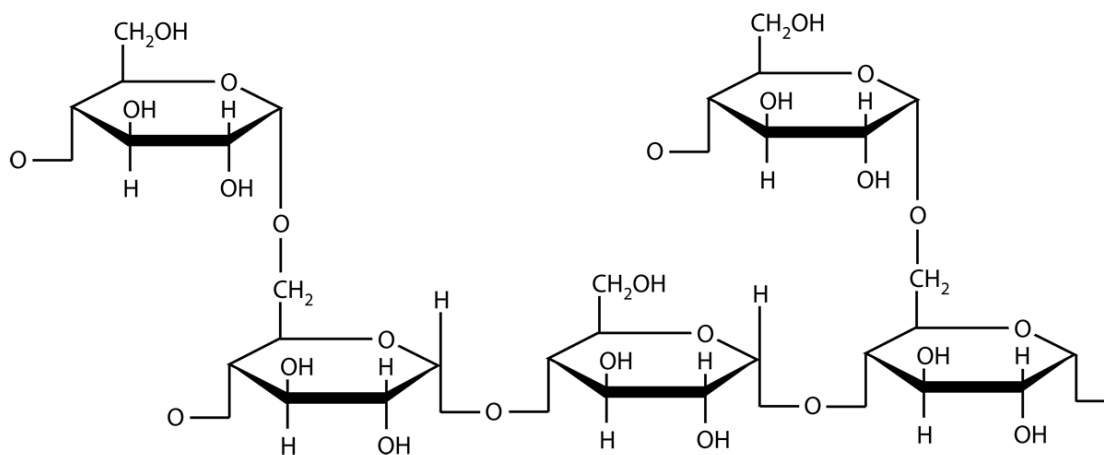


Figura 3 Estructura química del Glucógeno.

- 3.** Los polifenoles, los más usados como depresores son los de tipo tanino, que son mezclas complejas; el representativo de este grupo es el quebracho.

Son reactivos derivados de la madera del quebracho colorado, se identifican en la industria minera como tanino, ácido tánico y extracto de quebrado. Existen

otros extractos derivados de árboles como la Mimosa que también se reconoce como tanino. Los taninos químicamente son metabolitos secundarios, (son productos que quedan después de un proceso de digestión, químico o descomposición) son compuestos fenólicos, no nitrogenados, solubles en agua y que forman soluciones coloidales, también son solubles en alcohol y en acetona, pero insolubles en solventes apolares y reaccionan con numerosos reactivos. (Fleton, 1989; Last, 1951).

El extracto de quebracho es obtenido a través de tratamiento con agua caliente y posteriormente modificado por sulfatación para volverlo soluble y estable. El quebracho se divide en tres tipos dependiendo de la especie de árbol, el colorado *Shinopsis Lorentzii* tipo S que es el más débil para la depresión de sulfuros, pero máximo de efecto a pH alcalinos se utiliza para minerales naturales flotables. El segundo blanco *Shinopsis Haenkeana*, tipo A, apropiado para minerales sulfurados, es más sensible a pH ácido. El tercero colorado chequeño, tipo O este tiene mayor actividad depresora a menos dosificaciones.

La fórmula química del quebracho es la siguiente: $[C_6H_2(OH)_3-COOC_6H_2(OH)_2-COO]_5 C_6H_7O$ que es una pentagaloilglucosa. De esta forma puede decirse que el quebracho se comporta químicamente como una sustancia de carácter aromático de muy compleja composición, en la que predomina los grupos fenólicos poli hídricos condensados.

Algunas de las características de este reactivo se presentan en la siguiente lista:

- Reactivo modificador en flotación selectiva (depresor)
- Alta selectividad y amigable con el medio ambiente
- Estables en medio ácido como alcalino
- Gran capacidad de adsorción en la superficie de los minerales.

Los grupos funcionales de estos reactivos tienen una importante capacidad de adsorción en la superficie de los minerales. La adsorción puede ser el resultado de la unión tipo puente de hidrógeno con el oxígeno accesible de la superficie y

posiblemente con otros átomos como el azufre y flúor; o por la formación de complejos entre los grupos OH- y cationes di y tri-Valente como el calcio, bario, cobré, zinc, hierro, aluminio etc., o por simple neutralización de la carga negativa a pH alcalino. También podría ser por atracción electrostática entre micelas y la superficie de algunos minerales (Haslam, 1989).

4. Los compuesto Azo (azoderivados) son químicos que cuentan con el grupo funcional azo, que tiene la forma R-N=N-R, siendo las R compuesto del carbono y la N, nitrógenos con un enlace doble entre ellos. en algunas ocasiones se encuentran también bajo la denominación de compuestos azoicos (Mendez, 2013).

Los azoderivados pueden presentar una intensa coloración, cuando el compuesto azo se encuentra en conjugación con un par de anillos aromáticos, debido a que el compuesto resultante absorbe radiación de tipo electromagnética en la banda del espectro visible (Mendez, 2013).

La Nigrosina es un colorante de tipo azoico, obtenido por oxidación de anilina; se prepara fundiendo la anilina y calentándola con una mezcla de nitrobenzina, hidrocloreto de anilina, en presencia de un catalizador de hierro o de cobre el producto obtenido. El producto obtenido, viene liberado del exceso de anilina con un calentamiento al vacío, a continuación, se muestra la estructura del compuesto en la figura 4.

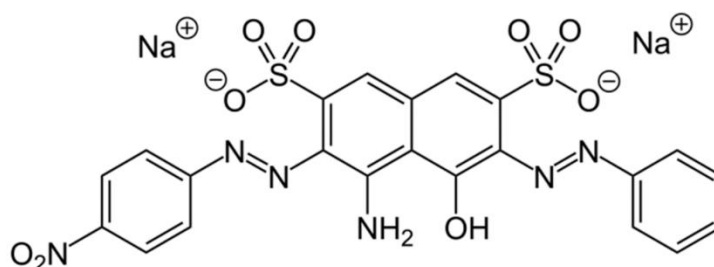


Figura 4 Estructura química de la Nigrosina.

2.4.4. Adsorción de depresores orgánicos.

La interacción entre la superficie de los minerales y los depresores orgánicos se presenta por los siguientes mecanismos:

- a) Enlace por puente de hidrógeno
- b) Interacción hidrofóbica
- c) Formación de complejos con el catión del mineral.

El puente de hidrógeno se basa en el hecho de que los grupos OH^- de los polisacáridos son capaces de formar enlaces de hidrógeno con los grupos OH^- de los hidróxidos metálicos sobre la superficie del mineral. La interacción por hidrofobicidad ha sido propuesta con base a la interacción que existe entre la dextrina y superficies del mineral, inherente con el carbón, (Fuerstenau, 1974; Miller, 1984). La formación de complejos es el mecanismo más aceptado a partir de los trabajos de investigación por Liu y col.,(1989). Ya que esta depende de la estructura superficial de las partículas y condiciones del medio acuoso tales como el pH, que afecta la naturaleza química de la superficie de mineral y/o de los reactivos presentes en el sistema.

La adsorción de estas sustancias es en sitios de metal hidroxilado en la superficie de minerales de sulfuros puede mejorarse mediante la oxidación de la superficie para promover la formación de especies de hidróxido de plomo y sulfato, (Liu & Laskowski, 1989; Laskowski & Bolin, 1991; Laskowski,1993; Laskowski 2007).

La interacción es dependiente del pH, y que el pH óptimo de interacción varía con el tipo de metal usado y coinciden con los puntos iso-eléctricos (iep) de los hidróxidos metálicos precipitados, (Lui & Laskowski., 1989; López-Valdivieso., 2007).

La dextrina es un tipo de reactivo de polisacárido derivado del almidón producido por la degradación térmica parcial en condiciones ácidas. La dextrina tiene carbohidratos poliméricos ramificados más altos y está compuesta de unidades de dextrosa (Li y col., 2016).

La dextrina también se usa generalmente como un depresor en la flotación inversa del carbón, durante el cual el proceso se deprime (Li & Shen, 2016; Jaiswal y col., 2015).

Por lo tanto, es muy necesario estudiar la diferencia de comportamiento de adsorción entre el carbón y el mineral de ganga en la dextrina, así como también la regla de cambio característico de la superficie del carbón y la ganga mineral después de adsorber dextrina (Yonggai, 2019).

La dextrina podría aumentar el punto isoeléctrico tanto del carbón sub-bituminoso como de la sílice. La hidrofiliidad del carbón subbituminoso después de ser tratado con dextrina mejora mientras que la de sílice se debilita ligeramente según el resultado de las pruebas de velocidad de humectación de la superficie. La adición de dextrina de baja dosis (1 kg / t) podría ayudar a obtener un buen rendimiento de flotación inversa (Yonggai, 2019).

Los polisacáridos como la dextrina, CMC y CMS tienen diferentes niveles de adsorción con el talco y por tal motivo la consecuencia en la magnitud de la acción depresora. De acuerdo con estudios realizados con la densidad de adsorción la CMC presenta la mejor acción depresora con relación al CMS atribuyendo a los grupos carboxilos más favorables y los diferentes pesos moleculares.

Diésel como agente depresor, ya que es un compuesto que se caracteriza por su capacidad para humectar superficies hidrófobas (Ron, 2001). Al agregar el Diésel con el agua forma súper agregados lo cual provoca un cambio de fase y genera turbidez (Eastop, 1998), es con el propósito de saturar el efecto de adsorción que presenta el carbón y al mismo tiempo deprimir.

2.5. Consideraciones con los depresores orgánicos.

La interacción de la dextrina con las superficies hidroxiladas de los cationes metálicos es de naturaleza química a través de la formación de complejos anillados de cinco miembros (dos carbonos, dos oxígenos y el catión metálico) entre el metal

y el polisacárido (Laskowski & Liu., 1989; Liu & Yahui 2000; Laskowski & Bolin, 1991; Rath., 2000), de acuerdo a la figura 5.

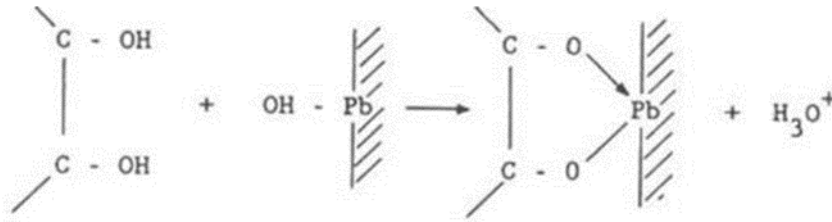


Figura 5 Mecanismo de adsorción de dextrina en galena (Laskowski et. Al., 1993).

La densidad de adsorción de dextrina en galena y calcopirita en función del pH, se concluye que la adsorción de dextrina en la galena es mayor a pH de 11, mientras que en calcopirita parece ser constante por debajo de pH 8, con un pequeño incremento aproximadamente a un pH de 9 y se muestra en la figura 6.

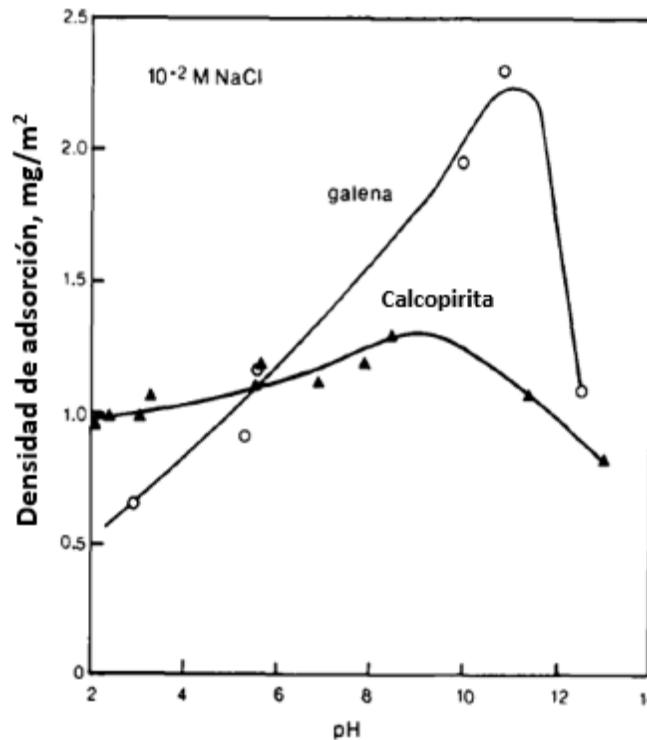


Figura 6 Efecto de pH en la adsorción de dextrina en calcopirita y galena (Liu y Laskowski 1989c).

Una alternativa para llevar a cabo la flotación a valores de pH ácidos es el empleo del depresor dextrina para pirita, la adsorción de dextrina en calcopirita en función

del pH sobre superficies oxidadas y sin oxidar a varias concentraciones de dextrina se puede apreciar en la [figura 7](#), (Cabrera-Tejada., 2007).

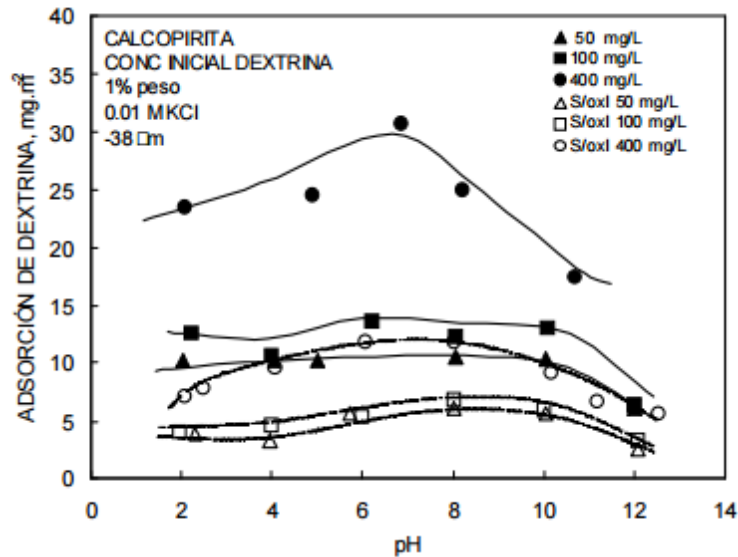


Figura 7 Adsorción de dextrina en función de pH sobre superficie oxidada y sin (Cabrera-Tejada., 2007).

El efecto depresor de la dextrina es mayor cuando se emplea xantato como colector ya que el colector carbamato se desadsorbe parcialmente sobre la superficie de la calcopirita. Esta es una buena alternativa para no afectar la recuperación de cobre y poder controlar el carbón, como se observa en la [figura 8](#).

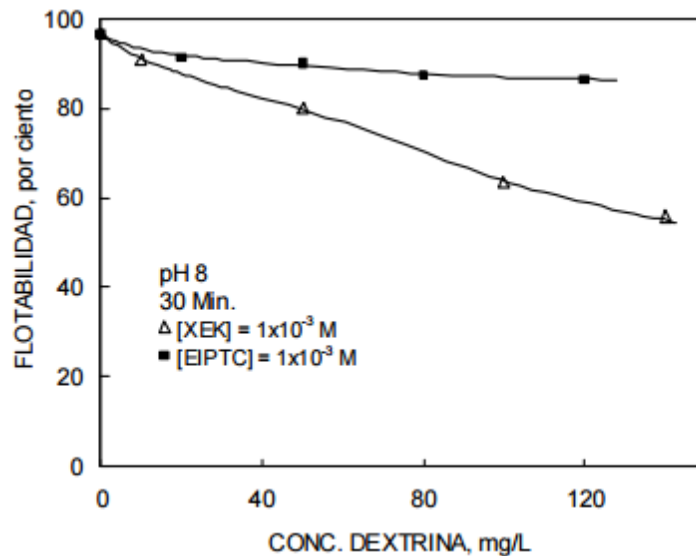


Figura 8 Flotabilidad de calcopirita oxidada en función de la conc. de dextrina (Cabrera-Tejada., 2007).

Celedon, (1997) estudió el efecto de la adsorción de la dextrina en galena utilizando el colector xantato, e indica que a pH de 8 y con una concentración mayor de 140 mg/l de dextrina ésta se adsorbe en la superficie de la galena, como se aprecia en la figura 9.

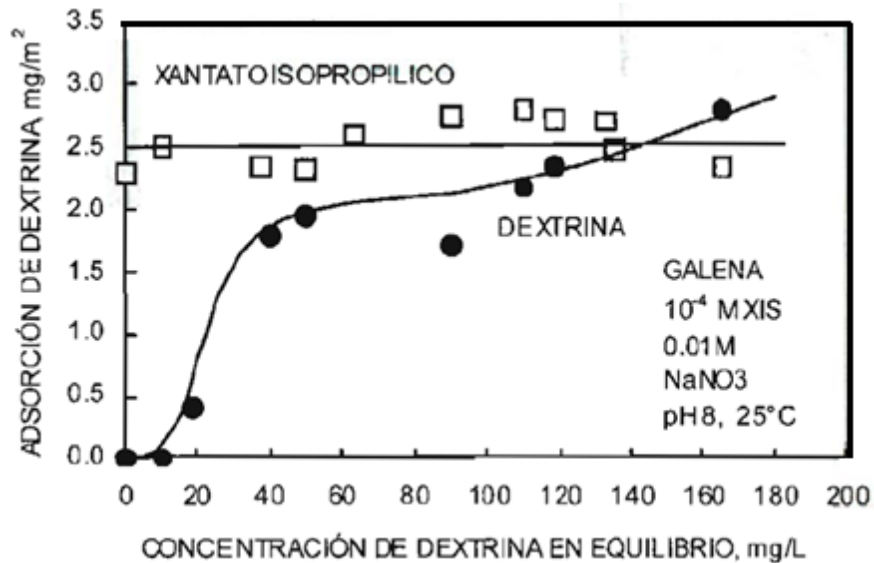


Figura 9 Adsorción de dextrina en función de su concentración a pH 8 con Xantato (Celedon., 1997).

La adsorción de dextrina es fuertemente dependiente del pH y se incrementa a valores de pH mayores a 4 con una máxima adsorción a pH 6 donde disminuye drásticamente (López-Valdivieso., 2004).

2.6. Efecto del tamaño de partícula en la depresión de carbón.

Los materiales de carbón se encuentran en su mayoría en cinco formas diferentes, diseminadas con pequeñas inclusiones dentro de ellos, como capas en donde dominan los minerales de grano fino, nódulos en lenticular / concreciones esféricas, fisuras, es decir, rellenos de tacos y fracturas o como fragmentos de roca. (Jaiswal y Col., 2015), con los granos de carbón durante la separación, es necesario una liberación adecuada. Esencialmente todo el trabajo realizado en la depresión de carbón. (Stonestreet & Franzidis, 1989; Ding & Laskowski, 2006; Pawlik & Laskowski 2003) o finamente muestras de carbón molido, (Patil y col., 2008; Zhang y col., 2013;

Vamvuka y col., 2001) estudiaron la respuesta de individuos fracciones de tamaño (+300 μm , -300 + 75 μm y - 75 μm) utilizando una mezcla de queroseno con un 2% de DDA como colector y MIBC como espumador. Observaron que la selectividad fue mejor para el tamaño por debajo de - 75 micrones, pero la recuperación fue muy baja, es decir, menos del 35%. El rango de tamaño de partícula de -300 + 75 micrones, se consideró ser óptimo Zhang y col., (2013) investigaron en detalle el efecto de las partículas.

La recuperación del carbón aumenta para las fracciones de mayor tamaño, pero el contenido de ceniza concentrada aumenta para los tamaños menores a 45 micrones, por lo tanto la depresión de carbón el mayor rendimiento se obtuvo a partir del tamaño de alimentación de - 74 micrones.

2.7. Investigación de agentes depresores de carbón.

Evaluación de un depresor de grafito en un circuito de flotación de sulfuros polimetálicos realizado por Nikhil Gupta del Instituto Politécnico de la universidad del Estado de Virginia, donde describe el uso de tintes sintéticos como depresores de grafito en circuitos de flotación de minerales polimetálicos, pero con un alto costo, por tal motivo el estudio tiene el principio la evaluación de otros depresores alternativos de bajo costo para un mineral complejo de plomo y zinc con alta presencia de grafito. (Gupta, 2017)

En esta investigación se evaluó el almidón comercial, bagazo de residuos de caña de azúcar y polvo de bagazo carbonizado, considerando como criterio de evaluación la calidad de los concentrados de plomo y zinc y sus respectivas recuperaciones, así como el contenido de carbón en las colas finales.

La nigrosina logró una depresión del 94.3 % del carbón, mientras con el almidón comercial el 93.8% y el polvo de bagazo mostró una efectividad en la depresión del carbón de 85.6%, los resultados se observan en la tabla 3.

Según los resultados metalúrgicos de plomo, zinc y plata, se obtuvieron mayores relaciones grado-recuperación, en la prueba que no se dosificó depresor de carbón.

En el grado de plomo se logró un incremento del 11.80% al 41.30% lo que representa 29.5 unidades, esto fue con el almidón comercial a 250 g/t. En la concentración de zinc también se presentó una mejora de 43.80% a 53.30% con un incremento de 10.5 unidades también con el almidón comercial a 350 g/ton. La plata mostró una respuesta positiva a la nueva condición de operación logrando un aumento de 419 g/ton con el almidón comercial con una dosis de 250 g/ton, ver [tabla 3](#).

Tabla 3 Ensayes de concentrado de colas de las pruebas con depresores (Grupa, 2017).

Depresores	% Grados						% Recuperaciones			% Rechazo
	Pb	Zn	Ag	Fe	Gr-C		Pb	Zn		Gr-C
Sin Depresor										
Conc. Pb	11.80	6.50	152.00	13.20	31.30		63.10	93.20		49.10
Conc. Zn	0.56	43.80	25.00	16.50	0.78					
Colas	0.39	0.70	9.00	4.60	3.15					
Negrosina										
Conc. Pb	31.10	4.10	525.00	20.40	7.30		55.50	92.40		94.30
Conc. Zn	0.68	52.80	26.00	10.00	0.68					
Colas	0.56	1.25	13.00	8.40	6.40					
Almidón 250 g/t										
Conc. Pb	41.40	2.80	571.00	16.60	6.90		50.90	90.80		93.80
Conc. Zn	0.66	52.30	23.00	10.10	0.52					
Colas	0.69	1.54	15.00	8.90	5.80					
Almidón Ind.										
Conc. Pb	27.30	5.70	371.00	13.30	18.80		58.30	92.70		85.70
Conc. Zn	0.60	50.10	19.00	12.30	0.74					
Colas	0.55	1.02	11.00	8.93	5.81					
Polvo de Bagazo										
Conc. Pb	36.40	4.90	453.00	13.40	14.10		63.60	93.70		85.60
Conc. Zn	0.69	49.70	23.00	11.90	0.62					
Colas	0.41	0.93	11.00	8.15	4.76					
Bagazo Carbonizado										
Conc. Pb	18.70	7.00	319.00	18.60	18.40		61.70	92.40		81.50
Conc. Zn	0.57	51.50	19.00	11.60	0.38					
Colas	0.44	0.95	11.00	8.13	5.28					
Almidón 350 g/t										
Conc. Pb	28.00	5.30	418.00	19.00	12.00		49.20	90.20		89.60
Conc. Zn	0.64	53.30	21.00	8.80	0.70					
Colas	0.75	1.40	18.00	11.70	5.93					

Las recuperaciones obtenidas fueron en su mayoría inferiores a la prueba sin adición del depresor de carbón, solamente la prueba con bagazo carbonizado mostró recuperaciones superiores.

El efecto de los depresores de carbón orgánico en el grado y la recuperación de plomo con respecto al contenido de grafito en el concentrado es mostrado en la [figura 10](#). Los resultados con el almidón comercial con menor dosis y polvo de bagazo obtuvieron grados comparables y recuperaciones similares a la nigrosina; sin embargo, el contenido de grafito en el concentrado fue más alto en un 10% para todos excepto la nigrosina y almidón comercial. El polvo de bagazo mostró efectividad media como depresor con relación al almidón industrial o bagazo carbonizado

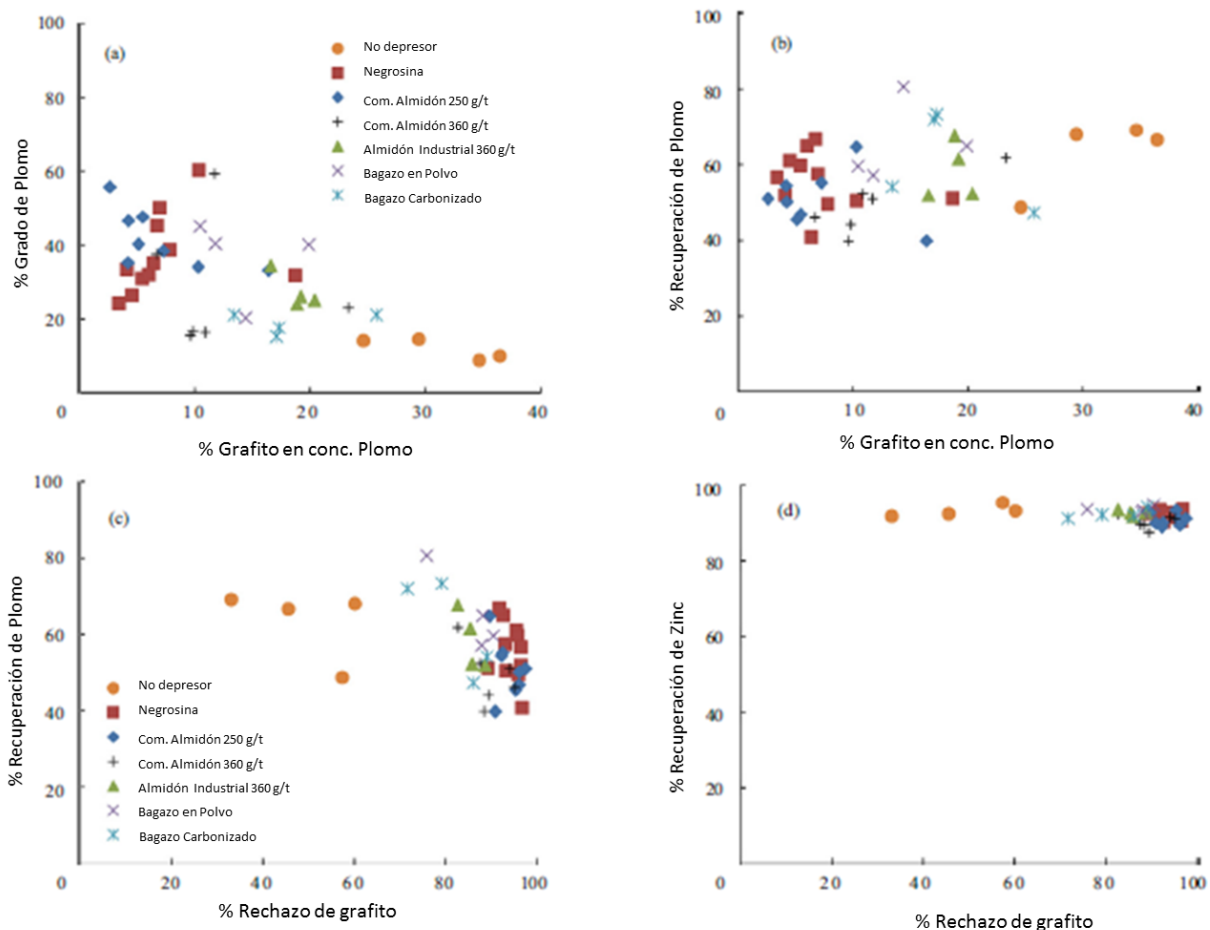


Figura 10 Pruebas de flotación con diferentes depresores de grafito (Gupta., 2017).

2.8. Estudio de dextrina como reactivo depresor de carbón.

La dextrina pertenece al grupo de oligosacáridos de poco peso molecular, que se produce al hidrolizar el almidón. Tiene la fórmula general de los polisacáridos, pero con una longitud de cadena más corta. La producción industrial se realiza por hidrólisis ácida del almidón de maíz y papa (Franco, 2012).

Las dextrinas tienen la propiedad de ser soluble en agua, es un sólido de color blanco con tonalidades amarillas, ópticamente activas. Analíticamente las dextrinas se pueden detectar con una solución de yodo, el punto de equilibrio se da cuando se presenta un cambio en el vire a coloración roja. En la figura 11 se muestra la molécula.

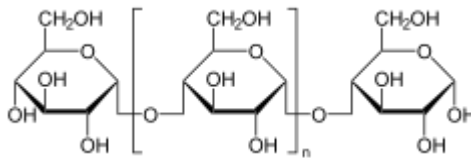


Figura 11 Molécula química de la dextrina.

Las dextrinas cíclicas son conocidas como ciclodextrinas, que se forma por la degradación enzimática de almidón por bacterias, como la *Bacillus macerans*, estas tienen una estructura toroidal formadas por 6-8 residuos de glucosa.

La dextrina tiene alto uso en la industria, por su baja toxicidad y precio bajo. Son utilizados como agentes aglutinantes en procesos farmacéuticos, en pirotecnia, como pegamentos solubles en agua, como floculante en la etapa de recuperación de agua.

Las soluciones acuosas de dextrinas poliméricas y almidones influyen en las propiedades de superficie de las partículas en el agua llevando a cabo una modificación superficial que cambia sus propiedades en la flotación.

Aprovechando estas propiedades se realizó la experimentación del proceso de flotación selectiva en un concentrado final de cobre, usando la dextrina para separar los contenidos de carbón orgánico y mejorar la calidad del concentrado. Las pruebas

fueron basadas en la patente PL 195693 [Drzymala., \(2007\)](#). La refluotación facilitó dos productos un concentrado de cobre con bajo contenido de carbón orgánico, mientras el otro producto con una cantidad elevada de carbón orgánico y valores reducidos de cobre. Como conclusión del experimento la dextrina es un depresor efectivo de carbón orgánico para su separación.

2.9. Hipótesis

Con la adición de un agente orgánico, mediante la absorción se pretende crear un cambio en las superficies hidrófobas del carbón a hidrófilas, en el circuito de flotación de galena y calcopirita.

2.10. Objetivo General

Evaluar reactivos orgánicos como depresores de carbón para definir la viabilidad de estos en su control en la etapa de flotación de galena y calcopirita.

2.10.1. Objetivos específicos

1. Determinar la presencia de carbón en las muestras de mineral a utilizar en el estudio.
2. Definir la depresión natural del carbón mediante la realización de pruebas de flotación sin adición de un depresor.
3. Aplicar la metodología de diseño de experimentos en con apoyo del software Minitab, como herramienta, para definir los esquemas de reactivos para la depresión de carbón.
4. Desarrollar pruebas de flotación manejando como variable diferentes reactivos orgánicos como depresores de carbón, así como la modificación pH y P80 para potenciar la depresión.
5. Validar los resultados mediante el análisis de datos de respuesta de la investigación, haciendo uso de las herramientas de análisis que integran esta etapa, dentro del desarrollo de diseño de experimentos, para determinar el depresor de carbón que presente resultados significativos, así como las

condiciones que pudieran aportar, para control del carbón en la flotación de galena y calcopirita.

2.11. Justificación

La presencia del carbón en el mineral representa una condición adversa en el proceso de concentración por flotación de especies minerales como galena y calcopirita, manifestándose en las siguientes complicaciones: baja recuperación, aumento de consumo de reactivos, descontrol operativo del circuito, descenso en la eficiencia de clarificación del agua, problemática con humedad y durabilidad de medios filtrantes en el área de filtración, entre otros efectos negativos.

Debido a la profundidad de los yacimientos de sulfuros polimetálicos, la complejidad mineralógica se ha incrementado, como es el caso de la presencia de carbón, que representa una problemática que invita a desarrollar estudios para evaluar comportamiento de los diferentes reactivos orgánicos como depresores de carbón en flotación de algunos sulfuros.

Los polisacáridos como depresores en la flotación de galena y calcopirita representan una alternativa, con ventajas por ser de bajo costo, biodegradables y con mayor resistencia a la oxidación que los depresores de origen inorgánico. La dextrina, naftaleno, carboximetilcelulosa (CMC), compuestos azo, nigrosina y lignosulfonatos entre otros, son extractos de productos naturales o con modificaciones para incrementar su peso molecular (>10,000) y por tanto el número de grupos polares se caracterizan por ser muy hidrofílicos.

III. Metodología experimental de la depresión de carbón con agentes orgánicos y aplicación de DOE.

3.1. Proceso de Preparación de muestra de mineral.

En el desarrollo de la investigación se trabajó con varias muestras de compósitos mensuales de la unidad Francisco I Madero del Grupo Industrias Peñoles, en esta unidad procesan minerales por el método de concentración por flotación selectiva de sulfuros, donde las especies minerales de interés son la esfalerita (sulfuro de zinc), la galena (sulfuro de plomo) y la calcopirita (sulfuro de cobre).

De acuerdo con los resultados de caracterización mineralógica practicados a muestras con anterioridad, podemos comentar que la mena de Madero está compuesta por sulfuros, carbonatos, silicatos, óxidos y otros minerales, se muestra en la [tabla 4](#).

Tabla 4 Composición Mineralógica de mena Francisco I Madero.

Minerales	Porcentaje de integración		
	Máximos	Mínimos	Promedio
Sulfuros	20	10	15
Silicatos	80	60	70
Carbonatos	18	9	13.5
Óxidos	12	6	9
Otros	2	0.5	1.25

En el área de investigación metalúrgica se cuenta con varios compósitos, para el presente estudio se seleccionaron aquellos que durante el periodo de operación de la planta concentradora presentaron problemas con la presencia de carbón y sus complicaciones. De acuerdo con los resultados de los estudios modales realizados a algunos compósitos de operación en planta, se ha determinado la presencia de carbón total y carbón orgánico.

Descripción general del muestreo: Durante todos los días del mes se toman dos incrementos de muestra de la banda que alimenta a la planta, con dos propósitos:

el primero es determinar humedad y el segundo formar el compósito para la muestra de investigación metalúrgica.

Al concluir el mes se mezclan todos los incrementos, se homogeniza mediante el método de cono y cuarteo por traspaleo en placa de acero, para luego formar un cono troncado el cual es partido en cuatro partes iguales; las dos partes contrarias se consideran muestra testigo y el resto se repite la técnica.

Esto se realiza por varios ciclos hasta obtener una muestra representativa de aproximadamente 50 kg, de la cual se toman una muestra para ensaye y se procede a tomar otras muestras en puntos aleatorios hasta obtener lotes de 1 kg para las pruebas metalúrgicas.

En resumen, los procedimientos incluyen las siguientes técnicas:

- **Toma de muestra:** consiste en coleccionar un incremento de la alimentación al molino SAG, recolectando el material, asegurando el retiro de todas las fracciones de tamaño del área delimitada con el escantillón, ver [figura 12](#).

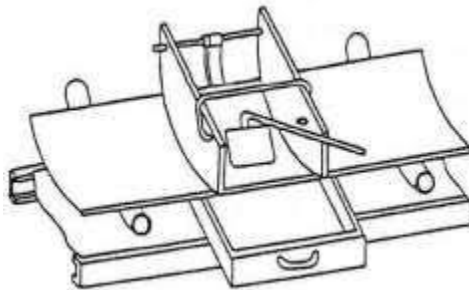


Figura 12 Cortador de muestra de banda transportadora (UNC).

- **Preparación de muestra:** inicia con la reducción de tamaño máximo del mineral a una pulgada, para esto se utiliza una quebradora de quijada de laboratorio, posteriormente se clasifico el material pasándolo por la malla #10; el sobre tamaño se alimentó a una quebradora boyd crusher, reduciéndola a -10 mallas, para después volverlo a mezclar con el material de una pulgada, ver [figura 13](#).



Quebradora de quijadas
Morse



Quebradora Boyd Crusher

Figura 13 Quebradoras de quijada y Moy Crusher.

- **Homogenización de muestra:** se realiza bajo el método de traspaleo que consiste en el mezclado de la muestra sobre una placa de acero limpia, usando una pala cuadrada, para traspalear el material de un lugar a otro formando conos, haciendo mínimo 4 ciclos.
- **Reducción de muestra:** este proceso se realiza bajo el método de cono y cuarteo que consiste en formar un cono para luego comprimirlo y formar pastel, el cual se divide en cuatro partes iguales; donde dos partes iguales se desechan y el resto de la muestra se vuelve reproducir los pasos anteriores conocido esto como ciclo, se recomienda aplicar los ciclos necesarios hasta obtener el volumen de muestra de acuerdo con el estudio a realizar. Este procedimiento es explicado en la [figura 14](#).

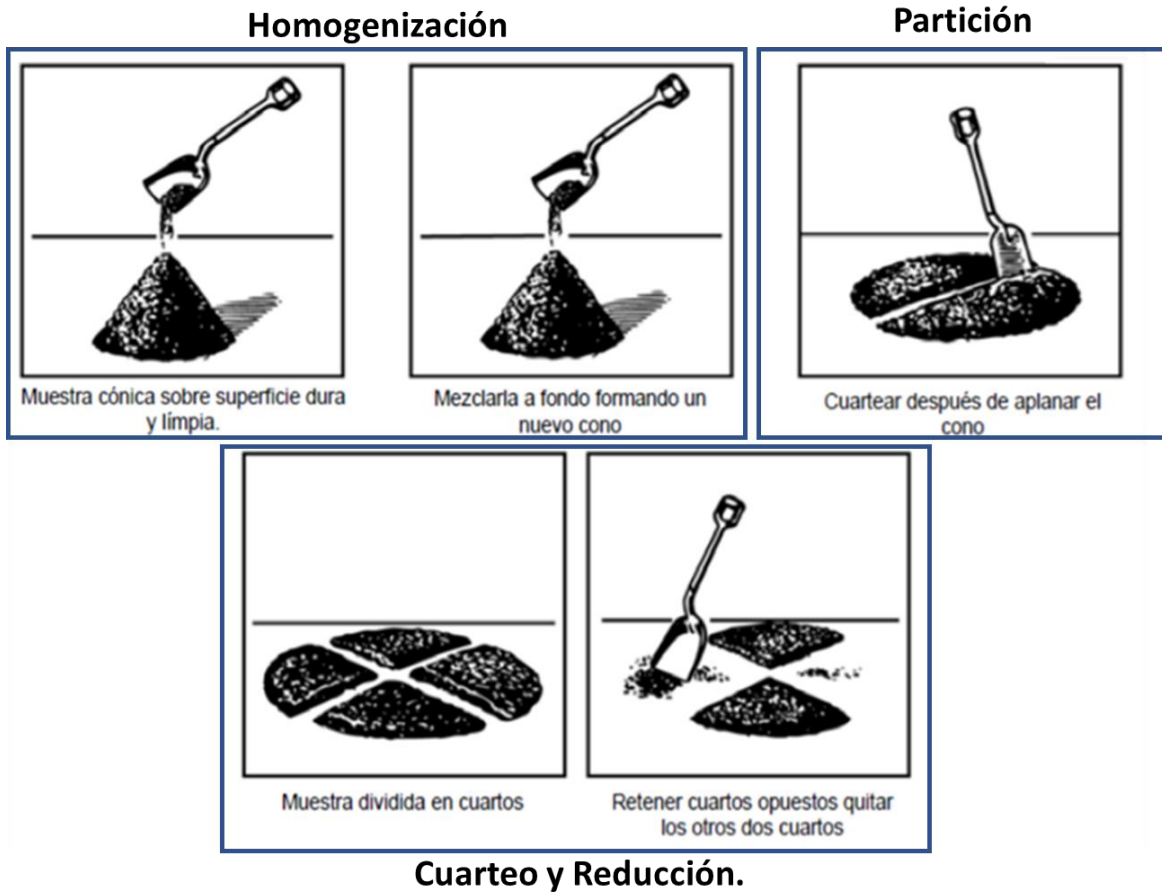


Figura 14 Reducción de muestra por la técnica de cono y cuarteo.

3.2. Pruebas metalúrgicas de flotación a escala laboratorio.

Es una etapa de la investigación se evaluarán reactivos orgánicos (Dextrina, Naftaleno D-160, Diésel, Lignosulfonato, CMC, Compuesto Azo y Nigrosina) como depresores para determinar el de mejor rendimiento, donde las variables a manipular es el agente depresor y tamaño de partículas F80 y el potencial hidrogeno. El estudio iniciará con pruebas abiertas, para poder determinar a través de los resultados la mejor opción como se aprecia en la [figura 15](#).



Figura 15 Prueba metalúrgica de flotación a nivel laboratorio.

En la [tabla 5](#) se muestran las dosis de los depresores que se agregan en la molienda, como es el cianuro de sodio 20 g/t, sulfato de zinc 45 g/t, un pH de 8, y 36 minutos de giro del molino. En la etapa de acondicionamiento se adicionan los promotores, colectores, espumantes y acondicionador de superficies adicionando Ap-404 10 g/t, Ap-3418 33 g/t, X-343 5 g/t, y T-100 50 g/t, Na_2CO_3 40 g/t, con 10 minutos de tiempo de contacto.

La fase de flotación se desarrolla en dos etapas, la primaria donde se agrega un refuerzo de 15 g/t de Ap-3418, con una duración de 4 minutos y la agotativa, donde se agregan refuerzos de colector y espumante 15 g/t de Ap-3418 y 10 g/t de T-100, esta se desarrolla en 1 minuto. Las revoluciones de la celda se manejan en 1500 rpm.

Tabla 5 Condiciones estándar de prueba metalúrgica.

SECCIÓN	CUADRO DE REACTIVOS							CONDICIONES			
	NaCN	ZnSO ₄	AP-404	Ap-3418	X-343	T-100	Na ₂ CO ₃	P80	pH	Velocidad	Tiempo
	Gramos / Tonelada							Micrones		RPM	Minutos
Molienda	20	45						74	8		36
Acond. 1 Pb			10	33	5		10		8	1500	5
Acond. 2 Pb						50			8	1500	5
Prim. de Pb				15					8	1500	4
Agot. de Pb				15		10			8	1500	1
Total	20	45	10	63	5	60	10	74	8	1500	51

Con el propósito de evitar un error en la evaluación, es necesario fijar algunas variables en las pruebas para permitir que cada condición establecida en las pruebas puedan demostrar sus bondades, por tal motivo las pruebas se deberán de efectuar en condiciones exactamente iguales a la prueba estándar, por mencionar, granulometría, % sólidos, dosificación de reactivos, tiempos de acondicionamiento, flotación, nivel de interfase pulpa/espuma, RPM, velocidad de remoción de espumas, entre otras, para minimizar en lo posible el error experimental, que podría influir en los resultados ocasionando conclusiones erróneas.

Se realizarán las pruebas, iniciando con la toma de un kilo de muestra de mineral, previamente preparado, se lava el molino y las bolas, se coloca el mineral dentro del molino de bolas y se adiciona 670 ml de agua en esta etapa de adicionan los reactivos depresores de acuerdo con el esquema químico a evaluar. Se pone en operación el molino a 78 rpm durante 36 minutos, con estos dos parámetros se logra reproducir el p80 de -74 micrones.

El producto de esta etapa se deposita en la celda, para iniciar con la fase de acondicionamiento donde se dosifican los promotores y colectores, se adiciona agua para llevar a nivel la celda dando 10 minutos de acondicionamiento, casi al finalizar esta etapa se adiciona espumante, se inicia la flotación abriendo la válvula de aire, con una espátula se procede a retirar la espuma hacia el derrame, depositando la espuma en charolas de acuerdo a los tiempos de flotación obteniendo los productos concentrado primario y agotativo.

Serán realizadas pruebas metalúrgicas con flotaciones primarias y agotativas, de esta manera se generan resultados rápidos y económicos.

Estas pruebas se realizarán con los compósitos formados y se realizará prueba estándar sin depresores con el propósito de conocer el rechazo del carbón sin la adición de algún agente depresor, que servirá como referencia para determinar el poder de la depresión de los reactivos que se evaluarán en el estudio y de esta manera poder determinar el reactivo que tiene la mayor eficiencia en control de carbón.

Para su evaluación se usarán varios niveles de dosificación, partiendo de la dosificación recomendada, para dextrina el punto medio será de 80, 90 g/t, los valores extremos serán alto 120 g/t y bajo 50, 60 g/t., respecto al depresor D-160 se evaluarán seis niveles de dosificación, 50, 60, 70, 90, 120, 180 y 360 g/t. Diésel 20 g/t, Compuestos Azo, Nigrosina, CMC y Lignosulfonato se manejarán tres niveles 60, 90 y 120 g/t, se modificará el pH a 6 y 10, los P80 niveles finos 20.70, 24, 27.60 y 45 micrones.

3.4. Análisis químico de los productos de pruebas metalúrgicas.

La determinación de leyes en la muestra de cabeza mineral, así como de cada uno de los productos que se obtuvieron de las diferentes pruebas metalúrgicas, se realizaron por la técnica de espectroscopia de plasma de acoplamiento inductivo (ICP). En esta técnica una fuente de ionización, junto a un espectrofotómetro de emisión óptica (OES) constituye el equipo de ICP-OES.

El proceso consiste en la introducción continua de muestra líquida a través de un sistema de nebulización, que forma un aerosol que es transportador por el Argón a la antorcha del equipo, acoplado inductivamente por radio frecuencia.

Debido a las altas temperaturas que se generan, los analitos son atomizados y ionizados generando los espectros de emisión atómicos característicos, los cuales son dispersados por la red de difracción y el detector se encarga de medir las intensidades para luego procesarlas por el sistema informático.

Para esto será necesario disolver las muestras por el método de agua regia, las muestras fueron analizadas para Ag, Pb, Cu, Zn y Fe. Para este tipo de análisis químico la muestra representativa de cada producto deberá de tener tamaños

menores a 140 mallas para asegurar su homogeneidad y disolución. El equipo usado para este tipo de análisis es ICP-OES modelo 8300 de la marca Perkin Elmer mostrado en la [figura 16](#).



Figura 16 Espectrofotómetro Perkin – Elmer ICP-OES modelo 8300.

En caso de muestras con altas concentraciones como son los concentrados de plomo-cobre, se analizarán por métodos volumétricos de plomo y cobre) lo que permite obtener resultados más precisos.

Los métodos volumétricos se basan en la cuantificación del analito a partir de la determinación del volumen de una especie que reacciona con ella haciendo uso de indicadores que nos muestran el momento donde se alcanza el equilibrio estequiométrico, de acuerdo con las reacciones que se utilizaron, estas se clasifican en el grupo de valoraciones complejo-métricas, donde se utilizan los tituladores automáticos como se muestra en la [figura 17](#).



Figura 17 Determinación de plomo -cobre por método tradicional volumétrico.

Todos los métodos utilizados son regulados bajo la norma oficial de calidad de laboratorios NMX-EC-17025-IMNC-2000, que establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.

Para la determinación del carbón se realiza otro proceso analítico que consiste en la descomposición de los carbonatos con ácido clorhídrico que contiene la muestra. El C se libera como CO_2 y el cloruro correspondiente se elimina lavando con agua. El residuo se seca y se efectúa el análisis de carbón insoluble en el determinador LECO.

El porcentaje obtenido corresponde al carbón insoluble en ácido y por la diferencia respecto de la previa determinación del carbón total, se deduce el carbón correspondiente a los carbonatos que se multiplican por el factor correspondiente para expresarlo como CO_3 .

Para el análisis en LECO se activa el módulo del horno de inducción del equipo LECO C-200, se abre el flujo de oxígeno y nitrógeno, a continuación, se arranca el

sistema de extracción de gases, se deja calentar la cámara del equipo por 30 minutos.

Se coloca el crisol poroso de óxido de magnesio sobre la balanza, se agrega la muestra pesando alrededor de 0.25 gr registrando el peso exacto en el equipo, después de agrega la medida estándar del acelerador IRON CHIP y se cubre con el acelerador LECOCELII, se coloca el crisol en el pistón para ingresar la muestra dentro del horno, después de un lapso de tiempo el equipo reporta automáticamente el porcentaje de carbón insoluble contenido en la muestra, se muestra el equipo en la [figura 18](#).



Figura 18 LecoCell II para determinación de carbón.

3.5. Diseño de un experimento con Minitab.

El diseño de experimentos es una herramienta o técnica estadística que se basa en organizar y diseñar una serie de experimentos de una forma que con el mínimo número de pruebas se consigue obtener información útil, ofreciendo un método para investigar de forma simultánea los efectos de varias variables sobre una variable de salida (respuesta), ya que nos ayuda a investigar los efectos de las variables de entrada, sobre la variable de salida.

Estos experimentos consisten en una serie de pruebas, donde se realizan cambios intencionales en las variables de entrada. De cada una de las corridas se obtiene datos. Los cuales utilizaremos para identificar las condiciones de los procesos y los

componentes de los productos que repercuten en los resultados metalúrgicos. Con base en esto se determina la configuración de las variables entrada que optimizaran los resultados logrando mejorar recuperaciones de especies de interés y el rechazo de las impurezas.

Esta herramienta estadística es utilizada para identificar las condiciones del proceso y sus componentes del producto que modifican la calidad del producto, con dicha información se determina la configuración de factores que pueden contribuir a la mejora de los resultados ver [figura 19](#).

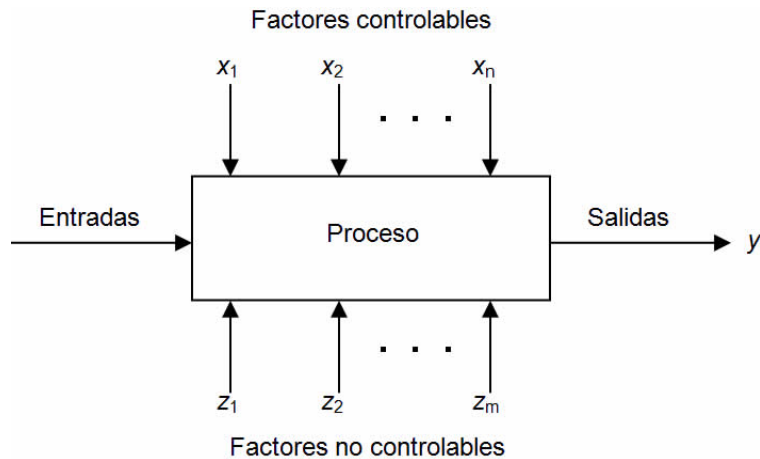


Figura 19 Diagrama de bloque de proceso a estudiar.

Las grandes ventajas del DOE es la posibilidad de poder estudiar un amplio espectro de valores de variables del proceso y obtener una respuesta bajo diferentes condiciones

3.5.1 Minitab

Es un programa computacional diseñado para ejecutar funciones estadísticas básicas y avanzadas, que combina lo amigable del uso del Microsoft Excel con la capacidad de ejecución de análisis estadísticos. En 1972 instructores del programa de análisis estadístico de la Universidad de Pensilvania desarrollaron el MINITAB como una versión ligera de OMNITAB, un programa de análisis estadístico del

Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de los Estados Unidos (Minitab, 2020).

El programa de Minitab ofrece cinco tipos de diseños: el de cribado, factoriales, de superficies de respuesta, de mezcla y Taguchi. Los pasos en Minitab para crear, analizar y visualizar un experimento son similares para todos.

3.5.2. Diseño factorial.

Es un tipo de experimento diseñado que permite estudiar los efectos que varios factores pueden tener en una respuesta. Donde se varían los niveles de todos los factores al mismo tiempo en lugar de uno a la vez, esto permite estudiar las interacciones entre ellos (Minitab, 2020).

Una vez ingresado los resultados del experimento en Minitab, el programa cuenta con varias herramientas analíticas y gráficas para la interpretación de los resultados.

El diseño de experimentos se aplica para desarrollar conocimiento nuevo, determinar las variables más importantes en un proceso, predecir una respuesta con precisión o la optimización de un sistema multivariable.

Para este estudio se realizará una experimentación factorial completa donde evaluaremos todas las combinaciones de variables (agentes depresores, niveles de pH y tamaño de partícula), aislar relaciones de causa y efecto, evaluar la aportación de los principales efectos e interacciones y podremos determinar el error experimental, lo que nos permitirá indicar los niveles de confianza asociados a la estimación de efectos.

3.6. Balances metalúrgicos

Se realizarán cálculos de balance, para determinar grados y recuperaciones de elementos de interés e impurezas, con principal interés en el comportamiento del

carbón en la flotación, se buscará bajar su concentración y recuperación, lo que se denominará control de carbón en flotación de galena y calcopirita.

Para realizar esta etapa de la investigación, actualmente se cuenta con hojas de cálculo predeterminadas, donde se usan las fórmulas, que nos ayudan a evaluar el rendimiento metalúrgico tanto en planta concentradora como en los resultados de las pruebas de laboratorio. Dado que los cálculos dependen por completo de los ensayos y pesos, cuando es conocida la alimentación al proceso y los productos, estos cálculos son tan precisos como el muestreo, el análisis y el pesaje empleado para obtener los datos requeridos ([Cytex Industries Inc, 2002](#)).

3.7. Como se realizará el análisis e Interpretación de resultados.

3.7.1. Analizar el diseño de experimento.

Después de la creación de un diseño de experimento y realizar el estudio de acuerdo con las corridas establecidas, se ingresarán los datos de respuesta, se ajustará un modelo a los datos, se generarán gráficas para evaluar los efectos. Para esto utilizaremos los resultados del modelo ajustado y las gráficas para determinar los factores más importantes.

3.7.2. Identificar efectos importantes.

Utilizaremos la salida de la ventana de sesión como las gráficas de efecto, con el propósito de determinar los efectos que son importantes para el proceso. Como resultado del ajuste de modelo completo incluye los efectos principales y las interacciones con los factores establecidos.

Los efectos son estadísticamente significativos cuando los resultados de los valores “p” en la tabla de coeficientes codificados son menores que el nivel de significancia (alfa). En el nivel alfa predeterminado de 0.05.

3.7.3. Interpretación de gráficas de efectos.

Con las gráficas de probabilidad normal y el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados podremos determinar cuáles efectos influyen en la respuesta,

recuperación de Ag, Pb, Cu y C. Con el modelo desarrollado se realizarán análisis adicionales para entender mejor los resultados, creando gráficas factoriales para identificar la mejor configuración de factores, utilizaremos la función de análisis de Predecir de Minitab, para predecir las condiciones para maximizar la recuperación de plata, plomo y cobre, así como minimizar la recuperación de carbón.

3.7.4. Interpretación de las gráficas factoriales

Estas graficas incluyen la gráfica de efectos principales y la gráfica de interacción donde el efecto principal es la diferencia en la respuesta media entro dos niveles de un factor. La gráfica de efectos principales mostrará las medias de recuperaciones de plata, plomo, cobre y zinc utilizando las diferentes condiciones.

Las gráficas de interacción muestran el impacto de ambos factores con relación a las recuperaciones antes mencionadas. Puesto que una interacción significa que el efecto de un factor depende del nivel del otro factor, en este paso es importante evaluar las interacciones, donde cada punto representa la media de la condición de procesamiento para un nivel de un factor.

La línea central horizontal muestra las condiciones medias de procesamiento para todas las corridas. Los paneles de la gráfica indican cada uno de los factores que se están en juego en la evaluación donde nos indican los impactos en las medias de las recuperaciones.

La gráfica de efectos principales nos permitirá descubrir adecuadamente la relación entre cada factor y la respuesta, para complementar el análisis de las interacciones significativas, vamos a examinarlas mediante la realización de las gráficas de interacción, ya que una interacción significativa entre dos factores puede afectar la interpretación de los efectos principales.

3.7.5. Gráficas de interacción

En las gráficas de interacción en cada punto mostrará la recuperación media con las diferentes combinaciones de los niveles de los factores. Si las líneas no son paralelas en la gráfica indicara que existe una interacción entre los dos factores. Las gráficas de interacción indicaran que la combinación de dos factores crea una nueva respuesta en el proceso que puede maximizar la recuperación de los elementos de interés y minimizar la de aquellos elementos que representa una interferencia del proceso.

Como resultado del experimento, se puede obtener una recomendación de una combinación de factores puede crear una nueva condición de operación que permitirá mejorar la recuperación de las especies de interés económico y minimizar las impurezas y los niveles de adición de los reactivos.

La otra herramienta estadista que se puede tener como producto de los datos y modelos obtenidos del diseño de experimento es la de predecir una respuesta.

3.7.6. Predicción de respuesta.

En las etapas anteriores del análisis se determina los mejores valores de configuración que están almacenados en el modelo DOE en la hoja de trabajo. Dicho modelo se puede utilizar para predecir las respuestas de las recuperaciones, que se puede usar como simulador para predecir condiciones que pueden beneficiar al proceso.

3.8. Diagrama de flujo investigación experimental.

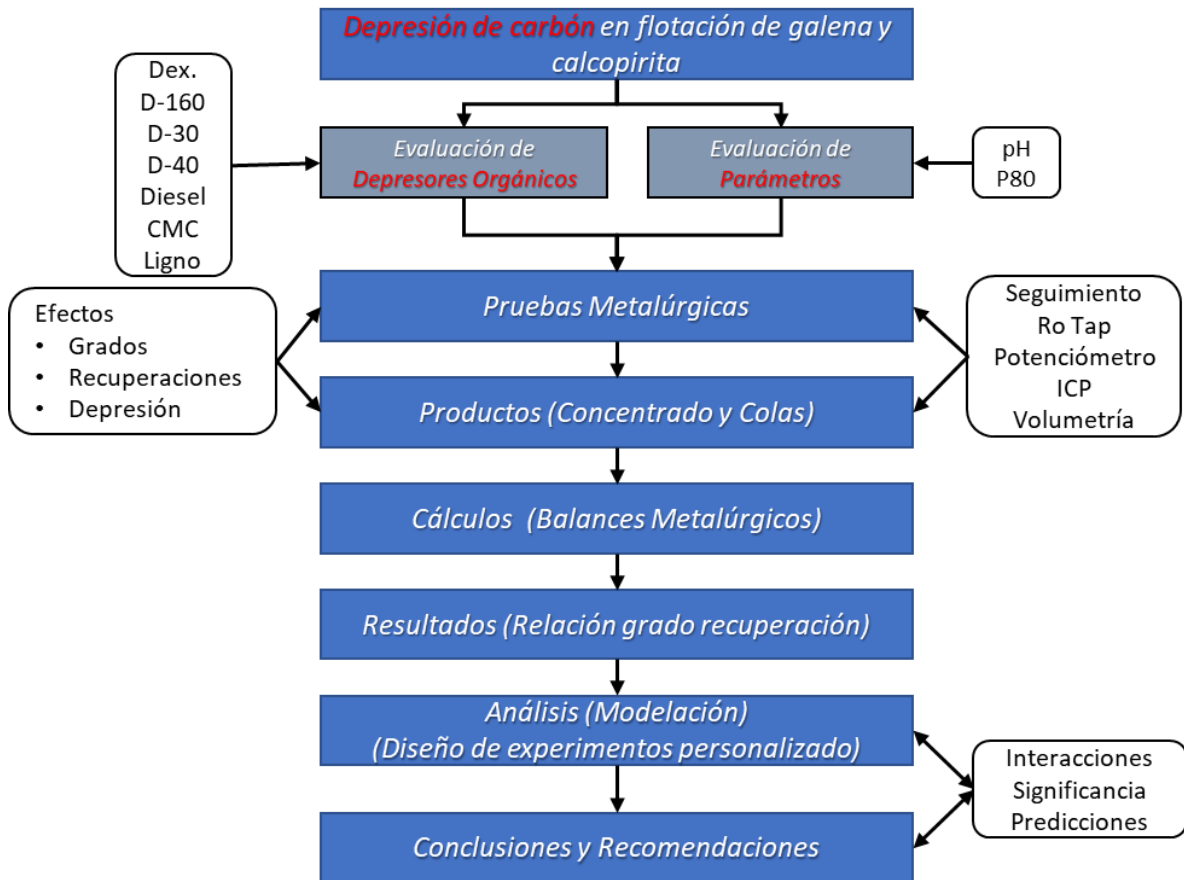


Figura 20 Diagrama de flujo experimentación.

3.

4. Resultados y análisis.

4.1. Documentación histórica de la presencia de carbón

De acuerdo con reportes de estudios modales del programa de geo metalurgia, se identificó presencia de carbón en todos los rebajes evaluados, la concentración oscila entre 1.08 a 4.13% de carbón total, destacando rebaje C-111 con el más alto contenido de carbón, estos rebajes integran los compósitos que se utilizaron en el estudio.

El carbón orgánico también está presente en todos los rebajes con una proporción del 50% del carbón total (ver la tabla 7).

Tabla 6 Presencia de carbón en el mineral (Aguilar., 2016)

ELEMENTO	MUESTRA								
	C-29-02	C-90-02	C-111-01	C-50-B	C-46-inf	C-43-NW2	C-49-06 inf	C-49-07	B-510
Ins. HCl %	41.04	39.14	28.77	35.87	50.86	37.23	51.93	26.00	46.09
SiO ₂ %	35.02	35.58	28.99	35.48	41.75	36.6	15.2	10.5	29.0
Fe %	17.96	17.93	12.95	21.99	13.33	14.72	15.85	25.73	12.48
S %	15.19	19.96	10.70	14.28	9.52	15.34	8.54	22.25	14.20
CaO %	5.71	2.46	14.07	1.55	7.22	4.96	8.94	1.93	15.30
Zn %	4.72	4.59	5.52	4.63	3.11	3.01	1.61	9.11	1.71
Al ₂ O ₃ %	3.26	3.95	3.61	6.89	7.76	5.98	7.91	3.17	7.91
C %	1.96	1.52	4.13	1.08	1.54	1.41	1.56	1.40	1.56
MgO %	1.72	1.71	1.04	1.06	2.20	2.04	1.97	1.17	1.97
Pb %	1.51	2.28	2.49	1.46	0.99	3.10	0.16	0.92	0.50
C org. %	0.96	0.73	0.82	0.81	0.76	0.64	0.84	0.75	0.84
Mn %	0.69	0.35	0.86	0.60	1.20	0.44	0.70	0.21	0.70
Cu %	0.13	0.17	0.22	0.13	0.10	0.24	0.07	0.14	0.07
Cd %	0.044	0.055	0.050	0.046	0.022	0.04	0.008	0.065	0.065
F %	0.029	0.028	0.028	0.027	0.039	0.048	0.047	0.028	0.028
Bi %	0.021	0.013	0.015	0.012	0.004	0.001	0.014	0.018	0.018
Cr %	0.016	0.006	0.088	0.047	0.036	0.041	0.01	0.02	0.02
Sb %	0.011	0.014	0.011	0.011	0.008	0.01	0.01	0.01	0.01
Sn %	0.009	0.002	0.004	0.008	0.004	0.041	0.008	0.002	0.002
Cl %	0.008	0.006	0.003	0.005	0.014	0.007	0.005	0.006	0.006
As %	0.007	0.020	0.058	0.020	0.010	0.020	0.029	0.061	0.061
Ga %	0.006	0.005	0.005	0.008	0.006	0.008	0.010	0.009	0.009
Ni %	0.004	0.007	0.006	0.008	0.005	0.005	0.001	0.002	0.002
Hg %	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
Ba %	0.001	0.027	0.001	0.010	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ge %	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
In %	0.001	0.001	0.006	0.001	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001
Pd %	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Pt %	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Se %	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Te %	0.001	0.001	0.001	0.005	0.002	0.001	0.005	0.008	0.008
Tl %	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Ag g/ton	40.0	83.37	78.57	15.54	21.47	36.56	13.94	31.38	18.23
Au g/ton	0.02	0.07	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01

Se realizó una entrevista con el geólogo encargado del yacimiento con el propósito de conocer la especie portadora de carbón, comentando que el yacimiento, está integrado por tres tipos de mineralizaciones.

Predominando el tipo genético sedimentario exhalativo (sedex) en la parte central, donde las mineralizaciones de plomo, zinc, plata y cobre se encuentra asociados a rocas sedimentarias carbonosas conocidas como lutitas y calizas, el segundo es tipo skarn, se caracteriza muy poca incidencia de material carbonoso en la parte sur y la tercera parte al norte se tiene presencia de una mineralización tipo hidrotermal, donde las mineralizaciones se encuentran asociada como lutitas y calizas, tal condición varios autores han documentado.

4.2. Pruebas metalúrgicas.

4.2.1. Efecto depresor de Dextrina para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.

Debido a la presencia de carbón en la muestra de mineral en estudio, se realizaron pruebas de flotación donde se adiciona un agente depresor de carbón, esto con el objetivo de evaluar la eficiencia en el control de este elemento en la flotación de galena y calcopirita.

Los depresores orgánicos son polímeros que tiene una química más compleja y su mecanismo de interacción no está bien entendido, sus posibles aplicaciones dependen mucho de sus grupos polares activos.

Se realizó a partir de pruebas abiertas de flotación, a tres niveles de adición; bajo 50 g/t, medio 80 g/t y alto de 120 g/t, partiendo de una prueba blanco o sin depresor para poder evaluar su rendimiento con diferentes adiciones, buscando minimizar la recuperación del carbón o aumentar su depresión. Los resultados de las pruebas de flotación se presentan en la [tabla 8](#).

Podemos apreciar en los resultados que la muestra sin adición de un depresor, presenta una recuperación de carbón del 4.51% o un índice de depresión del 95.49% esto nos indica que el carbón presente en este mineral no se recupera o

presenta una depresión natural, por los cambios superficiales que se presenta en el proceso de beneficio del mineral.

Tabla 7 Resultados de evaluación de Dextrina.

Dosificación	Ensayes						Distribución, %						% Depresión C	
	Ag, g/t	Pb, %	Zn, %	Cu, %	Fe, %	%C	Ag, g/t	Pb, %	Zn, %	Cu, %	Fe, %	%C	Global	Cond.
Sin Depresor	703.30	21	3.72	4.11	14.11	8.80	62.05	92.21	3.87	65.33	2.13	4.51	95.49	
Dex-50 gr/ton	878.90	24.50	7.40	5.16	15.55	4.26	62.75	91.61	6.44	68.63	1.99	1.91	98.09	2.60
Dex-80 gr/ton	914.70	32.55	7.07	5.37	15.50	3.42	60.12	90.47	5.21	41.71	1.80	1.30	98.70	3.21
Dex-120 gr/ton	752.60	21.46	7.45	4.38	18.61	4.11	62.62	90.89	7.03	65.69	2.61	1.97	98.03	2.55

En la evaluación de la dextrina como agente depresor la concentración de los elementos de interés mostró una tendencia positiva pero no consistente ya que en la máxima adición se presentó un decaimiento, indicando que este nivel de adición afecta la concentración de estos, pero si se tuvo muy buenos resultados con las adiciones de 50 y 80 g/t, presentado incrementos en plomo de 3.5 a 11.55 unidades de grado respectivamente.

En el caso de cobre también sus resultados fueron positivos registrando un mayor grado 1.06 y 1.26 en el mismo orden, para la plata replicaron la misma tendencia en ambas dosis para primera fueron 175.6 unidades y la segunda 211.4 unidades,

Un aspecto importante por tomar en cuenta es el comportamiento de los resultados metalúrgicos, de los elementos de interés económicos, por el efecto colateral por la adición del agente depresor ya que es conocido que la presencia de carbón en el mineral lo afecta reflejándose en las recuperaciones, por la adsorción de los colectores que se usan para su selección.

En el caso de la plata en los niveles de adición de 50 y 120 g/t., presenta recuperaciones de 62.75% y 62.62%, las cuales son superiores a las obtenidas en la prueba sin depresor 62.05% representando un impacto positivo, como uso de este depresor.

Con relación a las recuperaciones de galena que es la especie que aporta el elemento plomo, para este elemento los resultados en todos los niveles de adición fueron inferiores a las obtenidas en la prueba sin depresor los que indica que el depresor afecta la cinética de flotación de la galena ya que los valores de

recuperación fueron de 90.47% a 91.61% por abajo del 92.21% que se obtuvo con la prueba sin depresor.

Lo anterior se podría fundamentar de acuerdo con adsorción de dextrina en galena con un pequeño incremento aproximadamente a un pH de 9, afectando su cinética de flotación de la galena, ya que la interacción de la dextrina con las superficies hidroxiladas de los cationes metálicos es de naturaleza química a través de la formación de complejos anillados como lo describen ([Laskowski & Liu., 1989](#); [Liu & Yahui 2000](#); [Laskowski & Bolin, 1991](#); [Rath., 2000](#))

Con relación a la recuperación de calcopirita especie mineral que aporta el cobre con la adición de 50 g/t tiene muy buena respuesta ya que el resultado fue superior a la obtenida en la prueba sin depresor en 3.33 unidades de recuperación, esto indicando un resultado positivo, esto derivado a que se manejó un pH 8 lo cual no afecto la cinética de flotación de esta especie, con relación a los artículos ([Laskowski & Liu., 1989](#); [Liu & Yahui 2000](#); [Laskowski & Bolin,1991](#); [Rath., 2000](#))

Para las otras adiciones no mantuvo este comportamiento identificando una baja recuperación.

La depresión de carbón con la adición del reactivo depresor dextrina a diferentes niveles de dosificación podemos identificar que la adición que mayor depresión adicional alcanzo fue la 80 g/t, logrando incrementar la depresión 3.21 unidades, para lograr un 98.70%, dicha depresión se pudo presentar debido a que la dextrina podría aumentar el punto isoeléctrico del carbón, aumentado su hidrofiliidad por humectación de superficie y con esto obtener un buen rendimiento la depresión según ([Yonggai, 2019](#))

La prueba sin depresor obtuvo una depresión del 95.49% es pudo ver sido por las la presencia predominante del maceral inertinita, ya que es el carbón más hidrofílico, por tener una superficie porosa lo cual favorece que el agua queda atrapada y aumenta su afinidad con el agua según lo comenta [Aplan., \(1989\)](#)

4.2.2. Efecto del Diésel como depresor para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.

De acuerdo con los resultados podemos identificar que este agente se presenta un efecto depresor de carbón, ya que logro deprimir adicionalmente 1.80 unidades de depresión adicionales a la depresión natural presentada con las condiciones de la prueba estándar, sin adición del agente depresor, lo podemos observar en la [tabla 9](#).

Tabla 8 Resultados de la evaluación de Diésel como depresor de carbón.

Dosificación	Ensayes						Distribución, %						% Depresión C	
	Ag, g/t	Pb, %	Zn, %	Cu, %	Fe, %	%C	Ag, g/t	Pb, %	Zn, %	Cu, %	Fe, %	%C	Global	Cond.
Sin Depresor	703.30	21	3.72	4.11	14.11	8.80	62.05	92.21	3.87	65.33	2.13	4.51	95.49	
Diesel -20 gr/ton	647.00	19.79	5.68	3.29	14.30	5.05	58.29	86.88	4.68	49.37	2.00	2.72	97.28	1.80

Con la adición de Diésel la concentración de los elementos de interés no fue favorable ya que fueron inferiores a los obtenidos en la prueba donde no se usó depresor, lo que indica que este reactivo influye negativamente en el proceso de concentración de estos.

Con relación a la respuesta que presenta los elementos de interés en este proceso de evaluación podemos apreciar que las recuperaciones fueron inferiores a las obtenidas en la prueba sin el uso del depresor, lo que representa una condición adversa, ya que si afecta la cinética de flotación de estos.

La recuperación de plata con adición del Diésel fue de 58.29 % por debajo 3.76 unidades de recuperación con relación a la prueba donde no usamos depresor ya que esta obtuvo 62.05%, en el caso del elemento plomo se obtuvo una recuperación de 86.88%, con relación a la prueba sin depresor este resultado fue inferior 5.33 unidades, ya que dicha prueba obtuvo un 92.21% de recuperación de plomo.

El cobre también mostró la misma tendencia, pero en mayor magnitud ya que se logró una recuperación de 49.37%, que representa un resultado 15.96 unidades de recuperación por debajo de la prueba sin uso de depresor que logro una recuperación de 65.33%.

Como se pudo apreciar la adición del diésel como depresor afecto los resultados metalúrgicos esto se puede atribuir a su capacidad para humectar superficies hidrófobas (Ron, 2001). Con el agua forma súper agregados lo cual provoca un cambio de fase (Eastop, 1998).

Como se había comentado este agente depresor si presento un efecto positivo en la **depresión del carbón** ya que su adición en la prueba se alcanzó una depresión de este elemento 97.29%. Por lo tanto, el Diésel es un posible depresor para el carbón donde las moléculas deberían adsorberse en la superficie del carbón con la cadena de hidrocarbonada, dirigida a la fase acuosa volviendo más hidrofílica la superficie del carbón (Eastop, 1998).

4.2.3. Efecto del Naftaleno como depresor para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.

Como resultado del conjunto de pruebas de evaluación del agente **Naftaleno Flottec (D-160)**. Se corrieron pruebas a tres niveles de adición para hacer un barrido y poder identificar la adición que presenta los mejores resultados en los que respecta a la depresión del carbón, sin afectar la cinética de flotación de los elementos principales de valor económico.

Los resultados se pueden apreciar en la **tabla 10**. El agente depresor si logra deprimir el carbón adicionalmente al que no se recupera por efectos físicos que aporta la molienda del mineral.

Tabla 9 Resultados de la evaluación de Naftaleno D-160 como depresor de carbón.

Dosificación	Ensayes						Distribución, %						% Depresión C	
	Ag, g/t	Pb, %	Zn, %	Cu, %	Fe, %	%C	Ag, g/t	Pb, %	Zn, %	Cu, %	Fe, %	%C	Global	Cond.
Sin Depresor	703.30	21	3.72	4.11	14.11	8.80	62.05	92.21	3.87	65.33	2.13	4.51	95.49	
D-160 - 60 gr/ton	765.60	23.14	9.53	4.60	16.84	4.26	63.81	91.13	9.13	70.16	2.29	2.09	97.91	2.42
D-160 - 90 gr/ton	774.80	21.68	8.23	4.66	18.35	3.69	60.67	87.37	6.71	67.39	2.21	1.63	98.37	2.88
D-160 - 180 gr/ton	1014.00	27.56	9.51	6.39	18.88	1.64	55.56	76.76	6.21	66.72	1.77	0.53	99.47	3.98

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron de las pruebas donde se realizó la avaluación del depresor D-160 a diferentes niveles de adición, podemos identificar que conforme se incrementó la adición del agente la concentración de los

elementos de interés fue mejorando su concentración o grado lo que representa una respuesta positiva en cuanto al proceso de beneficio de las especies de valor.

Logrando incrementar en plomo 6.56 unidades con la máxima adición del depresor, para cobre el incremento represento 2.28 unidades de grado, para el caso de la plata fueron 311 unidades, esta condición se puede atribuir a la depresión del carbón y algunas otras especies de la ganga no sulfurosa, que tiene como efecto una redistribución de las leyes de los elementos incrementándose su concentración efecto considerado positivo.

El comportamiento del elemento plata con la adición de este agente depresor presento el siguiente comportamiento, con la adición baja a 60 g/ton favoreció su recuperación ya que obtuvo 63.81% que representa 1.76 unidades por arriba de la obtenida en la prueba con depresor, pero conforme se fue incrementando su adición la recuperación de plata fue bajando.

Podemos apreciar una asociación de plata con el carbón ya que en la dosificación más alta del depresor se obtiene 55.56% de recuperación de plata, que representa 6.49 unidades de recuperación por debajo de la prueba sin uso del depresor que fue 62.05%.

El elemento plomo presento también recuperaciones por debajo a los obtenidos en la prueba con el uso de depresor, pero en menor escala, pero si fue bajando conforme se incrementó la adición del depresor ya que en la máxima adición se obtuvo una recuperación de 76.76% que represento una recuperación baja en 15.45 unidades de recuperación ya que la prueba sin depresor obtuvo 92.05%.

El cobre mostró un comportamiento positivo con este agente depresor ya que en todos los niveles de adición sus recuperaciones fueron superiores a la obtenida con la prueba sin uso de agente depresor, logrando la máxima recuperación de 70.16%, que representa un incremento en recuperación 4.83 unidades de recuperación con relación al obtenido en la prueba sin depresor que fue de 65.33%.

Con relación a la depresión del elemento carbón este agente depresor mostró un comportamiento ascendente conforme se fue incremento la adición del reactivo,

donde se logró alcanzar una máxima de depresión adicional de 3.98 unidades, con la adición de 180 g/ton para alcanzar una depresión global de 99.47%, ya que el núcleo del naftaleno se absorbe sobre la superficie de las partículas de carbón, con el radical sulfonato apuntando al agua, modificando la tensión superficial de las partículas donde disminuye debido a la asociación entre el radical sulfonato de la molécula de Naftaleno Sulfonato y el hidrogeno en el agua de acuerdo con el estudio realizado por [Xu y col., \(2009\)](#)

4.3.4. Pruebas de evaluación de dextrina y Flottec D-160 con variación de adición y agentes colectores.

Otra condición evaluada fue la variación de dosificación de colector, así como la mezcla de algunos colectores, esto como otra alternativa de control de carbón en la flotación de galena y calcopirita. En la primera fase se realizaron las pruebas usando como depresor la dextrina a una dosificación fija de 50 g/t, manejando dos colectores, el colector primario la [aerophine 3418](#) a diferentes niveles de adición desde 50 a 118 g/t, y una dosificación del colector secundario [X-343](#) fija de 5 g/t

Los resultados muestran que se mejoró la recuperación de plata y se incrementó la depresión de carbón como resultado de esta condición que se puede apreciar en la [tabla 11](#).

Tabla 10 Resultados de la evaluación de Dextrina y colector Ap-3418.

Dosificación	Colectores		Ensayes							Distribucion (%)							% Depresión C	
	XIP	AP	Ag,g/t	Pb,%	Cu,%	Zn,%	C,%	Fe,%	Ins,%	Ag	Pb	Cu	Zn	C	Fe	Ins	Global	Cond.
Sin Depresor	STD	STD	703.30	20.76	4.11	3.72	8.80	14.11	21.30	62.95	93.55	66.28	3.92	4.58	2.16	0.72	95.42	
Dex - 50 g/t	5	118	808	35.67	4.153	4.012	4.125	12.38	15.6	69.2	81.5	53.4	3.0	1.9	1.6	0.5	98.05	2.63
	5	89	921	40.97	4.747	4.039	2.746	12.36	12.8	71.2	85.0	56.4	2.7	1.2	1.4	0.4	98.84	3.41
	5	50	1139	44.93	5.368	3.66	1.823	11.52	10.6	62.3	73.1	48.9	1.9	0.6	1.1	0.2	99.40	3.97

Con relación a los resultados obtenidos en la concentración de los elementos de interés, que conforme de disminuye la adición de colector la flotación se torna más selectiva y los grados de los elementos de interés se incrementan considerablemente ya que en la más baja adición se logra para plomo un incremento de 24.17 unidades que representa más del 100%, con relación a la prueba sin depresor.

El cobre mostró la misma tendencia logrando un incremento en la mínima adición del colector de 1.25 unidades, para plata no fue la excepción se logró un aumento de 436 unidades.

El comportamiento de las recuperaciones de los elementos de interés mostró resultados positivos para plata en las dos más altas adiciones de los colectores con recuperaciones por arriba de la prueba con depresor, 7.7 unidades para la adición 118 g/t de Ap 3418, y 8.3 unidades con 80 g/t de Ap 3418, en lo que respecta a plomo y cobre en todos los niveles de adición de colectores sus recuperaciones fueron inferiores a la prueba sin depresor, se puede deducir que al deprimir el carbón, este viene asociado con estos elementos por tal motivo sus recuperaciones son afectadas.

El comportamiento del carbón con la variación de colectores principalmente el primario ya que el secundario se manejó fijo en 5 g/t en todas las pruebas de pruebas, conforme se estuvo bajando las adiciones del colector, la depresión del carbón mostró un aumento en la depresión, ya que en la más baja adición de colector 50 g/ton se tiene el más alto índice de depresión 4 unidades adicionales.

La segunda fase de pruebas con variación de colectores consistió, dejar fuera el colector secundario y solo manejar el colector primario variando su adición desde 50 a 117 g/t. donde la recuperación de plata se vio favorecida y se obtuvo un incremento en la depresión de carbón, que se puede apreciar en la [tabla 12](#), donde se puede ver que la eliminación de X-343 favorece la depresión de carbón, pero afecta las recuperaciones del plomo y cobre.

Tabla 11 Resultados de la evaluación dextrina sin colector X-343.

Dosificación	Colector	Ensayes							Distribucion (%)							% Depresión C	
		Ap-3417	Ag,g/t	Pb,%	Cu,%	Zn,%	C,%	Fe,%	Ins,%	Ag	Pb	Cu	Zn	C	Fe	Ins	Global
Sin Depresor	STD	703.30	20.76	4.11	3.72	8.80	14.11	21.30	62.95	93.55	66.28	3.92	4.58	2.16	0.72	95.42	
Dex - 50 g/t	117	1007	46.47	4.66	4.17	1.20	9.37	10.60	82.6	88.0	58.4	2.5	0.4	1.0	0.3	99.57	4.14
	80	1101	48.29	4.92	3.86	1.27	9.67	9.50	77.4	84.4	55.1	2.2	0.4	1.0	0.2	99.57	4.14
	50	1111	46.29	5.07	4.51	1.54	10.60	8.30	69.5	85.7	60.5	2.8	0.6	1.2	0.2	99.36	3.94

En esta condición de la concentración de los elementos de interés superan los resultados obtenidos en la prueba sin depresor, y se observa una tendencia positiva conforme su adición disminuye ya que en la adición de colector de 50 g/t se

obtuvieron 25.53 unidades adicionales de plomo, 0.96 de cobre y 408 de plata sobre la prueba sin depresor, con 80 g/t el resultado fue para plomo 27.53 unidades, 0.81 de cobre, 398 de plata, para la adición de 117 g/ton el plomo presento 25.71 unidades de grado, 0.55 de cobre y 304 g/t de plata.

Las recuperaciones en estas pruebas bajo las condiciones antes descritas tuvieron el siguiente comportamiento, para la plata fue en los tres niveles de adición de colector superior a la obtenida en la prueba sin colector, mostrando una tendencia a la baja mientras se disminuía su dosificación, esto oscilo de 19.7 a 6.6 unidades.

El plomo mostró recuperaciones inferiores a la obtenida en la prueba sin depresor en todos los niveles de adición mostrando una ligera tendencia a la baja conforme se reduce la adición del colector.

El comportamiento del cobre fue a la baja con relación a la prueba sin depresor, mostrando un comportamiento irregular ya que la recuperación obtenida en la dosificación más baja fue de 60.5 % mayor a la de más alta adición que fue 58.4%.

Con relación al efecto de la depresión del carbón en estas pruebas donde se dejó fuera el colector secundario X-343 y se varió en tres niveles la adición del colector primario los resultados estuvieron muy parejos en lo que respecta a la depresión, logrando en promedio 4 unidades adicionales de rechazo para alcanzar niveles por arriba del 99% de la depresión global.

La tercera fase consistió hacer cambio de depresor de dextrina a D-160 con una dosificación fija de 90 g/t. manejando solamente la adición del colector primario en diferentes niveles de adición de un mínimo de 20 g/t y un máximo de 63 g/t. donde los resultados en lo que respecta a recuperaciones de los elementos de interés fueron en general bajas y la depresión del carbón no fue sobresaliente, lo podemos ver en la [tabla 13](#).

Tabla 12 Evaluación de la D-160 reduciendo colector Ap-3418.

Dosificación	Colectores	Ensayes							Distribucion (%)						% Depresión C		
		AP-3418	Ag,g/t	Pb,%	Cu,%	Zn,%	C,%	Fe,%	Ins,%	Ag	Pb	Cu	Zn	C	Fe	Ins	Global
Sin Depresor	STD	703.30	20.76	4.11	3.72	8.80	14.11	21.30	62.95	93.55	66.28	3.92	4.58	2.16	0.72	95.42	
D-160 90 g/t	63	966	41.46	5.32	4.59	3.20	10.89	9.38	55.9	77.5	58.5	2.7	1.2	1.4	0.3	98.77	3.34
	35	1066	47.70	6.06	3.87	5.89	10.15	5.50	54.8	76.6	58.7	2.0	2.0	1.1	0.1	98.02	2.60
	20	1309	56.40	4.88	2.59	0.78	7.66	4.70	50.3	64.1	30.8	0.9	0.2	0.5	0.1	99.84	4.42

El comportamiento mostrado en estas pruebas donde se manejaron adiciones bajas de colector primario la concentración de los elementos de interés mostró muy buenos resultados ya que se obtuvieron resultados en este rubro superior a los de la prueba sin depresor y muy significativas para plata fueron de 262.7 a 605.7 unidades adicionales.

En el plomo fue 20.7 a 35.64 unidades, en el cobre mostró un comportamiento irregular presentando variaciones en su concentración, pero superiores a la obtenida en la prueba sin colector.

Las recuperaciones obtenidas en estas pruebas bajo la condición antes mencionada fueron inferiores a la que se obtuvo en la prueba sin depresor, mostrando una tendencia a la baja conforme se reduce la adición del colector.

El comportamiento de la depresión de carbón bajo estas condiciones continúa reflejando una depresión adicional siendo la más alta la de menor dosificación de colector con 4.4 unidades, sobre la depresión natural.

La cuarta fase consistió en manejar dos colectores el primario y secundario variando su relación entre ellos, 1:1, 2:1 y la reducción del 50% la adición con proporción 2:1, en esta ocasión el colector primario fue el promotor Aerophine 3418 y el secundario Ap 2202, donde los resultados en relación con los elementos de interés fueron inferiores a la prueba blanca o sin depresor, registrándose un incremento en la depresión del carbón, como se muestra en la [tabla 14](#).

Tabla 13 Evaluación de D-160 colectores Ap-2202 y Ap-3418.

Dosificación	Col. AP		Ensayes							Distribucion (%)							% Depresión C	
	2202	3417	Ag,g/t	Pb,%	Cu,%	Zn,%	C,%	Fe,%	Ins,%	Ag	Pb	Cu	Zn	C	Fe	Ins	Global	Cond.
Sin Depresor	STD	STD	703.30	20.76	4.11	3.72	8.80	14.11	21.30	62.95	93.55	66.28	3.92	4.58	2.16	0.72	95.42	
D-160 90 g/t	35	35	1044	48.22	4.92	3.33	0.96	8.66	7.20	57.9	78.5	50.2	1.7	0.3	0.8	0.2	99.71	4.28
	40	21	1258	53.32	5.76	2.75	0.89	8.73	4.10	51.0	64.6	39.7	1.0	0.2	0.6	0.1	99.79	4.37
	16	9	1434	53.69	6.44	2.41	1.19	8.80	3.10	54.5	60.5	42.2	0.9	0.3	0.6	0.1	99.72	4.29

El comportamiento mostrado de la [concentración](#) en los elementos de interés fue positiva, ya que se obtuvieron para plata de 340.7 a 730.7 unidades de grado adicionales sobre la obtenida en la prueba sin depresor, en el caso de plomo presento el mismo comportamiento donde se obtuvieron concentraciones

superiores desde 27.46 a 32.93 unidades, para el cobre fue desde 0.81 a 2.33 unidades de grado.

En lo que respecta a las recuperaciones obtenidas con el esquema de reactivos anteriormente descrito, no fueron satisfactorias ya que estas fueron inferiores, para todos los elementos en todos los niveles en relación con las obtenidas en la prueba de referencia sin depresor.

Con relación a la depresión de carbón con este esquema químico mostró muy buen nivel de depresión ya que se obtuvieron arriba de 4.3 unidades de depresión por arriba de la obtenida en la prueba donde no se usó depresor y el esquema estándar de colectores.

La quinta fase se mantuvo las adiciones de los colectores similar a la fase cuatro, incrementando al doble la dosificación del depresor de carbón D-160, donde los resultados en lo que respecta a las recuperaciones de los elementos de interés económico fueron inferiores a la prueba sin depresor, en lo que respecta a la depresión de carbón mostraron buen nivel adicional de depresión, se puede apreciar en la [tabla 15](#).

Tabla 14 Evaluación de incremento D-160 con colectores específicos.

Dosificación	Col. AP		Ensayes							Distribucion (%)						% Depresión C		
	2202	3417	Ag,g/t	Pb,%	Cu,%	Zn,%	C,%	Fe,%	Ins,%	Ag	Pb	Cu	Zn	C	Fe	Ins	Global	Cond.
Sin Depresor	STD	STD	703.30	20.76	4.11	3.72	8.80	14.11	21.30	62.95	93.55	66.28	3.92	4.58	2.16	0.72	95.42	
D-160 180 g/t	35	35	1180	48.99	6.04	5.20	0.66	10.62	6.60	64.0	77.1	55.8	2.7	0.2	1.1	0.2	99.78	4.35
	40	21	1032	41.18	5.36	11.64	0.79	11.01	4.90	61.4	72.5	55.2	6.6	0.3	1.2	0.1	99.72	4.29
	16	9	1397	46.16	8.54	6.64	0.92	13.84	3.10	53.8	45.2	52.1	2.2	0.2	0.9	0.0	99.81	4.38

La **concentración** de los elementos de interés con este esquema químico fue positiva con buenos márgenes de incremento en plomo hasta un 100% mayor, para el cobre de un 50 a 100% y para plata mostró un comportamiento similar al cobre.

En lo que respecta a las recuperaciones obtenidas con este esquema de reactivos, no fueron satisfactorias, ya que solamente la plata en el mayor nivel de adición mostró un resultado superior al obtenido por la prueba sin colector con 1.1 unidades de recuperación adicionales. Ya que los demás niveles de adición fueron inferiores para los otros elementos en todos los niveles, las recuperaciones fueron inferiores a las obtenidas en la prueba de referencia sin depresor.

Con relación a la depresión de carbón con este esquema químico mostró muy buen nivel de depresión ya que se obtuvieron arriba de 4.3 unidades de depresión adicionales por arriba de la obtenida en la prueba donde no se usó depresor y el esquema estándar de colectores.

Los resultados mostrados en las pruebas donde se estuvo variando las adiciones de los colectores, así como los tipos de colectores se caracterizaron por mejorar las leyes de los elementos de interés esto es atribuible a que al reducir este agente la flotación se torna más selectiva, ya que se adsorben sobre los sulfuros que son los que tiene prioridad por ser reactivos específicos, que al agregar más de lo necesario después de coleccionar los sulfuros proceden a coleccionar la ganga no sulfurosa que está integrada por carbonatos silicatos, óxidos y las lutitas.

Las recuperaciones obtenidas fueron muy variables y con tendencia a la baja, ya que al reducir los colectores aumenta la sensibilidad, donde las partículas mixtas producto de las asociaciones de minerales con la ganga no sulfurosa con contenidos de carbón reaccionan a las acciones de los depresores, también esto se puede atribuir por la competencia que se presenta entre colectores y depresores por las superficies de las partículas donde en ocasiones los depresores ganan la preferencia.

Así como lo comenta [Wark y Cox, \(1934\)](#), deberá de existir una relación constante entre la concentración del colector y depresor. Significa que, si la concentración del colector aumenta en la solución, para obtener la depresión de flotación debemos agregar más depresor y que la relación estequiométrica.

La reducción de colectores presentó un impacto significativo en la depresión de carbón ya que se incrementó este fenómeno, esto debido a la competencia que se presenta entre los colectores y depresores por las superficies de las partículas de carbón donde el depresor tuvo una variación con tendencia al alza y el colector en sentido inverso.

4.3.5. Evaluación de potencial hidrogeno y el tamaño de partícula en depresión de carbón.

Adicional a la manipulación del **potencial hidrogeno (pH)** y el **tamaño de partícula (F80)** se realizaron con adiciones de los depresores D-160 y Dextrina mostrar mayor consistencia en sus resultados.

En esta etapa de la investigación se pretendió evaluar la influencia del pH y el tamaño de partícula en el control del carbón en la flotación de galena y calcopirita. Del mismo modo, para la flotación inversa del carbón, los efectos de los iones OH⁻ y H⁺ son importantes no solo para flotar la materia mineral sino también para deprimir el carbón, así como las interacciones entre el carbón y los colectores.

Por tal motivo en esta primera fase se manejaron tres niveles de P80, un pH bajo de 6.0, con adición de depresor D-160 a 90 g/t, con el fin de encontrar algún comportamiento, tanto de los elementos de valor económico como de la depresión del carbón, donde se registran variaciones en los resultados que podemos observar en la **tabla 16**.

Esta es la causa por las que en sustancias naturalmente hidrofóbicas al molerse muestran una tendencia a ser hidrofílicas.

Tabla 15 Evaluación pH 6, F80 y D-160 en depresión de carbón.

Dosificación	pH	F80 Micrones	LEYES								RECUPERACION								DEPRESIÓN	
			Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	%Ag	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	%C	%COT
D-160/ 90gr/ton	6.00	20.70	157.60	4.45	2.12	0.83	10.15	24.91	3.15	2.12	77.03	91.70	9.10	76.53	6.41	5.27	10.34	18.85	89.66	81.15
		24.00	162.14	4.78	2.42	0.98	13.16	33.97	6.16	4.24	69.96	91.33	8.54	77.52	6.64	5.82	14.87	33.05	85.13	66.95
		27.60	187.91	4.93	2.43	1.06	14.64	27.05	3.26	1.81	98.51	76.37	7.26	74.76	6.60	4.21	7.43	12.64	92.57	87.36

La **concentración** de los elementos de valor en las pruebas donde se manejó un pH 6 y variando la granulometría se identificó que a tamaños más gruesos favorece la concentración. En el plomo se registró un incremento de 0.38 unidades, cobre 0.23 unidades y plata 30.30 unidades.

Las **recuperaciones** presentaron cada elemento diferentes comportamientos, la plata se incrementó a tamaños más gruesos 21.48 unidades, el plomo presento un comportamiento inverso a tamaños más finos incremento 15.33 unidades, en cambio el cobre presento su mejor resultado en el rango medio con 77.52 % de recuperación.

Con respecto a la **depresión del carbón**, la evaluación se realizó con la determinación de carbón y carbón total, donde se identificó que la mayor depresión de carbón bajo las condiciones de valuación se da en los tamaños más gruesos de 92.57 % en el F80 de 27.6 micrones.

Otra condición que se evaluó fue con los mismos **F80** y adición del depresor manejando un **pH 10** para ver el comportamiento de los elementos tanto de valor económico como el carbón. Esto lo podemos observar en la **tabla 17**, donde se muestran las leyes, recuperaciones y depresión del carbón.

El depresor más simple que compite con el colector por los lugares en la superficie de las partículas son iones hidrógeno (H⁺). Mientras que la cal, el carbonato de sodio y la soda cáustica (NaOH) regulan la alcalinidad en flotación.

Tabla 16 Evaluación depresión de carbón a pH 10, F80 y D-160.

Dosificación	pH	F80 Micrones	LEYES								RECUPERACION								DEPRESIÓN	
			Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	%C	%COT
D-160/ 90gr/ton	10	20.7	234.55	6.98	2.88	1.27	13.13	30.85	4.19	1.98	76.69	89.67	7.35	70.34	4.83	4.05	7.36	12.92	92.6	87.1
		24	165.34	4.72	2.03	0.96	12.76	34.32	5.94	4.05	68.20	87.38	7.00	68.21	6.10	5.63	13.82	30.41	86.2	69.6
		27.6	178.69	5.13	2.13	1.06	12.32	32.26	6.52	4.34	93.67	89.94	6.81	74.47	5.70	4.78	13.69	32.40	86.3	67.6

Las mejores **concentraciones** bajo estas condiciones de pruebas se presentaron en los tamaños finos donde el plomo se obtuvo un grado de 6.98%, cobre 1.27% y plata 234.55 g/t los más altos de esta serie.

Las **recuperaciones** de los elementos de valor económico se registraron en tamaños gruesos, la plata se obtuvo una recuperación 93.67%, el plomo registro una recuperación 89.94%, cobre 74.47%.

Los niveles máximos de **depresión de carbón** se presentaron en los tamaños finos donde se logró una depresión de 92.6%.

Con la evaluación de la influencia de granulometría **F80 y el pH** en la depresión de carbón, también se complementó con el cambio de agente depresor para conocer su comportamiento con la variación de estas dos condiciones y buscar la mejor relación para el control de carbón en la flotación de galena y calcopirita.

Los resultados de estas pruebas los podemos observar en la siguiente [tabla 18](#), donde mostramos las leyes, recuperaciones y depresión de carbón con el uso de la dextrina con una dosificación de 50 g/t, a pH 6 y con dos niveles de F80 20.4 micrones y 27.6 micrones.

Como se ha comentado con anterioridad el depresor más simple que compite con el colector por los lugares en la superficie de las partículas son iones hidrógeno (H⁺). Los iones de hidrógeno regulan simultáneamente la acidez de las soluciones.

Con relación al P80 es importante, ya que para poder separar el carbón de los elementos de valor es necesario liberar, para esto debemos de buscar un tamaño de corte donde se presente mejor resultado de separación evaluando el tamaño de partícula, con relación a esta condición el trabajo realizado en la depresión de carbón. (Stonestreet & Franzidis, 1989; Ding & Laskowski, 2006; Pawlik & Laskowski 2003) o finamente muestras de carbón molido, (Patil y col., 2008; Zhang y col., 2013; Vamvuka y col., 2001) estudiaron la respuesta de individuos fracciones de tamaño (+300 µm, -300 + 75 µm y - 75 µm).

El rango de tamaño de partícula de -300 + 75 micrones, se consideró ser óptimo para el proceso de flotación inversa según Zhang y col., (2013).

Tabla 17 Evaluación depresión de carbón a pH 6, F80 y Dextrina.

Dosificación	pH	F80 Micrones	LEYES								RECUPERACION								DEPRESIÓN	
			Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	%C	%COT
Dext 50gr/ton	6	20.4	226.189	5.69	2.64	1.39	13.51	34.38	3.72	2.19	75.12	75.80	6.56	75.41	4.66	4.15	6.65	11.17	93.35	88.83
		27.6	194.423	5.27	2.48	1.12	13.35	32.94	4.75	3.18	<u>75.46</u>	82.23	6.92	<u>75.48</u>	5.06	4.70	10.09	21.75	89.91	78.25

Con relación a las [leyes](#) de los elementos de valor, podemos apreciar con los mejores valores obtenidos fueron en los tamaños finos como es de esperarse a molindas finas mejor calidad de concentrados, el plomo registro una ley de 5.69%, cobre 1.39% y plata 226.189 g/t.

Las [recuperaciones](#) presentaron el siguiente comportamiento, las más altas se obtuvieron en los tamaños gruesos 75.46 % para plata, 82.23% plomo y 75.48% cobre.

El comportamiento del carbón bajo las condiciones en las que se corrieron estas pruebas fue el siguiente, los mayores niveles de depresión se registraron en los tamaños finos donde se logró un 93.35% de **depresión**, esto lo podemos observar en la **figura 58**.

Continuando con la evaluación del **pH** y la granulometría **F80** y el agente depresor es esta serie de pruebas se está manipulando el pH subiendo a niveles alcalinos con pH 10 manteniendo el mismo agente depresor y los tamaños de partícula, los resultados se muestra en la **tabla 19**, donde se puede apreciar a las leyes, recuperaciones y niveles de depresión.

El agua contiene iones H⁺ y OH⁻ susceptibles de adsorberse en una superficie sólida, dependiendo del pH; en consecuencia, una superficie sólida mojada por agua posee en general una carga superficial no nula.

Tabla 18 Evaluación depresión de carbón a pH 10, F80 y Dextrina.

Dosificación	pH	F80 Micrones	LEYES								RECUPERACION								DEPRESIÓN	
			Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	Ag g/t	%Pb	%Zn	%Cu	%Fe	%Ins	%C	%COT	%C	%COT
Dext 50gr/ton	10	20.4	170.644	5.34	2.13	0.96	13.43	32.64	5.40	3.39	66.43	<u>88.69</u>	6.63	73.54	6.18	5.68	12.62	25.36	87.38	74.64
		27.6	165.239	4.69	1.91	0.89	12.60	30.98	5.91	4.05	74.95	85.42	6.58	71.05	6.54	5.98	15.08	34.35	84.92	65.65

Bajo estas condiciones de las pruebas los mejores resultados de **leyes** de producto se dieron con los tamaños finos donde el plomo logro un grado de 5.34 %, cobre 0.96 % y plata 170.6 g/t.

Las **recuperaciones** presentaron el siguiente comportamiento, la plata mostró mayores recuperaciones 74.95% en los tamaños gruesos, el plomo tuvo la mayor recuperación 88.69% en los tamaños finos, el mismo comportamiento presento el cobre donde logró una recuperación de 73.54%.

El comportamiento del carbón bajo estas condiciones presento los siguientes resultados la mayor **depresión** se dio en los tamaños finos en el F80 = 20.70 µm, donde se obtuvo un 87.38 % de depresión.

En estas pruebas se aprecian condiciones del proceso donde se puede identificar las interacciones fisicoquímicas y sus efectos en el proceso, como la sobre molienda

afecta el proceso de depresión y la adición de agentes químicos compensan en ocasiones minimizan los impactos o los maximizan.

4.3.6. Evaluación del D-30 (Compuesto Azo), D-40 (Nigrosina), CMC, D-160 (Naftaleno), Dextrina y lignosulfonato.

Como depresores de carbón en un mineral que presentó menor depresión natural y mayor complicación en su beneficio por alta recuperación de carbón.

4.3.6.1. Evaluación depresor D-30 (Compuesto Azo).

Se inició la evaluación con las pruebas donde se utilizó el agente depresor **D-30 (compuesto Azo)**, variando sus adiciones en tres niveles, bajo 60 g/ton, medio 90 g/ton y alto 120 g/ton, partiendo con una prueba sin adición de agente depresor para determinar la efectividad de este reactivo.

Se presentan las leyes tanto de los elementos de valor económico, como sus recuperaciones y porcentaje de depresión, donde podemos apreciar que la muestra sin adición de depresor presento una recuperación de carbón del 21%, lo que represento un nivel de depresión de solamente 79%, muy inferior a los manejados en las primeras fases de esta evaluación donde se maneja depresiones por arriba del 90%, como se muestra en la [tabla 20](#).

Tabla 19 Evaluación D-30 Compuesto Azo como depresor de carbón.

Dosificación		LEYES g/t, %							% Recuperación							% Depresión C	
		Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Global	Condición
Nombre	g/t	g/t	%						%							%	
Sin Depresor		128.56	4.64	2.00	0.62	11.02	45.35	6.06	62.94	93.52	11.93	78.22	9.62	9.96	21.00	79.00	
D-30 AZO	60	210.32	6.83	2.36	0.89	11.11	39.44	6.35	59.86	92.27	9.96	76.93	6.79	5.73	15.07	84.93	5.93
	90	189.57	6.79	2.73	0.93	11.28	37.83	5.91	69.64	92.13	11.41	78.36	6.96	5.73	14.55	85.45	6.45
	120	213.38	7.40	2.90	1.03	11.32	45.03	5.24	70.96	93.74	10.50	77.95	6.15	6.04	15.07	84.93	5.93

El comportamiento de las **leyes** de los elementos de valor, con la adición de este depresor, nos muestra que todas las leyes fueron superiores a la prueba sin depresor registrando incrementos para plomo de 3.24 unidades, en cobre de 0.41 unidades y plata 84.82, estas condiciones de prueba favorecieron la concentración de los elementos de interés.

Con respecto a la [recuperación](#) mostró los siguientes comportamientos, para plata conforme se incrementó la adición del agente depresor fue mejorando la recuperación hasta alcanzar 8.02 unidades adicionales, en el caso del plomo en los dos primeros niveles de dosificación la recuperación estuvo por debajo de la prueba sin depresor, solamente la de más alta adición logro 0.22 unidades de recuperación adicionales.

El cobre en la adición media mostró una recuperación ligeramente superior a los resultados de la prueba sin depresor 0.14 unidades de recuperación.

Con respecto a la [depresión del carbón](#) el agente depresor D-30 (compuesto Azo) mostró consistentemente un nivel de depresión del carbón arriba de 5 unidades adicionales, registrando el más alto índice depresión en la dosificación media 6.46 unidades.

La interacción de estos compuestos aromáticos que absorben energía electromagnética en el rango visible (350-700 nm). Es posible determinar su presencia en la superficie de las partículas de carbón, esto se puede atribuir a que presentan en su estructura, grupos cromóforos que se caracterizan por un sistema de electrones deslocalizados con dobles enlaces conjugados y auxocromos, cuyos grupos funcionales presentan la capacidad de donar electrones ([Zee, 2002](#)).

Este agente depresor afecta menos las recuperaciones de los elementos de interés, y buen nivel de depresión.

4.3.6.2. Evaluación del depresor D-40 (Nigrosina).

Continuando con la evaluación de agentes depresores de carbón, en esta serie de pruebas se pretendió evaluar el reactivo depresor [D-40 \(Nigrosina\)](#), a tres niveles de dosificación partiendo de 60 g/t con nivel bajo, 90 g/t medio y 120 g/t alto, como se muestra en la [tabla 21](#).

Donde se presenta los resultados de leyes, recuperaciones e índice de depresión obtenida con estas condiciones donde se aprecia alta recuperación de carbón en la prueba sin uso de depresor de 21%, indicando que estamos trabajando con una muestra con mayor problema de carbón.

Tabla 20 Evaluación depresor de carbón D-40 (Nigrosina).

Dosificación		LEYES g/t, %							% Recuperación							% Depresión C	
Nombre	g/t	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Global	Condición
Sin Depresor		128.56	4.64	2.00	0.62	11.02	45.35	6.06	62.94	93.52	11.93	78.22	9.62	9.96	21.00	79.00	
D-40 Nigrosina	60	180.13	6.91	2.38	0.98	10.98	39.04	6.78	64.62	93.57	9.11	77.80	6.23	5.53	15.35	84.65	5.65
	90	183.94	6.80	2.45	0.95	11.18	38.15	6.01	66.84	93.52	9.77	77.34	6.55	5.29	13.66	86.34	7.34
	120	219.47	8.29	3.07	1.15	11.09	36.43	5.53	62.49	91.80	10.04	77.75	5.41	4.41	10.79	89.21	10.21

El comportamiento de las **leyes** de los elementos de valor, fueron positivos ya que todas fueron superiores a la obtenida en la prueba en la que no se adiciono depresor, en el caso del plomo, en la dosificación más alta logro concentrar 3,65 unidades adicionales, el cobre 0.53 unidades, en plata 90.91 unidades.

Las **recuperaciones** obtenidas en esta serie de pruebas tuvieron el siguiente comportamiento, para plata en la dosificación baja y media se obtuvo una recuperación superior a la de la prueba sin depresor, caso similar para el plomo, el cobre mostró recuperaciones inferiores en los tres niveles a la prueba de referencia.

La Nigrosina como agente depresor, presento los siguientes resultados en los tres niveles de adición presento el efecto de depresión y fue aumentando conforme se fue incrementando la adición en el nivel bajo 60 g/t logro 5.65 unidades, en el nivel medio 90 g/t 7.34 unidades y en el nivel alto 120 g/t 10.21 unidades.

Los colorantes tipo azo, se caracterizan por tener al menos un grupo cromóforo azo (-N=N-) en su estructura química, Este grupo de colorantes se caracteriza por ser reactivos y formar enlaces covalentes entre los grupos -OH, -NH- o -SH-(Zee, 2002).

4.3.6.3. Evaluación del depresor CMC (Carboximetilcelulosa).

Otro agente depresor por evaluar fue el **CMC**, donde se manejaron los mismos niveles de adición que los reactivos anteriores, bajo las condiciones similares, donde se volvió a correr la prueba de referencia por realizar las pruebas en otro periodo y con esto cerrar las variaciones por las condiciones del operador, donde se aprecia

que esta ocasión la recuperación de carbón fue 24.74%, dando una depresión natural de 75.26%, esto lo podemos ver la [tabla 22](#).

Tabla 21 Evaluación de CMC como depresor de carbón.

Dosificación		EYES g/t, %						% Recuperacion						% Depresión C			
Nombre	g/t	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Global	Condición
Sin Depresor		90.48	2.99	2.03	0.46	11.02	45.76	4.91	68.59	86.77	17.71	79.85	13.88	14.28	24.74	75.26	
CMC	60	138.19	5.10	2.20	0.71	11.30	41.85	5.80	66.18	78.79	11.74	78.49	8.93	8.18	18.39	81.61	6.35
	90	119.73	4.19	2.30	0.60	11.21	46.95	5.13	71.13	93.45	15.08	79.13	10.98	10.87	19.67	80.33	5.07
	120	104.08	3.83	2.28	0.55	11.15	43.19	4.84	68.79	93.81	14.72	77.72	10.81	9.95	18.87	81.13	5.86

Las leyes de los productos que se obtuvieron fueron los siguientes, en plata presento resultados positivos, ya que todas las leyes fueron superiores a la prueba de referencia, registrando la más alta ley en el nivel bajo de 60 g/t representando 47.71 unidades arriba de la prueba de referencia, el mismo comportamiento se mostró para el plomo con 2.11 unidades, así como también el cobre con 0.25 unidades.

El comportamiento de las recuperaciones fue el siguiente, para plata la mayor recuperación se obtuvo en la dosificación media de 90 g/t donde se obtuvo 2.54 unidades adicionales, el plomo en el nivel más alto donde se adiciona 120 g/t se obtuvo la más alta recuperación logrando 7.04 unidades adicionales, en cobre todas las sus recuperaciones estuvieron por debajo de la de referencia.

Con relación a la depresión de carbón el agente CMC, si presento un efecto depresor que oscilo entre 5 y 6 unidades, registrando el mayor índice en el nivel de dosificación baja con 6.35 unidades, registrándose una tendencia a la baja al incrementar su dosificación.

El efecto depresor de la se puede atribuir a que el CMC tienen diferentes niveles de adsorción con el talco y por tal motivo la consecuencia en la magnitud de la acción depresora, atribuyendo a los grupos carboxilos más favorables y los diferentes pesos moleculares, la falta de comprensión del mecanismo de interacción entre el CMC y los minerales ha dificultado su aplicación según comenta en su artículo (Xuemin y col., 2018).

Como se apreció una tendencia a la baja al incrementar su adición se puede atribuir a que la adsorción de CMC se ve favorecida por la potencial zeta positivo pero

obstaculizado por la protonación de los grupos carboxilo. Un estudio electroquímico mostró que la CMC redujo en gran medida la producción de sustancias hidrofóbicas. (Xuemin y col., 2018).

4.3.6.4. Evaluación del depresor D-160 (Ácido Naftaleno Sulfónico de Sodio).

Continuando con la evaluación de los agentes depresores, esta serie de pruebas se pretendió evaluar el reactivo depresor **Naftaleno (D-160)**, bajo las mismas condiciones antes descritas, en la **tabla 23**, se presenta las leyes de los productos obtenidos y las recuperaciones g/t de los elementos de valor, así como el nivel de depresión registrado en la prueba donde no se adiciono depresor, que se manejará como caso base, para comparar los resultados obtenidos con la adición del depresor y con esto evaluar la efectividad.

Tabla 22 Evaluación de Naftaleno D-160 como depresor de carbón.

Dosificación		LEYES g/t, %							% Recuperación						% Depresión C		
		Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Global	Condición
Nombre	g/t	%							%						%		
Sin Depresor		90.48	2.99	2.03	0.46	11.02	45.76	4.91	68.59	86.77	17.71	79.85	13.88	14.28	24.74	75.26	
Naftaleno D-160	60	106.20	3.80	2.21	0.56	10.95	48.55	5.32	68.30	91.55	15.13	79.18	11.39	11.94	21.96	78.04	2.78
	90	125.83	4.30	2.72	0.64	11.45	42.13	5.30	73.17	95.41	17.33	88.98	11.03	9.57	20.02	79.98	4.72
	120	125.77	3.76	2.232	0.50	10.03	43.08	4.46	73.141	89.597	15.59	76.74	10.40	10.29	17.842	82.16	6.89

Las **leyes** de los productos obtenidos en esta serie de pruebas presentado el siguiente comportamiento, los tres elementos de valor presentaron resultados positivos, ya que sus leyes fueron mayores a las obtenidos en la prueba sin el uso de depresor, con esto descartamos alguna afectación en lo que respecta la concentración de estas.

Con relación a la **recuperación** de los elementos de valor, estos presentaron el siguiente comportamiento, la plata presento recuperaciones mayores a la de referencia en las adiciones de 90 y 120 g/t, el plomo en todos los niveles fueron superiores a la de referencia sin adición de depresor, el cobre solamente en la adición media presento resultados superiores.

El comportamiento de la **depresión** con este agente tuvo un comportamiento positivo ascendente, que se fue incrementando conforme se incrementaba el nivel de dosificación hasta llegar a 6.89 unidades de depresión en el nivel más alto.

El efecto depresor de este agente se confirmó con la aplicación de las técnicas avanzadas de caracterización donde el agente podría absorberse físicamente en la superficie del carbón sin la formación de un nuevo complejo **Qiu y Col., (2016)**.

La interacción con Naftaleno Sulfonato se muestra que los elementos azufre (S) y Sodio (Na) aparecen en la superficie del carbón y la disminución de la tensión superficial de las partículas debido a la asociación entre el radical sulfonato de la molécula y el hidrogeno en el agua **Xu y col., (2009)**.

4.3.6.5. Evaluación del depresor Dextrina.

Otro agente depresor que se evaluó fue la dextrina en las mismas condiciones descritas con anterioridad, donde presento resultados positivos que podemos apreciar en la **tabla 24**.

Tabla 23 Evaluación Dextrina como depresor de carbón.

Dosificación		LEYES g/t, %							% Recuperacion							% Depresión C	
		Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Global	Condición
Nombre	g/t	g/t	%						%							%	
Sin Depresor		138.03	5.20	1.69	0.70	10.61	44.76	6.25	68.86	92.94	9.06	77.48	8.61	8.38	18.89	81.11	
Dextrina	60	164.05	5.80	2.00	0.80	10.58	43.85	6.18	69.33	94.59	9.22	77.08	7.32	6.64	16.40	83.60	2.50
	90	189.83	6.98	2.16	0.82	10.76	41.79	6.60	67.64	93.74	8.57	74.91	6.32	5.83	15.16	84.84	3.73
	120	176.02	6.30	2.387	0.90	10.95	46.35	6.24	74.54	96.02	14.04	83.83	9.92	9.81	21.04	78.958	-2.15

El comportamiento de las leyes de los productos, para los elementos de valor plata, plomo y cobre, en esta serie fueron positivos, en el caso de la plata la mayor recuperación se obtuvo en el nivel medio de adición con 189.8 g/t, el mismo comportamiento lo obtuvo el plomo con 6.98% y en el caso de cobre la máxima ley fue en el nivel más alto con una ley de 2.38%.

Con relación a la recuperación la planta presento resultados positivos en los niveles bajo y alto en el nivel medio quedo ligeramente debajo de la referencia, el plomo

todas las recuperaciones fueron positivas siendo la más alta en el nivel más alta de dosificación del depresor.

Con relación a la depresión del carbón solamente registro efecto en los niveles de 60 y 90 g/t ya que en el de 120 presento un resultado negativo.

Adicional se puede comentar que la depresión se puede evidenciar a través de determinaciones electrocinéticas, donde los valores de movilidad de las partículas deprimidas disminuyen en forma proporcional a la adsorción de la dextrina.

Afirmando que la interacción que se produce entre la dextrina y las especies es mediante la forma de hidróxido superficial (Brown, 1937; Laskowki & Liu, 1999; Iwasaki & Lai, 1965; Schulz, 2001).

4.3.6.6. Evaluación del depresor Lignosulfonato.

Otro agente depresor que fue evaluado es el lignosulfonato, el cual se aplicaron las mismas condiciones antes descritas, donde los resultados que se obtuvieron de manera en general fueron positivos tal como se muestran en la [tabla 25](#).

Tabla 24 Evaluación de Lignosulfonato como depresor de carbón.

Dosificación		LEYES g/t, %							% Recuperación							% Depresión C	
		Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Ins	C	Global	Condición
Nombre	g/t	g/t	%						%							%	
Sin Depresor		138.03	5.20	1.69	0.70	10.61	44.76	6.25	68.86	92.94	9.06	77.48	8.61	8.38	18.89	81.11	
Lignosulfonato	60	177.26	6.25	2.18	0.85	11.01	44.37	6.49	69.91	94.92	9.67	78.01	7.36	6.96	16.85	83.15	2.05
	90	180.55	6.39	2.47	0.92	11.14	40.69	6.32	65.30	94.75	10.78	78.36	7.24	6.15	15.63	84.37	3.26
	120	178.25	5.87	2.397	0.86	11.11	41.93	5.93	69.09	94.84	11.11	79.03	7.75	7.44	16.11	83.891	2.78

Los resultados en lo que respecta a las [leyes](#) de los productos obtenidos bajo esta condición de evaluación podemos comentar que la plata presento resultados positivos, obteniendo su máxima ley de 180.55 g/t en el nivel medio de adición, que corresponde a 90 g/t, el plomo presento el mismo comportamiento registrando una ley de 6.39 % y el cobre no fue la excepción con 0.92 % bajo la misma condición.

Las [recuperaciones](#) presentaron el siguiente comportamiento: la plata en los niveles bajo y alto presento recuperaciones por arriba de la prueba sin adición de colector con 69.91 y 60.09%, mientras que el plomo en todos los niveles presento

recuperaciones superiores, obteniendo la máxima en el nivel alto de adición 120 g/t con la recuperación de 94.84%, el cobre registro un comportamiento similar al plomo, alcanzando la recuperación de 79.03 %.

En lo que respecta a la [depresión del carbón](#) el nivel de 90 g/t que corresponde al nivel medio, presento el máximo porcentaje con 3.26 %. De acuerdo con el estudio realizado por [Mahan y col., \(2019\)](#) mejora la humectabilidad del carbón al reducir la tensión interfacial entre las partículas de carbón y el agua.

4.5.0 Resultados del diseño de experimentos

Con los resultados obtenidos de las pruebas metalúrgicas realizadas para la evaluación de los agentes depresores se elaboró un diseño de experimentos factorial, donde se incluyeron todos los resultados de las pruebas realizadas en este proceso de estudio, con el fin de encontrar estadísticamente aquel agente depresor que ofrezca una interacción significativa en el control de carbón y al mismo tiempo no represente un efecto colateral negativo en los indicadores de beneficio de los elementos de valor económico.

Dentro del análisis del diseño de experimentos se cuenta con varias herramientas, una de ellas son los diagramas de Pareto de efectos estandarizados.

La principal impureza que ha justificado la realización de esta investigación es el carbón en la [figura 21](#) nos muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados donde el término A que representa al factor D-160 que es uno de los agentes depresores que fue evaluado indica que tiene una influencia significativa en la respuesta de la ley de carbón en el concentrado, pero hasta este momento no conocemos el sentido de la respuesta si es positivo o negativo.

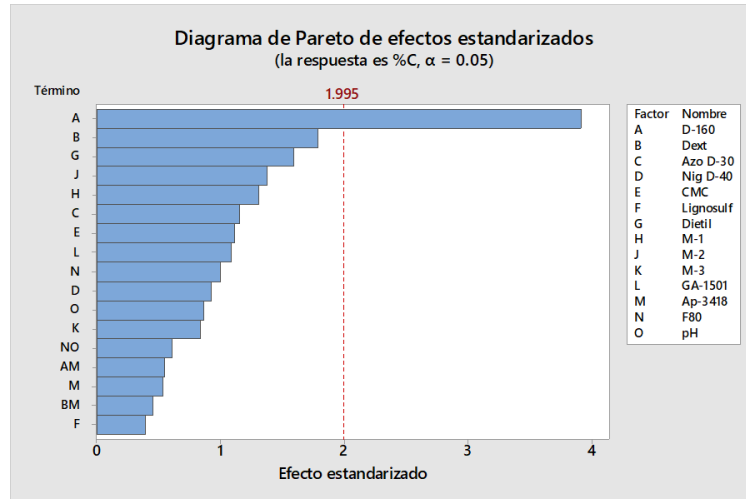


Figura 21 Diagrama de Pareto de efecto estandarizados carbón.

La figura 22 nos muestra la gráfica normal de efectos estandarizados para la ley de carbón en el concentrado donde podemos apreciar que el factor D-160 que representa al agente depresor, presenta una respuesta con sentido negativo lo que nos indica que la respuesta es a disminuir su presencia en el concentrado ya que lo que se busca es un resultado positivo.

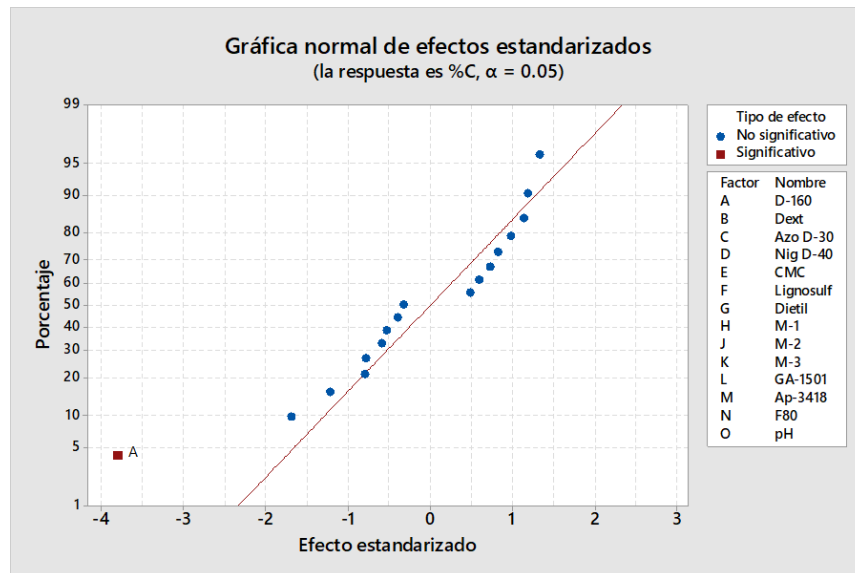


Figura 22 Gráfica normal de efectos estandarizados carbón.

En la figura 23 nos presenta la magnitud de la respuesta mediante la gráfica de efectos normales absolutos estandarizados donde se aprecia un valor casi de 4

indicando una mayor distancia del cero lo que nos señala que si tiene una fuerte injerencia en la respuesta de la ley de carbón en el concentrado.

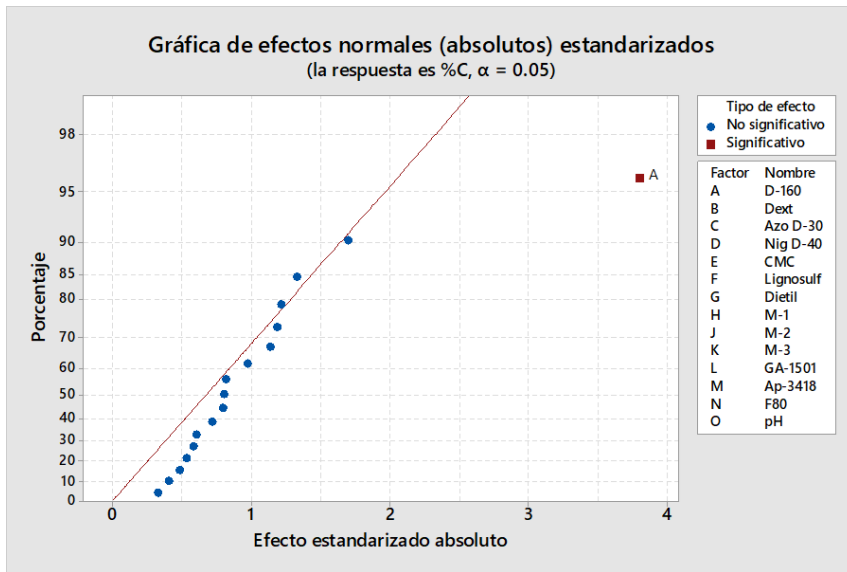


Figura 23 Gráfica de efectos normales (absolutos) estandarizados de carbón.

En la figura 24 confirmamos el factor A, que corresponde al depresor D-160 que tiene un impacto significativo sobre la depresión del carbón ya que está afectando la recuperación del carbón, al cruzar la línea de significancia.

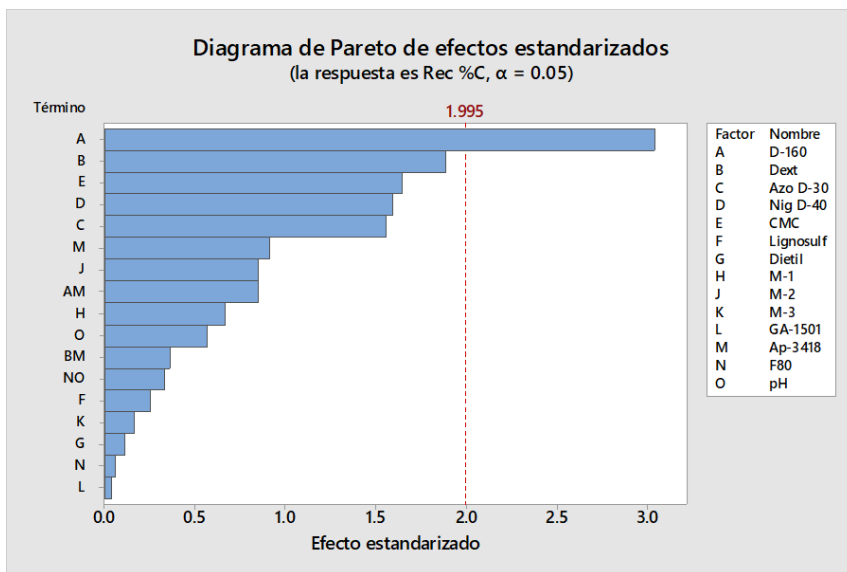


Figura 24 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados (Recuperación de carbón).

De acuerdo con la [figura 25](#) donde se indica el sentido de la significancia y por consecuencia si el impacto es positivo o negativo en el indicador, podemos decir que este se dio en el sentido negativo lo que indica que el factor afecta la recuperación de carbón.

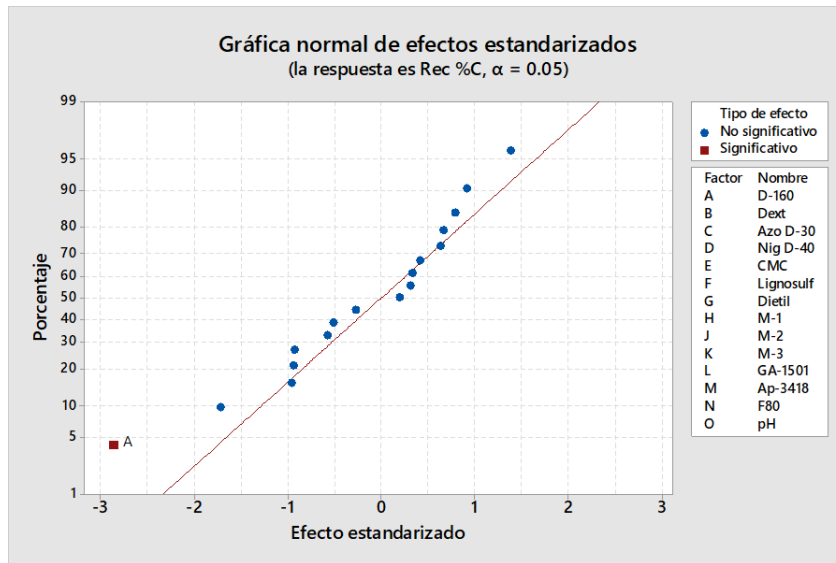


Figura 25 Gráfica normal de efectos estandarizados (Recuperación de carbón).

La [figura 26](#) nos muestra la magnitud de dicha significancia donde se puede apreciar que se encuentra en valores por arriba de 2.5.

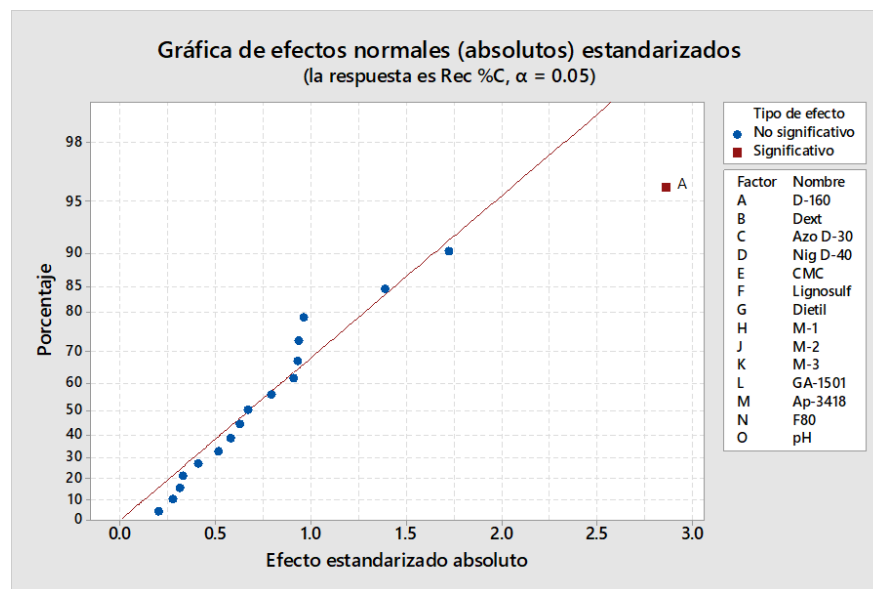


Figura 26 Gráfica de efectos normales (absolutos) estandarizados (Recuperación de carbón).

4.6.0 Evaluación de Depresores Orgánicos con graficas factoriales.

Para la evaluación de los depresores se realizaron varios modelos para evaluar la consistencia del efecto depresor de los agentes en evaluación y en repetidos modelos se presentaron los mismos comportamientos tal y como lo muestra las siguientes herramientas estadísticas.

En esta ocasión se utilizó la Y variable independiente de Depresión de carbón que le asignamos la leyenda de %Dep., mientras que los agentes depresores orgánicos representan las X, así como también el potencial hidrogeno donde se presente crear un entorno que favorezca la depresión, otras condiciones en evaluación es F80 de las partículas que se alimental a la celda para ver su comportamiento.

En la [figura 27](#) representa la gráfica de efectos principales de los agentes depresores y F80 y pH donde se puede apreciar que los reactivos depresores Naftaleno (D-160), Dextrina, Compuestos AZO (D-30) y Nigrosina (D-40) presentan potencial depresivo para el carbón ya que al incrementar su adición estos muestra una tendencia positiva que se puede apreciar claramente por la pendiente de la línea que forma con baja adición y con alta adición.

En el caso del lignosulfonato si tiene un efecto positivo pero su pendiente es menor lo que indica que su potencial depresivo es inferior a los otros reactivos, en el caso de la Carboximetilcelulosa (CMC) conforme se incrementó su adición presento un comportamiento inverso ya que bajo el % depresión del carbón.

En lo que respecta al potencial hidrogeno se desarrollaron varios modelos en el diseño de experimentos y lo mostrado en la [figura 27](#) se confirmó en cada uno de esto donde la depresión de carbón en pH ácidos presenta resultados positivos, caso contrario cuando el pH es llevado a niveles alcalinos baja el % de la depresión de carbón, esta condición nos indica que para favorecer la depresión del carbón es conveniente manejar pH ácidos.

Con relación al tamaño de partículas de acuerdo con los resultados obtenidos en diferentes modelos creados con el diseño de experimento donde siempre mostró el mismo comportamiento el cual lo podemos ver en la [figura 27](#) donde los tamaños finos presen bajo porcentaje de depresión el carbón y cuando la partícula es de mayor tamaño la depresión del carbón aumento, concluyendo que a tamaños gruesos es una condición que favorece la depresión del carbón.

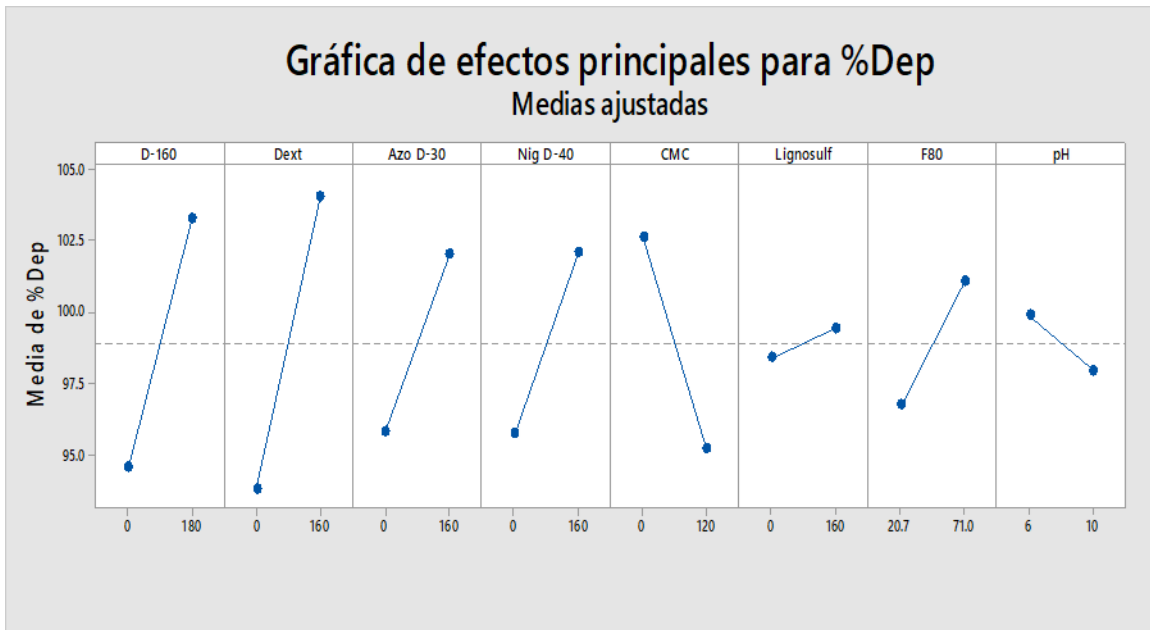


Figura 27 Gráfica de efectos principales para % depresión del carbón.

Como resultado del desarrollo de los diferentes modelos con la información del diseño de experimentos se aplicó la herramienta de graficas factoriales la cual nos muestra las posibles interacciones que tiene los factores o las “X” variables independientes (Factores) sobre la variable dependiente “Y” variable dependiente (% Dep.) depresión del carbón,

Como resultado podemos observar que el depresor Naftaleno (D-160) tiene interacciones con el pH y F80, donde muestra el siguiente comportamiento que lo podemos observar en la [figura 28](#).

Cuando se tiene tamaños de partículas finas el D-160 si presenta un efecto positivo hacia la depresión de carbón, pero no con el mismo potencial, ya que la pendiente se encuentra más inclinada aproximadamente de un 25° , cuando se tiene un tamaño de partícula más grueso el reactivo presente el mismo efecto, pero con mayor potencia, ya que la pendiente se incrementa por arriba de los 45° esto indicando que se tiene mejores condiciones para la depresión del carbón.

Otra interacción que se presenta es la del D-160 y el potencial hidrogeno, que de acuerdo con la que nos muestra la [figura 28](#), el depresor presenta el mismo comportamiento con pH ácido y básico, el aumento de la depresión se da por el incremento de la adición del agente depresor.

La [figura 28](#) nos muestra una interacción que se da entre el F80 y el pH, donde nos muestra que la depresión mejora con pH ácidos, ya que, al incrementar el tamaño de partículas, presenta mejor respuesta.

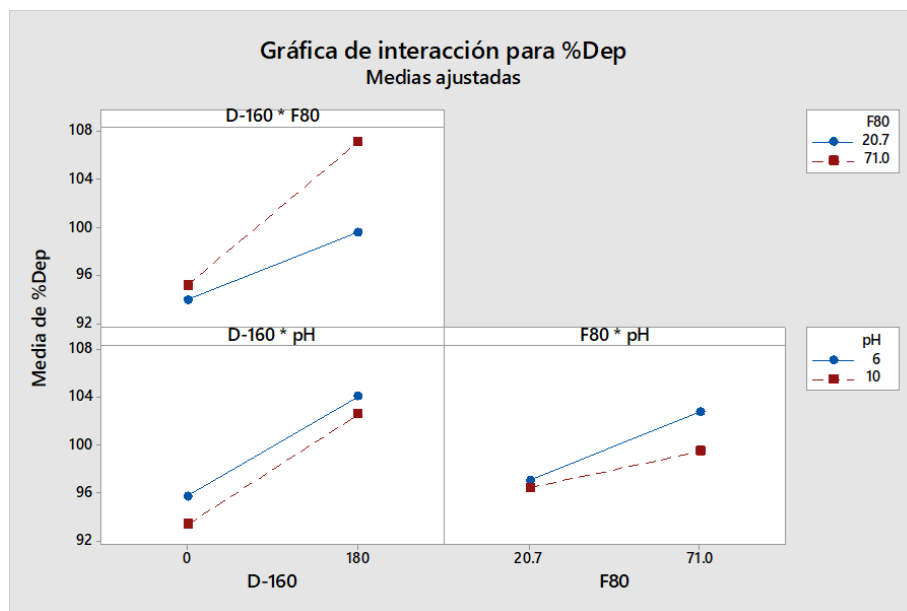


Figura 28 Gráfica de interacción para % depresión de carbón.

En la [figura 29](#) utilizamos la gráfica de cubos para mostrar los comportamientos de las combinaciones al relacionar factores D-160, F80, pH y Ap-3418 en la respuesta que en el caso es la % depresión del carbón, cada cubo muestra los tres factores,

en esta ocasión estamos usando las medias ajustadas que son los valores pronosticados para cada combinación de niveles de factor con base en el modelo.

La [figura 29](#) muestra todas las combinaciones de los valores de configuración de los factores y la media ajustada de cada combinación, donde podemos ver que los pH ácidos, con la máxima adición de D-160 y tamaño de partícula gruesas representa la mejor alternativa de depresión de carbón.

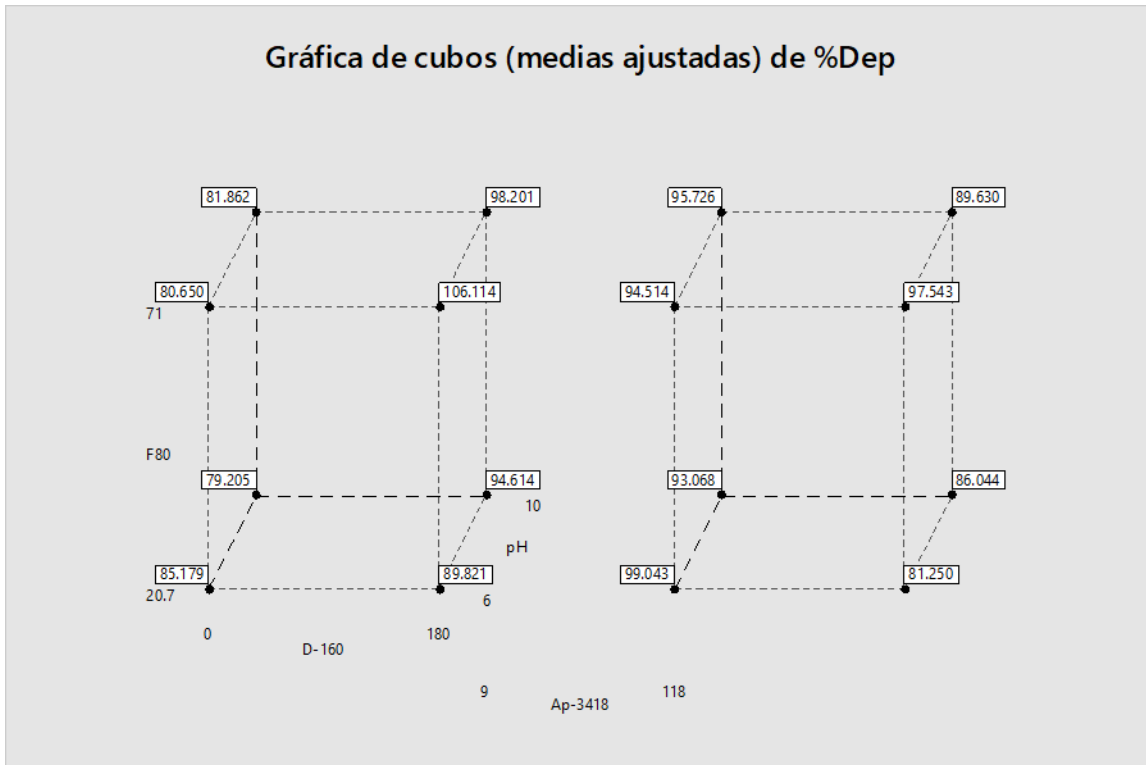


Figura 29 Gráfica de cubos (medias ajustadas) de % depresión de carbón.

En la [figura 30](#) es una gráfica de contorno donde se puede apreciar por niveles como se puede ir presentando la depresión de carbón conforme a los niveles de adición del depresor y el tamaño de las partículas, identificando claramente que las máximas depresiones se logran con la mayor adición del reactivo y con tamaños de partículas gruesas, para esto se fijan los otros factores que son el pH y la adición de Ap-3418.

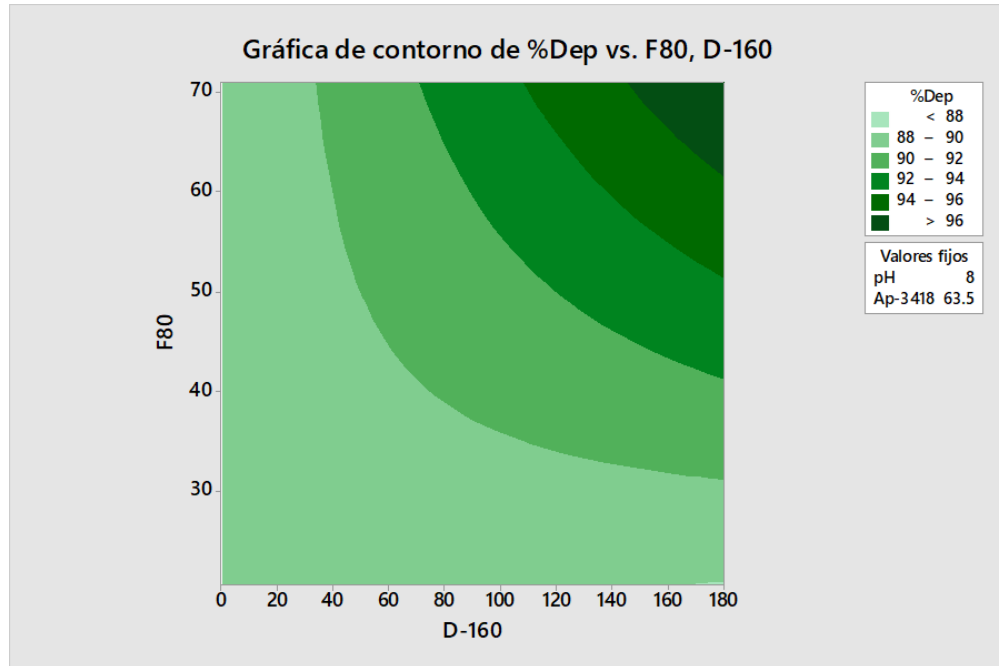


Figura 30 Gráfica de contorno de la interacción F80 y D-160 en la depresión de carbón.

La interacción del depresor D-160 y el pH en la depresión de carbón se muestra en la [figura 31](#) donde se puede apreciar que las máximas depresiones se logran 145 a 180 g/t de D-160 en un rango de pH de 6 a 8, dejado fijo la adición de Ap-3418 en 63.5 g/t y un F80 45.80 micrones.

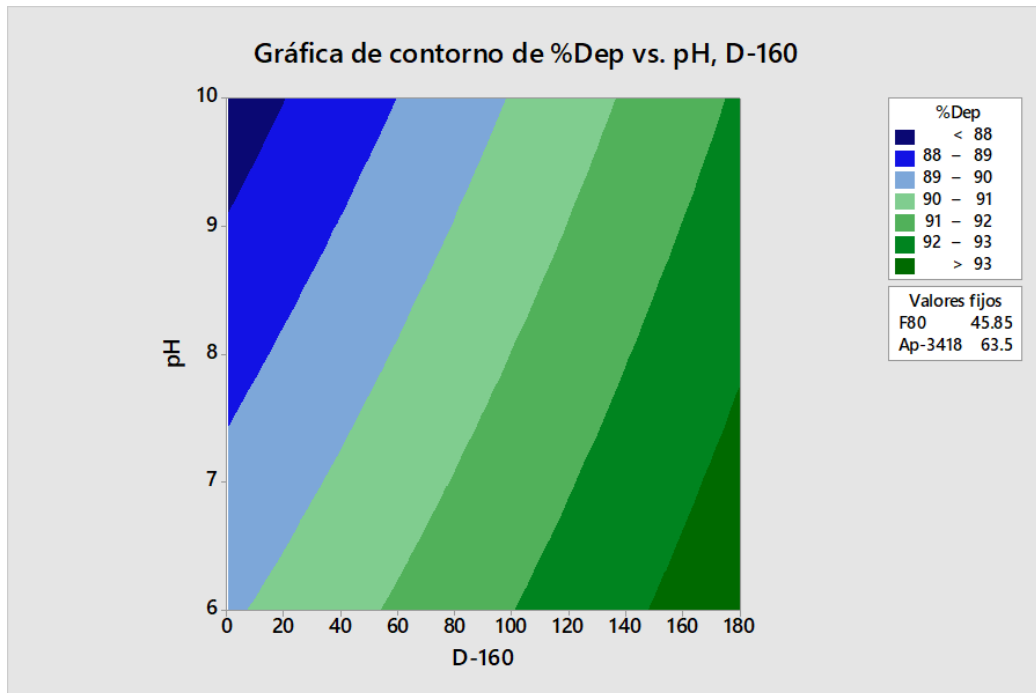


Figura 31 Gráfica de contornos de la interacción de pH y D-160 en la depresión de carbón.

La interacción que se da entre el colector que se usa para recuperación de la galena Ap-3418 y el depresor D-160 donde se aprecia un rango donde se puede optimizar ambos agentes logrando depresiones superiores al 90% y consumos reducidos como son 90 g/t para ambos reactivos, esto lo podemos ver en la [figura 32](#).

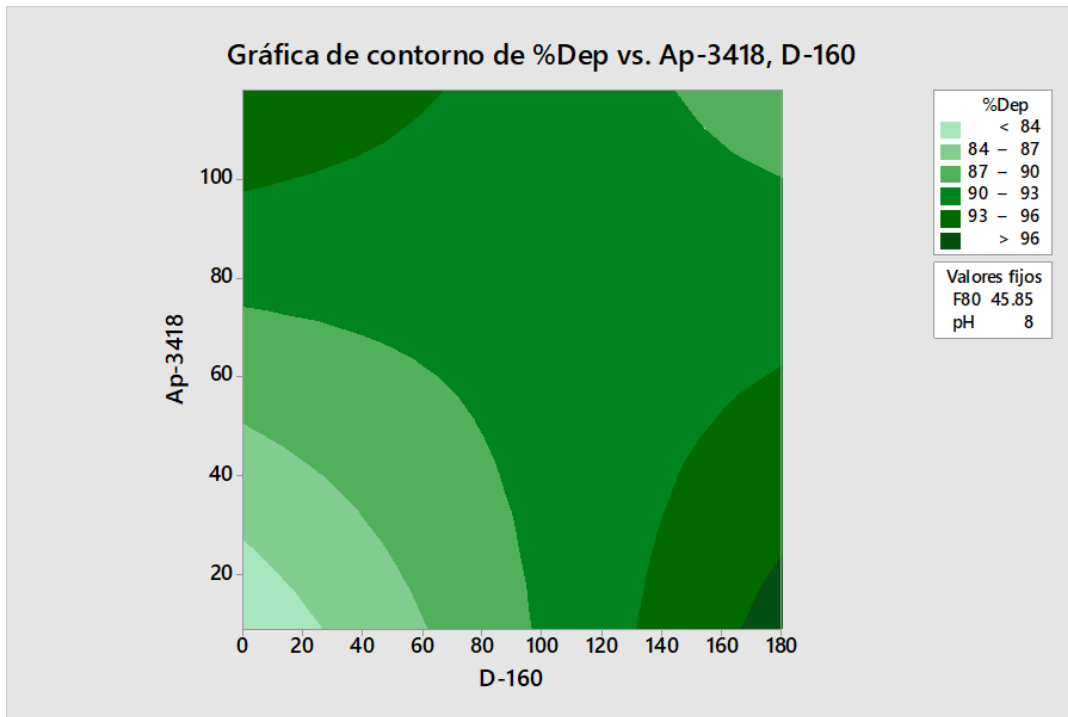


Figura 32 Gráfica de contorno de la interacción D-160 y Ap-3418 en la depresión de carbón.

4.7. Colectores en la depresión de carbón.

Comportamiento de los colectores que se utilizan en el esquema químico para la concentración de las especies de valor económico como es la galena y calcopirita, en la depresión de carbón.

Para esto se desarrolló un modelo que mostramos en la [figura 33](#) gráfica que presenta que Xantato (X-343) tiene una interacción negativa hacia la depresión de carbón ya que al incrementar su adición la depresión del carbón disminuye, en el caso de Ap-3418 presenta una interacción positiva ya que al incrementar su adición contribuye positivamente en el proceso de depresión del carbón.

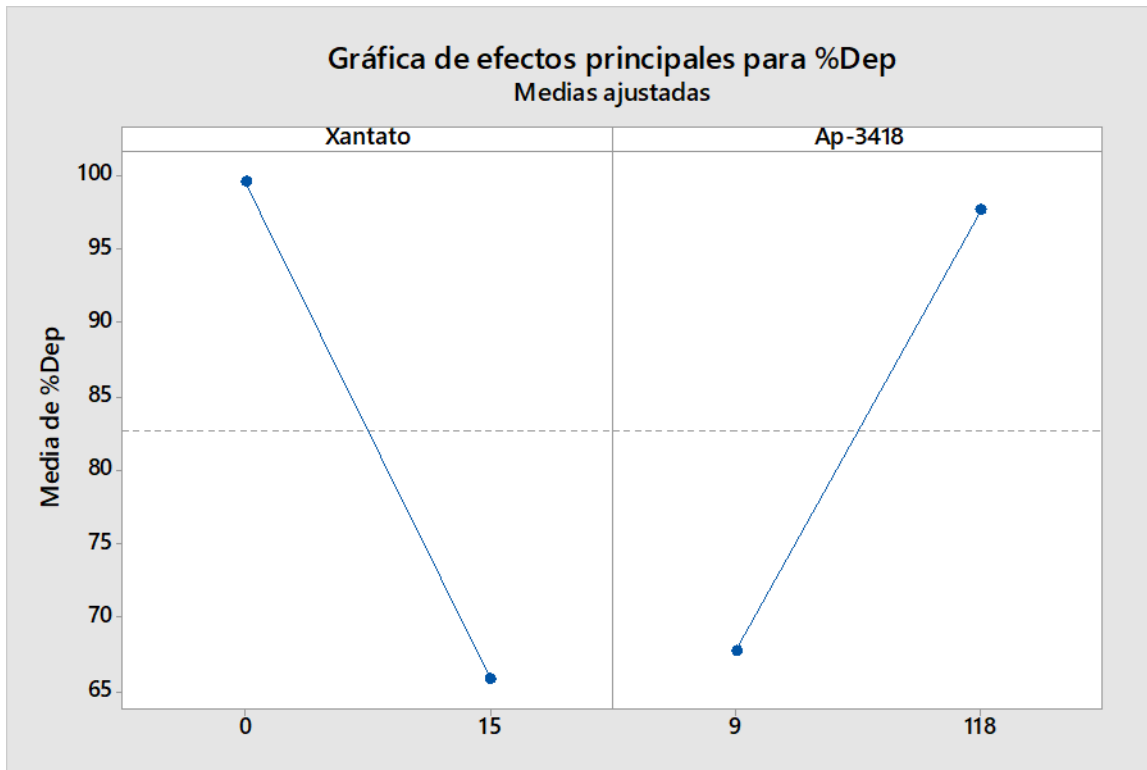


Figura 33 Gráfica de efectos principales de los colectores en la depresión de carbón.

4.8. Predicción de resultados.

Cuando se desarrolla un diseño de experimentos se genera una nube de datos que se interrelacionan y que se pueden usar para realizar simulaciones con ellos y poder predecir escenarios óptimos que se pueden aplicar a nivel industrial y con esto poder optimizar los resultados metalúrgicos de una planta.

En esta ocasión con los resultados de esta investigación estamos aplicando la herramienta estadística predictor donde determinamos los niveles de adición de los agentes evaluados que pudieran representas un nivel de optimización del esquema químico.

Esta optimización tiene como propósito maximizar la relación grado recuperación de las especies de interés económico que aportan los elementos plata, plomo y cobre y minimizar la presencia de carbón como impureza que afecta tanto al proceso como a la calidad de estos resultados.

La [figura 34](#) representa un grafica en la cual nos muestra en el encabezado los niveles altos y bajos de adición de los agentes que mejor resultados aportaron al modelo. En la parte central la herramienta nos muestra las adiciones recomendadas para maximizar la relación grado recuperación de los elementos de interés, en la parte izquierda de la gráfica nos despliega los valores de y que representa el resultado máximo a obtener con esta configuración de adiciones.

Por tal motivo con base a la interacciones de los factores o variables independientes (química y física), sobre las variables dependientes (grado recuperaciones) se recomienda una adición de 90 g/t de D-160 como depresor de carbón, de colector primario Ap-3418 80 g/t, colector secundario 5 g/t, un pH de 8 y un F80 de 65 micrones para maximizar las relaciones grado recuperación de plata, plomo y cobre, ejerciendo un control sobre la recuperación de carbón y logrando los niveles más alto de la depresión de carbón.

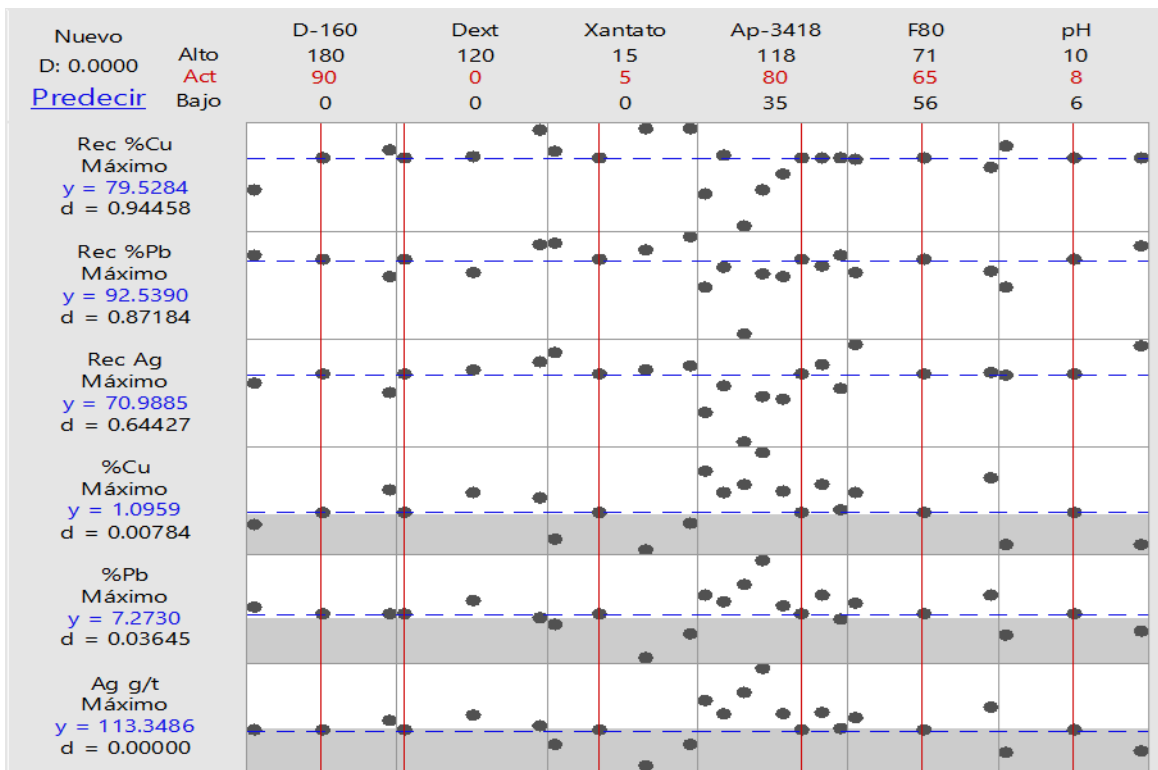


Figura 34 Gráfica de predicción de condiciones optimizadas.

En la [figura 35](#) nos muestras las condiciones más óptimas para lograr la minimización del carbón, que en este caso lo representa la recuperación de este, donde nos indica que se requiere una adición de 90 g/t de D-160, colector primario Ap-3418 80 g/t, colector secundario 5 g/t, un pH de 8 un F80 de 71 micrones.

Se recomienda en lo posible bajar o eliminar la adición de Xantato (X-343) en circuitos de flotación que presenten problemática de carbón, ya que dicho reactivo presenta una afinidad al carbón.

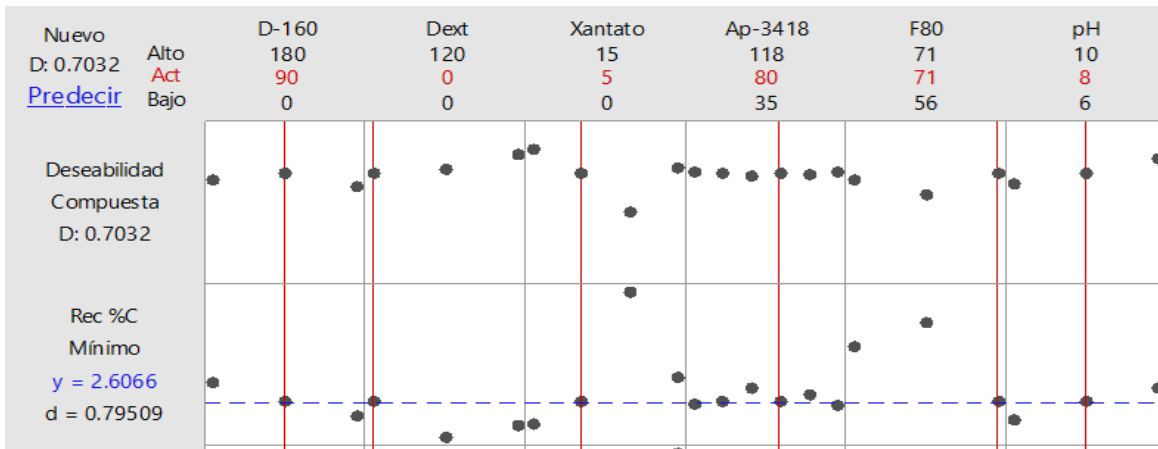


Figura 35 Gráfica de optimización de control de carbón.

Conclusiones.

Conclusiones

La presencia de carbón en los minerales representa una condición muy compleja de controlar por el método de flotación, ya que los macerales no se producen de forma aislada, se forman en asociaciones en varias proporciones y con cantidades variables de materia mineral que dan lugar a las bandas características o capas de carbón.

La distribución del carbón en los grupos macerales afectan significativamente los procesos de separación.

En el desarrollo de las pruebas de flotación que se realizaron para evaluar tanto los diferentes agentes depresores como algunas condiciones de flotación con el propósito de promover la depresión del carbón donde se identificó que más del 70 % del carbón presente en el mineral tiene una tendencia a ser hidrofílico por las alteraciones superficiales y la generación de nuevas superficies producidas durante la molienda. Esta condición permite que estas partículas adsorban fácilmente grupos hidroxilo altamente hidrófilos.

Esta es la causa por la que en sustancias naturalmente hidrofóbicas al molerse se forman también planos hidrófilos.

De acuerdo con la amplia gama de agentes evaluados donde concluimos que todos presentan efecto depresor sobre el carbón a diferentes niveles concluyendo que son menos específicos que los depresores inorgánicos.

Los depresores orgánicos son particulares para cada aplicación, ya que algunos presentaron efectos colaterales negativos en lo que corresponde a la flotabilidad de las especies de valor económico como lo son la galena y calcopirita, condicionando así su aplicación. Un ejemplo claro es el Diésel, que presentó las más bajas recuperaciones por tal motivo fue descartado en las primeras etapas de evaluación.

La respuesta de los elementos de interés económico presentó en un 98% resultado positivo al incrementar sus leyes en el proceso de control de carbón por el mecanismo de depresión.

La recuperación presentó mayor sensibilidad al proceso de control de carbón por el mecanismo de depresión donde los cumplimientos estuvieron en el siguiente orden la plata con un 71%, el cobre 62% y el plomo 43% con relación a los resultados obtenidos con las pruebas donde no se adicionó reactivo depresor, identificando un impacto negativo con este indicador metalúrgico.

De acuerdo con los resultados estadísticos obtenidos con las herramientas aplicadas en este estudio de evaluación concluimos, para estos minerales que se utilizaron, el agente depresor que presentó buenos resultados fue el Naftaleno D-160, ya que mostró resultados significativos, presentando interacciones positivas con pH, F80 y con el colector Ap-3418 para maximizar la depresión.

Se identificaron otros depresores con potencial como son la dextrina, compuesto azo y nigrosina ya que en la evaluación de los depresores presentan una tendencia positiva a deprimir carbón.

En el caso de lignosulfonato presentó un comportamiento en el estudio de bajo potencial de depresión de carbón con relación a los antes mencionados.

El CMC en este estudio no presentó efecto depresivo hacia el carbón al incrementar su adición aumentó la recuperación de este.

En la evaluación de los factores que participan en la flotación de galena y calcopirita se identifica que el colector Xantato (X-343) presenta una interacción negativa en el proceso de depresión de carbón, ya que promueve su recuperación. Caso contrario presenta el colector Ap-3418 con una interacción positiva que no promueve la recuperación de carbón.

En el estudio se identificó que el pH ácido favorece la depresión de carbón, esto también lo pudo comprobar [Yangshuai \(2016\)](#) en su investigación.

Con relación al F80 se determinó que las moliendas finas y ultrafinas complican el control de carbón en la flotación los tamaños de partículas alrededor de los 70 micrones favorecen la depresión de carbón. Caso contrario pasa con los 20 micrones donde se presenta mayor recuperación de carbón, coincidiendo con los estudios previos, (Ding & Laskowski, 2006; Pawlik & Laskowski, 2003; Stonestreet & Franzidis, 1989; Zhang y col., 2013).

Derivado de la complicación que representa la identificación de algunos mecanismos tanto depresión como de activación la aplicación de herramientas estadísticas representa una alternativa para poder determinar el comportamiento de un agente en un determinado proceso con grado de certidumbre que permite su aplicación a nivel industrial y tener la certeza que se tendrá un resultado aceptable.

Recomendaciones

Es recomendable en evaluaciones de agentes químicos que se emplean en el método de concentración por flotación no perder de vista el comportamiento de los resultados metalúrgicos de las especies de valor económico, para evitar en lo posible efectos colaterales que pudieran afectar su desempeño.

Se recomienda la reproducción a nivel industrial de estas condiciones y recabar información para retroalimentar el modelo y continuar con una segunda parte de optimización del esquema químico.

En operaciones que presenten problemática con el carbón recomendamos evaluar los siguientes depresores.

- 1.- Naftaleno D-160.
- 2.- Dextrina
- 3.- Compuesto Azo
- 4.- Nigrosina.

Referencias

- Aplan, F.F.(1992). Coal Properties dictate coal flotation strategies. *Miner. Eng.*, 45, 45.
- Aplan, F.F. & Arnold, B.J. (1989). The hydrophobicity of coal maceral. *Fuel*, 68, 651.
- Bakinov, K., Vaneev, I., Gorlovski, S., Eropkin, U., Zashikhin, N., & Konev, A. (1964). *Nex methods of sulfite concentrate upgrading*". New York: Arbiter, N, Ed. Proc. 7th International Mineral Processing Congress.
- Balajee, S., & Iwasaki, I. (1969). Adsorción mechanism of starches in flotation and flocculation of iron ores. *SME Mineral Processing Hand book; AIME section 14 C*, 14-1-13-32.
- Beaussart, A., Mierczynska-Vasilev, A., & Beattie, D. (2010). Evolution of carboxymethyl cellulose layer morphology on hydrophobic mineral surfaces: Variation of polymer concentration and ionic strength. *J. Colloid Interface Sci* 346, 303-310.
- Brown. (1937). Separation of molybdenite from copper sulphides. *U.S. Patent 2.095.967*.
- Brown. (1962). Coal Flotation. *Froth Flotation AIME*, 518-538.
- Bruyn P.L., G. A. (1962). Surface chemistry of flotation . *Froth Flotation - 50 th anniversary*, 91-138.
- Bujnowska. (1985). Studies on flotability of petrographic constituents of subbituminous coal. *Coal Preparation*, 169.
- Cabrera-Tejada. (2007). Adsorción de colectores Xantato y Tinocarbamato y el depresor Orgánico Dextrina en la interfase Calcopirita/Solución Acuosa: Su efecto en la mojabilidad y flotabilidad de la calcopirita. *Tesis de Maestria San Luis Potosí México Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Celedon Cervantes T. (1997). La dextrina como depresor no tóxico en la flotación selectiva de galena y pirita. *Tesis de Maestria en ciencias en ingeniería química, Facultad de Ciencias Químicas, UASLP*, 155.
- Chander. (1988). Inorganic depressants for sulfide minerals, in : Reagents in Mineral Technology, P. Somasundaram i B.M. Moudgil I (eds),. *Surfactants Science series*, 429-469.
- Chander., W. J.-W. (1975). On the native flotability and surface properties of naturally hydrophobic solid, in Advances in interfacial phenomono of particulate/gas systems: applications to flotation, research, O. P. Somasundaran and R.B. Grieves, 183-191.
- Chen, Z., Gu, G., Li, S., Wang, C., & Zhu, R. (2018). The Effect of Seaweed Glue in the Separation of Copper-Molybdenum Sulphide Ore by Flotation. *Minerals* 8, 41.
- CRC. (1986). Handbook od chemistry and physics. 67th ed. (R.C. Weast (ed), *CRC Press, Boca Raton Florida, USA*.
- Cytec Industries Inc. (2002). *Mining Chemicals HANDBOOK*. Cytec.

- Denisse, P. C. (2011). *Implementación de una columna de flotación para reducir el contenido de cenizas de carbones magallánicos*. Punta Arenas, Chile: Universidad de Magallanes.
- Ding, & Laskowski, J. (2006). Cial reverse flotation. Part 11: Cleaning of a subbituminous coal. *Minerales Engineering*, 79-86.
- Drzymala J. (2007). *Mineral Processing Fpundations of theory and practice of minerallurgy*. Wroclaw: Wroclaw Unversity of Technology. Recuperado el 13 de 01 de 2018
- Drzymala, J. & Laskowski, J.S. (1979). Surface dissociation constants for solid ocide/aqueous solution systems. *Colloid Interface Sci* 220, 768-772.
- Drzymala, J. (1999). Flotometric hydrophilicity of coal particles. *Mining Science and Technology*, 533-537.
- Eastop, T.-B. A. (1998). Chemical principles of textile conservation. *Butterworth- Heinemann, London*, 480.
- Fleton, G. D. (1989). Activation of plant follar oxidizes by insect feeding reduces nutritive quality of follage for noted herbivores. *Journal of Chemical Ecology* 15, 2667-2694.
- Franco, J. a. (2012). Tesis. *Diferenciación de contenidos de carbon organico por flotación segregante de un concentrado final de cobre en la presncia de dextrina consultora virgen de chap*. Huancayo, Perú. Recuperado el 23 de 05 de 2018
- Fuerstenau, W. J. (1974). The effect of Dextrin on Surface Properties and the Flotation of Molybdenite. *INternational Journal of Mineral Processing El sevier Vol 1*, 17-32.
- Fuerstenau D. W., H. U. (1988). Flotation fundamentals in: Reagents in mineral Technology, Surfactant sicence series. *P. Somasundaran and B.M. Moudgil*, 1-38.
- Garrels, R., & Crhist, C. L. (1965). *Solutions Minerals and Equilibria* Harper and Row, New York.
- Gorlovskii, C. (1956). High molecular weight organic compounds as flotación depressants. *Obogashenie Rud No 6*, 26-33.
- Gupta, N. (2017). Evaluation of graphite depressants in a poly-metallic sulfide flotation circuit. *International Journal of Mining Science and Technology*, 285-292. Recuperado el 13 de 05 de 2018
- Haslam, E. (1989). "Plant polyphenols". Chemistry and significance of condensed tannins,. *Hemingway R.W. and Karchesy J.J. Plenum Press, Cambridge, Cambridge University Press, Cambridge, UK.,.*
- Haug, H. C. (1978). Adsorption reactions in the depression of coal by orgnic colloid,. *Recent Developments in Separation Science vol 4 CRC*, 115-133.
- Huang, P., Cao, M., & Liu, Q. (2011). Using chitosan as a selective depressant in the differential flotation of Cu- Pb sulfides. *Int. J. Miner, Process* 93, 8-15.

- Iwasaki, I., & Choi, H. (1969). Use of starches and starch derivatives as depressants and flocculants in iron ore beneficiation. *Transactions of AIME Vol. 244*.
- Iwasaki, I., & Lai, R. (1965). Starches and starch products as depressants in soap flotation of activated silica from iron ores. *Trans. AIME 232*, 364-371.
- Jaiswal, & Col., B. K. (2015). An overview of reverse flotation process for coal. *International Journal of Mineral Processing 134*, 97-110.
- Jaiswal, S., Tripathy, S., & Banerjee, P. (2015). An overview of reverse flotation process for coal. *Int. J. Miner. Process 134*, 97-110.
- Khraisheh, M., Holland, C., & Creany, C. (2005). Effect of molecular weight and concentration on the adsorption of CMC onto talc at different ionic strengths. *Int. J Miner. Process 75*, 197-206.
- Klassen. (1963). Coal Flotation. *Gosgortiekhizdat 2nd ed.*, in Russian.
- Laskowski, J.S. & Liu, Q. (1999). On the Adsorption Mechanism of Carboxymethyl Cellulose. *Polymers in Mineral Processing Laskowski, J. Ed. Met Sox of CIM*, 357-373.
- Laskowski, J.S. & Liu, Q. (1989). The Interactions between Dextrin and Metal Hydroxides in Aqueous Solutions. *Vancouver, British Columbia, Canada V6TIWS : Department of Mining and Mineral Process Engineering. Vol. 130*, 101-111.
- Laskowski, J. L., & Bolin, N. (1991). Polysaccharides in flotation of sulphides Part I Adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces. *Int J Miner. Process 33*, 223-234.
- Laskowski, J.S. & Liu, Q. (2007). Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption to the mineral/aqueous solution interface. *Journal International of mineral processing vol 84*, 59-68.
- Laskowski, J.S. (1993). Polysaccharides-Emerging Non-Toxic Modifiers for Differential Flotation of Sulphides. *Journal XVIII International Mineral Processing Congress. Vol 23*, 593-598.
- Last, G. (1951). The mechanism of collector. depressant equilibrium at mineral surfaces. *Thesis. Universidad of Utah*.
- Leja, J. (1982). Surface chemistry of froth flotation. *Plenum Press*.
- Letowski F. (1975). *Podstawy hydrometalurgii*. PWN, Warszawa.
- Li, Y., Chen, J., & Shen, L. (2016). Flotation behaviors of coal particles and mineral particles of different size ranges in coal reverse flotation. *Energy Fuels 30*, 9933-9938.
- Li, Y., Honaker, R., Chen, J., & Shen, L. (2016). Effect of particle size on the reverse flotation of subbituminous coal. *Powder Technol 301*, 323-330.
- Liu, Q. Laskowski, J.S. Zhang, Y. (2000). The adsorption of polysaccharides onto mineral surface: an acid/base interaction. *Journal El sevier vol 6*, 229-245.

- Liu, Q. L. (1988). Effect of Humic Acids on Coal Flotation Part II The Role of pH. *Society of Mining Engineers, Littleton Colorado*, 83-91.
- Liu, Q.L. & Laskowski, J.S. (1989). The role of metal hydroxides at mineral surfaces in dextrine adsorption, I. Studies on modified quartz samples. *In. J Miner Process*, 297-316.
- López-Valdivieso, A., Lozano-Ledesma, L., A., R.-C., & Orozco-Navarro, O. A. (2017). Carboxymethylcellulose (CMC) as PbS depressant in the processing of Pb-Cu bulk concentrates Adsorption and floatability studies. *Miner. Eng.* 112, 77-83.
- López-Valdivieso. (2004). Dextrin as a regulator for the selective flotation of chalcopirite, galena and pyrite. *Journal Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. Vol. 46, 3.*
- López-Valdivieso. (2007). Dextrin as regulator for the selective flotation of chalcopirite, galena and pyrite. *Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum vol. 46, 3.*
- Mahan, K., Konduri, & Pedram, F. (2019). Alteration in interfacial properties and stability of coal water slurry by lignosulfonate. *Powder Technology* 356, 920-929.
- Mendez, A. (2013). Azoderivados. *La guía 2000 Química*.
- Micot., V. F. (1994). The structural microscopic hydrophilicity of talc. *Langmuir* 10, 3765-3773.
- Miller J.D., L. C. (1984). Coadsorption phenomena in the separation of pyrite from coal by reverse flotation. *Journal Coal Preparation*, 21-38.
- Minitab. (2020). <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/screening-designs/>. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/definitive-screening-designs/>
- Núñez, R. C. (01 de 01 de 2004). Apuntes de química aplicada. Ciudad de México, México.
- Nyamekye, G., & Laskowski, J.S. (1991). The differential flotation of INCO matte with the use of polysaccharides. *Dobby, G.S. Argyropoulos, S.A., Rao S.R. Eds., Proc. Copper'91 Int. Symp. vol. 2, Pergamon*, 231-243.
- Bruyn P.L., G. A. (1962). Surface chemistry of flotation. *Froth Flotation - 50 th anniversary*, 91-138.
- Patil, D.P. & Laskowski, J.S. (2008). Development of zero conditioning procedure for coal reverse flotation. *Minerals Engineering* 21, 373-379.
- Pawlik, M.L. & Laskowski, J.S. (2003). Coal Reverse Flotation. Part II Batch Flotation Tests. *Coal Preparation*, 113-127.
- Pawlik, M. L. (1997). Effect of humic acids and coal surface properties on rheology of coal-slurries. *Coal Prep* 18, 129-149.
- Pawlik, M. L. (2003a). Coal Reverse Part I Adsorption of Dodecyltrimethyl Ammonium Bromide and Humic Acids onto Coal and Silica. *Coal Prep* 23, 91-112.

- Pawlik., M. L. (2002). Reverse flotation as a Method for Cleaning Coal for Preparation of Coal - Water Slurries. (*PhD Thesis*) University of British Columbia.
- Piñeres, J., Barraza, J., & Blandón, A. (2009). Flotación Kinetic constants of two Colombian coals citrinite maceral. *Ingeniería e investigación vol 29 No 3*, 29-35.
- Qiu, Yu, Zhang, L., Qian, Y., & Ouyang, Z. (2016). An investigation of reverse flotation separation of sericite from graphite by using a surfactant: MF. *Minerals MDPI*, 6(3), 57.
- Rath, R., & Subramanian, S. (1997). Studies on the adsorption of guar gum onto biotite and mica. *Miner. Eng.* 10, 1405-1420.
- Rath, R.-K., Subramanian, S., & Pradeep, T. (2000). Surface Chemical Studies on Pyrite in the Presence of Polysaccharide- Based Flotation Depressants. *Colloid Interface Sci* 229, 82-91.
- Rath., R. (2000). Studies on the interaction of guar gum with chalcopyrite. *Journal Canadian Metallurgical Quarterly vol. 40*, 01-12.
- Rodríguez, E. (2011). Modificación y Caracterización Calorimétrica de Carbón Activado Granular, para la Remoción de Cd (II) y Ni (II) en Adsorción Simple y Competitiva. *Tesis en Opción al título de Magister en Química Universidad Nacional de Colombia, Bogotá*.
- Ron, E. y. (2001). Minireview: natural roles of biosurfactantes. *Environ. Microbiol* 3, 229-236.
- Ronngren, L., Sjoberg, S., & Sun, Z. (1995). Complexation at the sulfide aqueous interface, in Flotation. *Science and Engineering K.A. Matis (ed.) Dekker New York*.
- Sablik, J. (1998). Flotacja wegla kamiennych. *GIG, Katowice*.
- Sarquís, P. E. (2012). *Flotación selectiva de sulfuros complejos usando reactivos de baja toxicidad*. Oviedo: Universidad de Oviedo Centro internacional de posgrados.
- Schnar, J. (1978). Brunswick mining and smelting corporation. Mining practice in Canada. *CIM Bulletin Volume 16*, 158-161.
- Schulz, N. C. (2001). Froth flotation of iron ores adsorption of starch products and laurylamine acetate. *Ind. Eng. Chem.* 45, 21-40.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Anuario estadístico de la Minería Mexicana*. Obtenido de gov.mx: <https://www.gob.mx/sgm/articulos/consulta-el-anuario-estadistico>
- Sherfrin. (1960). Constitutive relations in the wetting of low energy surfaces and the theory of the retraction method of preparing monojayers. *The Journal of Physical Chemistry*, 519-524. Obtenido de Descripción Teórica: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81ngulo_de_contacto
- Shim, J.-W. Park, S.J., & Ryu, S.K. (2001). Effect of modification with HNO₃ and Na OH on metal adsorption by pitch-based activated carbon fibers. *Carbón vol 39*, 1635-1642.
- Smisek, M. C. (1970). Activated Carbon Manufacture, Properties and Applications. *El sevier Publishing Company*, 479.

- Smith T., L. L. (2008). Removal of organic carbon with a Jameson Cell at Red Dog Mina. *40th. Anual Meeting of the Canadian Mineral Processing*, 22-24. Recuperado el 20 de febrero de 2018
- Smith, H. a. (1951). Principales of coal flotation. *Fuel*, 54.
- Smolders, C. (1961). Contact angles, wetting and dewetting of mercury, praca doktorska. *University of Utrecht Holandia*.
- Somasundaran, P. (1969). Adsorption of starch and oleate and interaction between them on calcite in aqueous solutions. *Colloid Interface Sci* 31, 557-565.
- Stonestreet, P. & Franzidis, P. (1989). Development of the reverse coal flotation process: depression of coal in the concentrates. *Minerales Engineering*, 393-402.
- Vamvuka, D. & Agridiotis, V. (2001). The effect of chemical reagents on lignite flotation. *International Journal of Mineral Processing* 61, 209-224.
- Vargas, L. (2017). Tesis Evaluación de la granulometría y flotación de la Cia. Cori-puno. Universidad Nacional de San Agustín.
- Wang, L. (2013). The Use of Polyacrylamide as a Selective Depressant in the Separation of Chalcopyrite and Galena. *Bound. Value Probl.*, 1-10.
- Weissenborn, P. (1993). *Selective flocculation of ultrafine iron ore*. Curtin University of Technology: Ph D. Thesis.
- Xu, X., & Fan, C. (2009). Dispersing action of tannic acid for determining granularity distribution characteristic of graphite powder with laser method. *Carbon Tech* 28, 1-5.
- Xuemin, Q., Hongying, Y., Guobao, C., & Wenjie, L. (2018). An Alternative Depressant of Chalcopyrite in Cu-Mo Differential Flotation and Its Interaction Mechanism. *Minerals School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang*.
- Yang, Y. Z., Tan, Z., & Wang. (2019). Study on the coal dust surface characteristics and wetting mechanism. *Jurnal of China Coal Society* vol. 32 no 7, 176-183.
- Yonggai, L. (2019). Effect of Dextrina on the Adsorption Behavior and Surface Characteristics of Sub-Bituminous Coal And Silica. *ACS Omega* 4, 7231-7236.
- Zee, V. d. (2002). Anaerobic azo due reudction PhD Thesis wageningen University, Wageningen. *The Netherlands*.
- Zhang, Liu, Coa, & Wang. (2013). Effects of particule size on lignite reverse flotation kinetics in the presence of sodium chloride. *Powder Technology*, 658-663.

Apéndice

1. Como crear un diseño de experimento en minitab.

Para ingresar o analizar datos de un diseño de experimento en Minitab, lo primero es crear un diseño de experimento en la hoja de trabajo. El programa Minitab ofrece varios diseños.

Como el de exploración el cual incluye diseños de cribado y de Plackett-Burman definitivos, Factorial que incluye diseños completos de 2 niveles, fraccionados de 2 niveles, de parcelas divididas y de Plackett-Burman. Superficie de respuesta son los diseños compuestos centrales y de Box-Behnken. Mezcla son diseños centroides simplex, reticulares simplex y vértices extremos. Taguchi son diseños de 2 a 5 niveles y mixtos.

De acuerdo con los requisitos del experimento se elige el diseño para esto el programa Minitab cuenta en el menú con la opción Estadística > DOE. A través de la barra de herramientas eligiendo Herramientas > Barras de herramientas. Donde se puede elegir el diseño y sus características, donde Minitab crea el diseño y lo almacena en la hoja de trabajo.

1.2. Seleccionar diseño.

Para crear un diseño factorial donde se pretende examinar la relación entre dos factores debemos de seguir los pasos.

- 1.- Elija Archivo > Nuevo > Proyecto.
- 2.- Elija Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial.

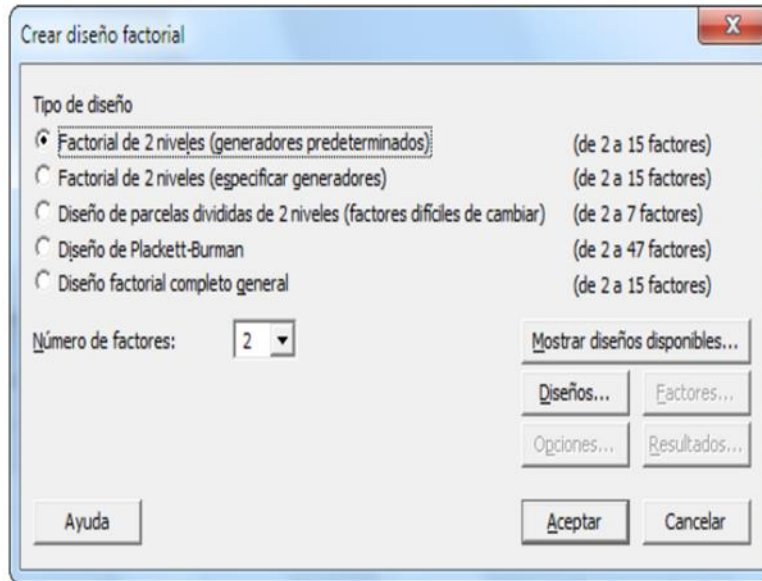


Figura 36 Caratula para crear un diseño factorial (Minitab 17).

En esta etapa de creación de un diseño en Minitab, solo están habilitados los botones, mostrar diseños disponibles y diseños, los demás botones se habilitan cuando se completa el cuadro de diálogo secundario diseños.

3.- Hacer clic en Mostrar diseños disponibles.

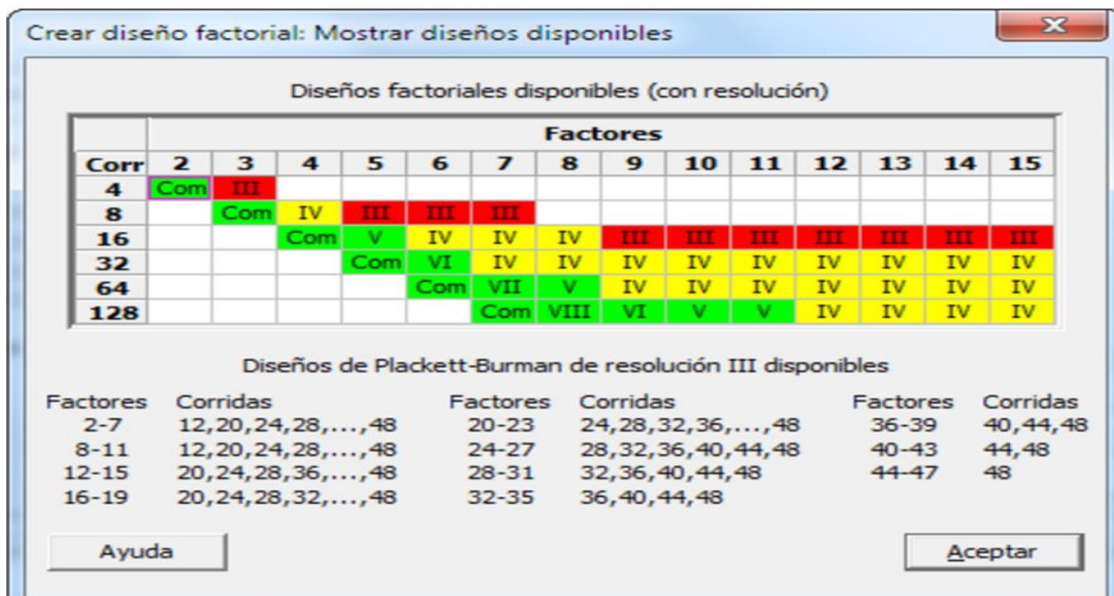


Figura 37 Caratula de tipos de factoriales disponibles (Minitab 17).

Minitab muestra los diseños posibles y el número de corridas experimentales necesarias en el cuadro de diálogo Mostrar diseños disponibles.

4.- Dar clic en aceptar para regresar al cuadro de diálogo principal

5.- En este tipo de diseño, se selecciona factorial completa.

6.- En el Número de factores se le coloca le número de factores a evaluar en la investigación.

7.- Hacer clic en Diseños.

El Lignosulfonato de acuerdo con el estudio realizado por Mahan y col., (2019) mejora la humectabilidad del carbón al reducir la tensión interfacial entre las partículas de carbón y el agua.

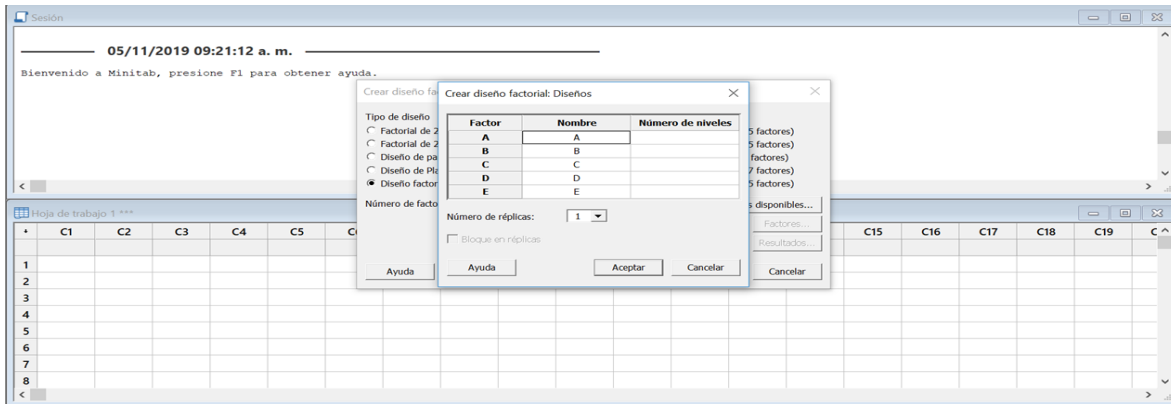


Figura 38 Pantalla para renombrar los factores (Minitab 17).

En esta etapa de creación del diseño se establece el número de niveles por cada factor.

8.- Dar clic en Aceptar, regresa cuadro de dialogo anterior.

9.- Dar clic en Factores para colocar los valores de nivel.

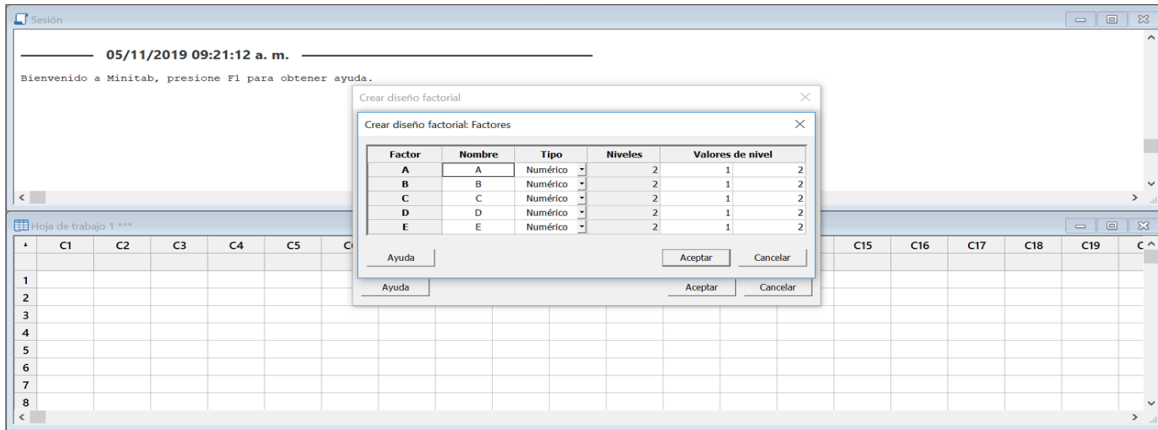


Figura 39 Pantalla para establecer los colores de nivel de los factores (Minitab 17).

Teclear los valores en los espacios.

10.- Dar clic en aceptar.

Con estos pasos se concluye la configuración del diseño de experimento.

11.- Dar clic en aceptar para desplegar la serie de pruebas a realizar. En la hoja de trabajo.

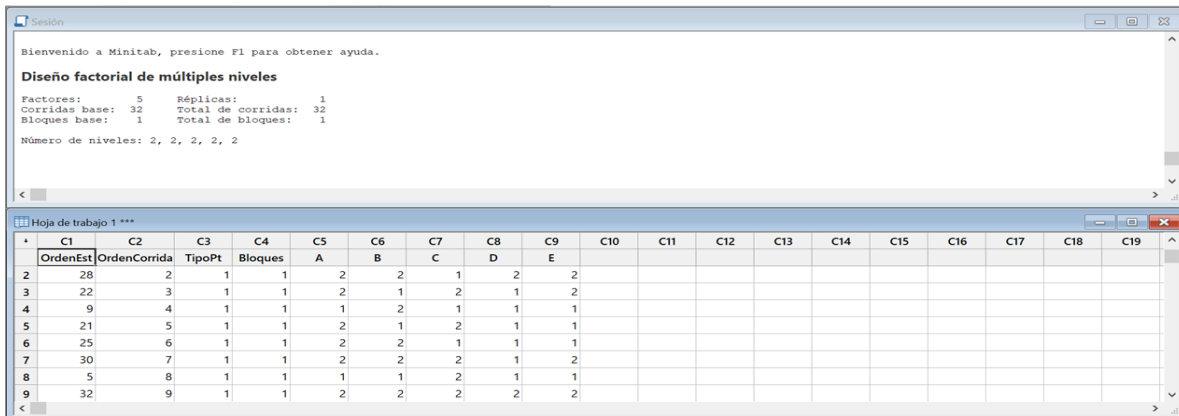


Figura 40 Tabla resumen y series a desarrollar en el DOE (Minitab 17).