

16



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO METALURGICO ESPECIFICO DE UNA MUESTRA DE MINERAL MANGANIFERA DE BAJA LEY

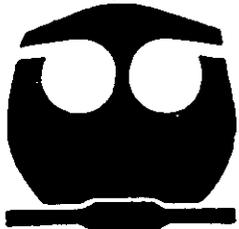
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

O S C A R R U B I V E L A S C O

280471



MEXICO, D.F.

2001

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO**

PRESIDENTE

**PROF. JORGE ORNELAS TABARES**

VOCAL

**PROF. JUAN GENESCA LLONGUERAS**

SECRETARIO

**PROF. ANTONIO HUERTA CERDÁN**

1<sup>ER</sup> SUPLENTE

**PROF. ROSA ELVA RIVERA SANTILLÁN**

2<sup>DO</sup> SUPLENTE

**PROF. CARLOS ROSENDO ARGANIS JUÁREZ**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

**CONSEJO DE RECURSOS MINERALES  
CENTRO EXPERIMENTAL TECAMACHALCO  
ACUEDUCTO No.4 ESQ. CALLE 14-BIS. COLONIA REFORMA SOCIAL,  
MÉXICO 11650, D. F.**

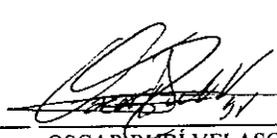
ASESOR DEL TEMA

  
DR. JUAN GENESCA  
LLONGUERAS

SUPERVISOR TÉCNICO

  
ING. JUAN CARLOS RUIZ  
MÉNDEZ

SUSTENTANTE

  
OSCAR RUBÍ VELASCO

# *Dedicatoria*

*El presente trabajo está dedicado a dos seres  
que son la fuente de mi perseverancia,  
no sólo por haberme dado la vida sino  
por apoyarme y creer en cada uno de mis ideales.*

*A ellos que los he visto hacer sacrificios  
para que yo pudiera alcanzar lo que deseo,  
pareciera ser que las cosas que hacen  
es por obligación, sin embargo, no es así.*

*Ellos han estado en cada uno de los momentos  
más difíciles, hoy los veo y les doy las gracias  
a ustedes mis padres*

*Estela Velasco*

*Emiliano Rubí Zamorate.*

*Existe otro ser divino mi abuela Apolonia Santana Nava, quién es un ejemplo, palabras no tengo para decirle la gratitud a cada uno de sus detalles.*

*Judith ha sido poco el tiempo más por el contrario eres ya parte de mi alegría y deseo compartir contigo mis triunfos y derrotas, por que se que me darás ese pundonor para levantarme y seguir adelante, te amo infinitamente (143).*

*A ustedes Armando y Ruth gracias por ser parte de mi vida.*

*A todo y cada uno de mis amigos, gracias.*

*De igual manera le doy las gracias a todo el personal que me ayudó en la elaboración de mi tesis, tanto de la UNAM como del COREMI.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	pp. 1
<b>I. OBJETIVOS</b>	5
I.1.    Objetivos Generales	6
I.2.    Objetivos Particulares	6
<b>II. INTRODUCCIÓN</b>	7
<b>III. ANTECEDENTES</b>	9
III.1.  Historia	10
III.2.  Mineralogía del Manganeso	10
III.2.1. Tipo de Depósitos	10
III.2.2.    Minería del Manganeso	13
III.2.2.1.    Zonas Mineras	13
III.2.2.2.    Producción de Manganeso	16
III.2.2.3.    Minerales de Manganeso	17
III.2.3.    Grado de los Minerales de Manganeso	29
III.3.  Diagrama de Pourbaix	31
III.4.  Proceso de Producción de Dióxido de Manganeso (EMD)	33
<b>IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS</b>	35
IV.1.  Estudio de Caracterización Mineralógica	36
IV.1.1. Descripción Megascópica	37
IV.1.2. Análisis Cualitativo Espectrográfico	37
IV.1.3. Análisis Químico Cuantitativo	38
IV.1.4. Estudio de Difracción de Rayos X	39
IV.1.5. Mineragrafía	40
IV.1.6. Reconstrucción Química de los Compuestos que Integran la Muestra de Cabeza	42
IV.1.7. Fotomicrografía	43
IV.1.7.1.    Superficies Pulidas	44
IV.1.7.2.    Láminas Delgadas	47
IV.2.  Estudio Metalúrgico	49
IV.2.1. Diagrama de Preparación, Muestreo y Secuencia de Trabajo	49
IV.2.2. Material y Equipo	50
IV.2.3. Desarrollo Experimental	51
IV.2.3.1.    Preparación y Muestreo	51
IV.2.3.1.1.    Resultados de la Preparación y el Muestreo	51
IV.2.3.2.    Trituración	52
IV.2.3.3.    Molienda	52
IV.2.3.3.1.    Resultados de Molienda	54

IV.2.3.4.	Distribución de Valores	pp. 56
IV.2.3.4.1.	Resultados de la Distribución de Valores	56
IV.2.3.5.	Concentración Gravimétrica (Mesa Wilfley)	59
IV.2.3.5.1.	Resultados de la Prueba No. 1. (Producto -14+100 Mallas)	61
IV.2.3.6.	Concentración Magnética (SMAL)	62
IV.2.3.6.1.	Resultados de la Prueba No. 1 (Concentrado de la Mesa Wilfley)	64
IV.2.3.6.2.	Resultados de la Prueba No. 2 (Producto de Molienda Directa)	65
IV.2.3.7.	Lixiviación	66
IV.2.3.7.1.	Cantidad de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Utilizada en la Lixiviación	67
IV.2.3.7.2.	Resultados de la Lixiviación Bach	68
IV.2.3.7.3.	Resultados de la Prueba Continua	70
<b>V. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>		73
V.1.	De la Caracterización Mineralógica	74
V.2.	Del Análisis Granulométrico	76
V.3.	De la Evaluación de Concentración	77
V.3.1.	Resultados de Molienda (Tiempo 1.5 min).	80
V.3.2.	Resultados de Molienda (Tiempo 3.0 min.)	81
V.3.3.	Resultados de Molienda (Tiempo 5.0 min.)	82
V.4.	De la Lixiviación Bach y Continua	83
V.5.	Estudio Económico	85
<b>VI. CONCLUSIONES</b>		90
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b>		93
<b>ANEXOS</b>		95
Anexo A.	Índices de Difracción	96
Anexo B.	Difractograma de la Muestra de Cabeza	97
Anexo C.	Difractograma del Producto Procedente de Lixiviación	98

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizan operaciones de: muestreo, preparación de muestras y caracterización mineralógica y química, presentando alternativas para lograr una recuperación integral de la mayor parte de los valores de manganeso por medio de procesos de concentración gravimétrica, concentración magnética e concentración hidrometalúrgica, a fin de generar concentrados de manganeso viables económicamente.

La muestra estudiada presenta cierta complejidad a nivel textural y una íntima relación Mn:Fe, por lo que se desarrollaron procedimientos no convencionales para la extracción de manganeso.

Para poder conocer las especies minerales de interés presentes en la muestra se utilizó la difracción de Rayos X, determinando las especies de manganeso: manganocalcita  $\{(Ca,Mn)CO_3\}$ , pirolusita  $\{MnO_2\}$ , rodocrosita  $\{MnCO_3\}$  y psilomelano  $\{Ba^+Mn^{2+}Mn^{4+}_8O_{160}(OH)_{14}\}$ . De forma complementaria se realizó la fluorescencia de Rayos X, a fin de cuantificar de manera semicualitativa la proporción en la que se encuentran algunos elementos, la importancia de conocer estos valores es confirmar el rango de aceptación de los datos proporcionados por otras técnicas analíticas empleadas (absorción atómica, flamometría y gravimetría).

Cabe destacar que debido a la naturaleza de algunas especies como son los minerales amorfos las técnicas antes descritas no permiten su detección de forma definida, por tanto, se procedió a una caracterización mineralógica con microscopio óptico. El cuerpo de la roca es una matriz de carbonatos no bien definida formado por la rodocrosita-manganocalcita, sin embargo, la limitada información bibliográfica no permite aportar información a fin de caracterizar a ambas especies. La pirlita ( $FeS_2$ ) se presenta finamente diseminada en forma de láminas y en menor proporción como masivos. La calcita ( $CaCO_3$ ) está como relleno de fracturas (vetas) con asociación de cuarzo ( $SiO_2$ ) granular.

Con la información recopilada anteriormente se estableció la siguiente metodología de trabajo: En primera instancia la reducción de tamaño de partícula en un molino de bolas combinada con una clasificación, permite una preconcentración, sin embargo, en este caso la combinación de la clasificación no afecta significativamente en los resultados. La finalidad de aplicar procesos de liberación-concentración, es para obtener productos con una relación Mn:Fe de 7:1, útil en la industria de las ferro-aleaciones. La fracción que mejor relación Mn:Fe exhibe es la fracción -100+200 mallas (-150+75  $\mu\text{m}$ ) con un tiempo de molienda de 1.5 min (4.30:1) y con un 10.09 %Mn de distribución. Cabe destacar que a mayor tiempo de molienda se incrementa la generación de finos y la pérdida de valores (17 %Mn con leyes promedio de 15 %Mn), el producto -325 mallas (45  $\mu\text{m}$ ) es difícil de manipular en la etapa subsecuente de separación sólido-líquido.

El producto procedente de molienda se clasificó, la fracción -100 mallas (165  $\mu\text{m}$ ) se utilizó para realizar una concentración gravimétrica (Mesa Wilfley), la pirita (g.e. 4.9-5.2) presenta una gravedad específica diferente a las de los carbonatos (g.e. 3.6-3.7), razón por la cual, esta técnica podría ser una alternativa de concentración de valores de hierro. Los productos más finos (laminas), son los que mejores relaciones Mn:Fe tienen (4.16:1 a 5.17:1). Las propiedades físicas de las especies a separar son usadas para establecer métodos de trabajo, en este caso la susceptibilidad magnética de la pirita, nos ayuda a seguir una serie de pruebas. El equipo usado es un separador magnético marca Eriez de alta intensidad con alimentación manual. La etapa preconcentradora se nota en el producto no magnético, donde las leyes promedio de manganeso son de 19 %, sin embargo, las relaciones Mn:Fe no son favorables. En los productos a 1500 Gauss la relación Mn:Fe es casi 1:1, esto se debe a factores tales como tamaño de partícula, arrastre mecánico, etc. Algunas dificultades

durante la ejecución de las pruebas fueron ocasionadas por la arenosidad. Cabe destacar que en todos los casos se utilizó la misma cantidad de agua de lavado y que esta serie de pruebas se realizó a los concentrados procedentes de Mesa Wilfley. En lo que respecta a la prueba de molienda directa (productos sin clasificación y concentración gravimétrica), ésta no presenta ningún beneficio en la concentración de fierro.

Debido a que los productos obtenidos de las pruebas anteriores no fueron de relevancia, se realizaron pruebas de lixiviación con muestra 100% -14 mallas (1.4 mm), las pruebas fueron en un sistema batch (Jarra Ketler) y en un sistema continuo, utilizando como medio lixivante ácido sulfúrico, en proporciones obtenidas a partir de una reconstrucción mineralógica. Al utilizar un 100% de exceso de  $H_2SO_4$  se tuvieron problemas como la precipitación de calcio en forma de yeso,  $CaSO_4$ . Debido a esta problemática se procedió a utilizar cantidades menores de ácido a la estequiométrica, la lixiviación con 0.50 % $H_2SO_4$  (la mitad del estequiométrico) presenta una disolución de 70.56 %Mn y 16.01 %Fe, con 0.80 % $H_2SO_4$  la disolución es de 86.35 %Mn y 5.17 %Fe, al realizar esta última prueba nuevamente la precipitación de sulfato dificulta la manipulación de la solución rica (licor). En la etapa continua de enriquecimiento la solución no presenta un incremento sustancial, de una etapa a otra, debido a que la solución sólo alcanzó 20 %Mn a 96 horas.

## **I. OBJETIVOS**

### **I. 1. Objetivo General**

El objetivo general del presente trabajo es generar alternativas de beneficio y de recuperación hidrometalúrgica de los valores de manganeso contenidos en una muestra de baja ley.

### **I. 2. Objetivos Particulares**

Caracterización mineralógica y química de la muestra.

Generar la mejor relación Mn:Fe en las etapas de concentración gravimétrica y magnética controlando el contenido de las principales impurezas tales como fierro y calcio.

Recuperar el manganeso por la vía hidrometalúrgica.

## II. INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de manganeso de origen marino sedimentario no tienen bien explicadas las circunstancias que originaron después de la precipitación de carbonatos, grandes acumulaciones en sus sedimentos. Posiblemente debieron ser una consecuencia directa tanto de las concentraciones iónicas de los diferentes componentes, como de las condiciones de acidez y oxidación del ambiente marino, tales como pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y materia orgánica, que debieron marcar condiciones de oxidación y reducción, además de factores físicos. El cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y las arcillas son constituyentes de tipo detrítico por lo cual hay posibilidad de que el manganeso haya precipitado. Pequeñas porciones de algunos yacimientos son clasificados de origen residual o supergénico, derivados de los minerales primarios singenéticos. Las rocas carbonatadas se lixiviaron con aguas meteóricas ácidas que pusieron en solución iones  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  que al encontrarse en presencia de oxígeno, el manganeso y algo de hierro precipitan en forma de hidróxido, el hierro también puede cristalizar como especie oxidada e hidratada (hematita o goetita). Todas las condiciones geográficas favorecen este proceso: exceso de humedad, vegetación, confinamiento de la circulación de las soluciones por la gran permeabilidad de las capas superiores, en contraste con las rocas impermeables.

A pesar de que México explota y exporta una gran cantidad de minerales de manganeso, casi no hay estudios tendientes a un aprovechamiento integral de esta fuerte riqueza y están descuidados principalmente los yacimientos de baja ley, razón por la cual se presenta el siguiente estudio. Debido a la cantidad de manganeso, éste puede ser utilizado como materia prima en la industria de las ferro-aleaciones, sin embargo, la condicionante para su aplicación es la relación manganeso-ferro que debe ser de 7:1 o superior.

### III. ANTECEDENTES

---

### III. 1. HISTORIA

La palabra MANGANESO<sup>(a)</sup>, antiguamente se conocía con el nombre de magnesia negra. Los antiguos egipcios y romanos empleaban los óxidos de manganeso para blanquear el vidrio. El manganeso metálico fue obtenido por primera vez por Gahn en 1774. El valor principal del manganeso fue conocido a finales del siglo XVIII, como purificador del arrabio al fundir hierro. Estos sucesos revolucionaron completamente a la industria siderúrgica y en el año de 1856, con la introducción del proceso Bessemer, se incrementó gradualmente la demanda de concentrados de manganeso. Otro aspecto que aumentó considerablemente la demanda de manganeso fue la aplicación en cierto tipo de baterías, en el año de 1868 el francés Georges Leclanché, inventó una celda, que con modificaciones se convirtió en la pila seca.

El manganeso es un metal gris semejante al fierro. Éste tiene un número atómico de 25 con un peso atómico de 54.94 y corresponde al grupo VII de la tabla periódica. Las propiedades importantes del manganeso se muestran en la Tabla No. 1. Alrededor del 90% del manganeso consumido es usado en la industria metalúrgica. La presencia del manganeso en el metal caliente de fierro mejora la desulfuración, incrementando la producción en el proceso básico de oxígeno (BOF), prolongando la vida del refractario y reduciendo el consumo de fundente. Con la adición de manganeso se incrementa la templabilidad y resistencia a la abrasión en el caso de los aceros.

### III. 2. MINERALOGÍA DEL MANGANESO

#### III. 2. 1. TIPO DE DEPÓSITOS

Los depósitos de manganeso pueden ser divididos en seis tipos<sup>(b)</sup>. Éstos son: *depósitos hidrotermales, depósitos de sedimentarios, depósitos asociados con corrientes de lava submarina, depósitos metamórficos, depósitos residuales y depósitos en el fondo del mar.*

Tabla No. 1. Propiedades del manganeso <sup>(a)</sup>

<i>Propiedades</i>	
Punto de Fusión	1244 °C
Punto de Evaporación	2060 °C
Densidad a 20 °C	7.40 g/cm <sup>3</sup>
Calor Especifico a 25.2 °C	0.48 J/g
Calor Latente de Fusión	244 J/g
Coefficiente Lineal de Expansión 0-100 °C	22.80x10 <sup>-6</sup> °C
Potencial de Electrodo Estándar	1.13 V
Susceptibilidad Magnética	1.21x10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /kg

Los depósitos con mejor uso comercial son los sedimentarios, seguido por los depósitos residuales. Los depósitos de sedimentarios marinos son los más importantes en términos económicos y de producción. Éstos presentan características estratiformes, lenticulares y fueron formados por procesos químicos que segregan manganeso durante la depositación de sedimentos.

Los depósitos del tipo sedimentario marino comúnmente contienen dos tipos de capas, una de óxido de manganeso y otra de carbonato de manganeso. Ambas capas van intercaladas con caliza y esquisto, típica de un medio ambiente de depósito de agua superficial. Los depósitos de óxidos son extensos y contienen un mínimo de 25 %Mn. Las capas de carbonato tienen únicamente 15 %Mn, con un 30 %Mn se consideran de alto grado. Los depósitos más grandes, son el Nikopol y Chuiatura ubicados en la ex-U.R.S.S. y el del Kalahari en Sudáfrica, de origen sedimentario. En México, los localizados en el Estado de Hidalgo son de importancia geoestratégica.

Otros depósitos de importancia económica de manganeso son los residuales o de enriquecimiento secundario, resultado de la concentración y/o alteración del manganeso en depósitos existentes por la exposición a la intemperie y la acción del agua superficial de la Tierra. Estos depósitos son restringidos por la humedad en las regiones tropicales donde es intensa la exposición al

intemperismo provocando la lixiviación de muchos elementos de las rocas. Los depósitos de este tipo incluyen el de Serró de Navío en Brasil, el Nsuta en Ghana y el de Moanda en Gabón. La rodocrosita del área de Butte y Philipsburg Montana, U.S.A. son ejemplo de depósitos hidrotermales por debajo de la superficie debido a la acción del calentamiento, mineralizando las aguas. La Tabla No. 2 muestra la composición química de varios depósitos importantes de minerales de manganeso.

Tabla No. 2. Composición química de depósitos importantes de manganeso (base % seco)  
(b)

Localidad	Humedad	Mn	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	BaO	P	As	K <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>
Amapa, Brasil	4.8 %	48.2	6.2	3.4	5.0	0.11	0.05	0.18	0.09	0.17	1.60	0.04	12.9
Moanda, Gabón	5.2 %	51.4	2.6	2.6	6.1	0.08	0.06	0.21	0.11	0.01	0.72	0.07	14.1
Groote Eylandt, Australia	3.9 %	49.2	3.6	6.1	4.8	0.06	0.08	0.45	0.07	0.01	1.50	0.02	13.6
Sudáfrica													
Mamatwan	1.6 %	38.4	5.0	4.2	0.4	13.4	3.30	0.02	0.02	---	0.03	13.80	5.6
Wessels	1.3 %	47.0	13.2	4.9	3.2	4.10	0.74	0.36	0.04	---	0.12	1.70	6.3
Molango <sup>(2)</sup> , México	0.2 %	38.8	8.1	14.2	3.2	8.50	10.60	0.01	0.07	0.01	0.03	0.15	0.1
Nikopol, U.S.S.R.	6.9 %	44.8	1.8	12.8	1.9	1.70	1.60	0.46	0.21	---	1.20	1.50	10.2

(1) Asociado con manganeso en exceso de MnO. (2) Nódulos calcinados.

El fondo del océano también contiene una variedad de minerales de manganeso y otros metales. Estos metales son contenidos en esferas de material criptocristalino, conocido como nódulos. Los nódulos de manganeso formados in-situ son de lento crecimiento debido a los materiales alrededor de los núcleos, por ejemplo, fragmentos de piedra pómez, coral, ceniza volcánica o dientes de tiburón. La concentración de bandas de fierro y óxidos de manganeso son acumulados precipitando en las aguas de los océanos. Cuando los óxidos precipitan, éstos absorben y atrapan

otros iones metálicos, especialmente manganeso, cobre, níquel y cobalto, sin embargo, no hay formación o enriquecimiento de minerales metálicos. En general los nódulos están diseminados, algunas áreas de interés económico, a prueba son: el Norte del Pacífico, América Central y las Trincheras Marinas; el Sur del Pacífico, en medio de la Isla de Australia, la Trinchera Tonga-Kermadec y la Cordillera de la Antártica en el Pacífico; en menor extensión, en el Norte del Antártico, el Sur del Atlántico y el Océano de la India.

### III. 2. 2. MINERÍA DEL MANGANESO

Las minas se clasifican desde luego por el mineral que producen, pero también por la forma de la veta o yacimiento. Si el yacimiento posee acumulaciones de mineral se le llama *macizo*. Si el mineral se halla llenando grietas o fracturas, se llama *filón*. Si se encuentra en forma de capa cubriendo grandes extensiones se dice que está precisamente así por *capas o estratos*. Las minas también pueden explotarse a cielo abierto o por galerías, según se encuentre localizado el mineral. Las minas a cielo abierto, como su nombre lo indica, se explotan descubriendo grandes extensiones de terreno con maquinaria pesada para extraer el material de los yacimientos en capas o de los masivos. Entre los minerales que normalmente se extraen así se encuentran: el carbón, cobre, yeso, bauxita y los materiales de construcción. La producción minera de manganeso se realiza por ambas técnicas.

#### III. 2. 2. 1. ZONAS MINERAS

Los antecedentes de la minería del manganeso se remontan al presente siglo, fueron famosas las explotaciones del área de Autlán, Jalisco en la época anterior a la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Más recientemente a las operaciones en distintos puntos del Estado de Hidalgo, de donde se extrae más del 80 % del manganeso en forma de mineral. Otros estados fabrican productos derivados del manganeso tales como ferro-aleaciones entre los que podemos mencionar Veracruz, Durango y Jalisco. La Figuras No. 1 muestra los principales centros

mineros de México y en la Tabla No. 3 se enlistan algunos estados que procesan manganeso de forma complementaria.

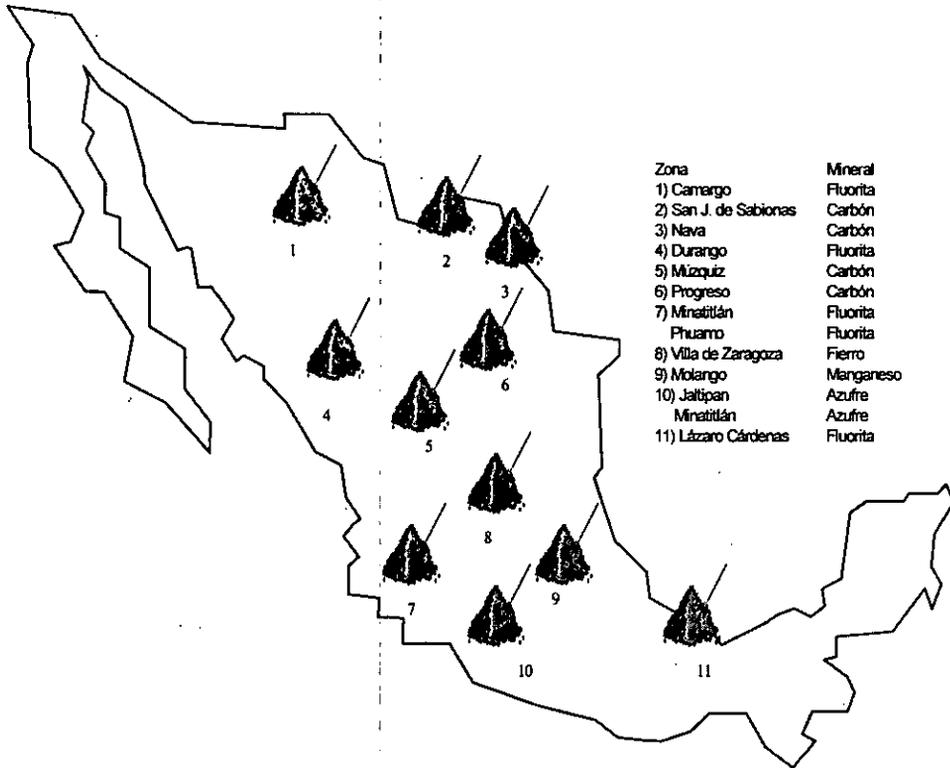


Figura No. 1. Principales centros mineros en México durante 1990 <sup>(c)</sup>

Tabla No. 3. Estados de México que procesan manganeso, indicando el número de localidades mineras en ese lugar (6)

Estado	Número de Regiones Mineras	Minerales Procesados	
		Metálicos	No Metálicos
Baja California Norte	10	En cromo, magnesio, fierro, cobre, oro, plata, manganeso, tungsteno, plomo, zinc y oro de placer.	
Baja California Sur	4	En oro, cobre, manganeso, níquel, zinc, cromo, oro de placer y cobalto.	
Coahuila	8	En cobre, oro, tungsteno, zinc, plata, plomo, litio, fierro y manganeso.	En fluorita, barita, carbón, celestita, cloruro y sulfato de sodio, óxido de manganeso, yeso y mármol.
Chiapas	12		
Chihuahua	15	En oro, plata, tungsteno, zinc, manganeso, antimonio, plomo, cobre, molibdeno, cobalto, estaño, fierro y uranio, escasamente vanadio y mercurio.	
Guanajuato	15	En oro, plata, plomo, zinc, mercurio, tungsteno, manganeso, estaño y oro de placer, cobre y molibdeno.	
Hidalgo	6	En oro, plata, plomo, zinc, fierro y manganeso.	
Jalisco	5	En oro, plata, plomo, zinc, cobre, fierro, manganeso y estaño.	
Michoacán	13	En fierro, cobre, zinc, oro, plata, plomo, molibdeno, tungsteno, antimonio, manganeso y estaño predominantemente en la Sierra Madre del Sur.	
Nayarit	12	En oro, plata, plomo, zinc, cobre, manganeso, estaño y oro aluvial.	
Puebla	5	En oro, plata plomo, cobre, zinc, fierro, manganeso, cromo, níquel y antimonio.	
Sonora	13	En oro, plata, plomo, zinc, antimonio, manganeso, molibdeno, fierro, cobre, tungsteno y oro de placer.	
Zacatecas	14	En oro, plata, plomo, zinc, cadmio, mercurio, estaño, manganeso y cobre.	

La Figura No. 2 indica los porcentajes de producción de algunos elementos durante 1990, el manganeso aporta el 1.4 % del PIB.

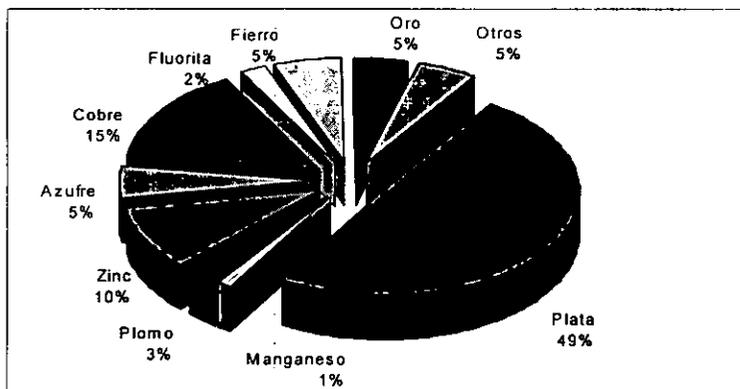


Figura No. 2. Porcentaje de manganeso producido a nivel nacional en 1990 <sup>(c)</sup>

### III. 2. 2. 2. PRODUCCIÓN DE MANGANESO

Los estados de Chihuahua e Hidalgo tienen la mayor participación en el valor total de la producción minera nacional de manganeso, ver Tabla No. 4.

Tabla No. 4. Principales estados productores de manganeso en México durante 1996 <sup>(c)</sup>

<i>Estado</i>	<i>Posición a Nivel Nacional</i>	<i>Participación en el Valor Total Nacional, %</i>	<i>Principales Minerales Producidos Agrupados por Orden de Importancia</i>
Chihuahua	4	10.3	Zinc, plomo, plata, cobre, oro, cadmio, tungsteno y <b>manganeso</b> .
Hidalgo	9	3.3	<b>Manganeso</b> , zinc, plata, plomo, oro, cobre y cadmio.

En 1996 el procesamiento de manganeso en el país fue de 173 380 t, al año siguiente se tuvo un incremento del 11.2 %. En los niveles internacionales el manganeso aporta menos del 3.5 % de participación, ocupando el séptimo lugar a nivel internacional.

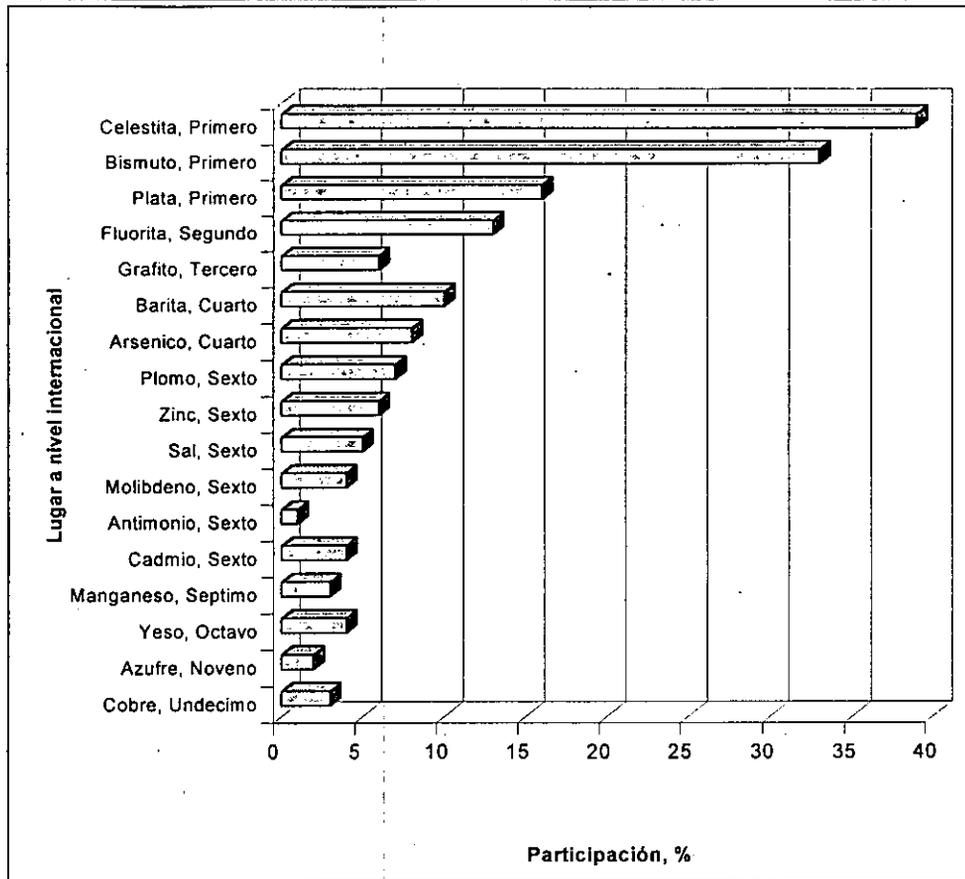


Figura No. 3. Posición internacional de elementos beneficiados en México, 1996-1997 <sup>(c)</sup>

### III. 2. 2. 3. MINERALES DE MANGANESO <sup>(c), (d)</sup>

Más de cien minerales contienen manganeso. Los más importantes minerales de manganeso, junto con sus propiedades físicas, se mencionan en la Tabla No. 6. La principal procedencia comercial de manganeso es a partir de *pirolusita*, *psilomelano*, *manganita* y *rodocrosita*.

Para su beneficio, todos los minerales son triturados y cribados. En general, el triturado, cribado y lavado pueden mejorar la calidad del mineral de 1 a 3 %Mn. El lavado puede mejorar el grado del mineral si éste contiene materiales estériles de arcillas, tal como los minerales de Groote Eylandt

en Australia. El lavado quita los finos, sin embargo, éstos tienen un alto contenido de manganeso de 20 a 30 %, lo que reduce la recuperación.

Los minerales de carbonato de manganeso pasan a través de un proceso de nodulización, que involucra trituración y/o calcinación del mineral en un horno rotatorio para liberar el dióxido de carbono formando nódulos de aproximadamente 25 mm de diámetro. El nodulizado puede incrementar el contenido de manganeso en los minerales de carbonato de un 12 % a un 15 %. Este proceso es usado en la mina de *Molango, México* y, desde 1988, en la mina de Nsuta en Ghana.

Tabla No. 5. Propiedades de los minerales más importantes de manganeso <sup>(c)</sup>

<i>Mineral</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Color</i>	<i>% Mn</i>	<i>Dureza</i>	<i>Gravedad Específica</i>
Pirolusita	MnO <sub>2</sub>	Gris Acero a Negro	63	6 a 7	5.0
Ramsdalita	MnO <sub>2</sub>	Gris Oscuro a Negro	63	3	4.7
Polianita	MnO <sub>2</sub>	Negro a Gris Acero	63	6 a 6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	5.0
Manganita	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> H <sub>2</sub> O	Negro a Gris Acero	62	4	4.3
Criptomelano	KMn <sub>8</sub> O <sub>16</sub>	Negro a Gris Acero	45 a 60	5 a 6	4.3
Psilomelano	BaMn <sub>9</sub> O <sub>18</sub> · 2H <sub>2</sub> O	Negro a Gris Oscuro	52	5 a 6	4.4 a 4.7
Hausmanita	MnMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Pardo a Negro	72	5	4.7 a 5.0
Braunita	3Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnSiO <sub>3</sub>	Pardo a Negro	50 a 60	6 a 6	4.7 a 4.9
Bixbita	(Mn,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Negro	30 a 40	6	5.0
Jacobsita	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Negro	24	6	4.8
Hollandita	BaMn <sub>8</sub> O <sub>16</sub>	Negro a Gris Acero	53	6	4.5 a 5.0
Coronadita	PbMn <sub>8</sub> O <sub>16</sub>	Negro a Gris Acero	49	5 a 6	4.5 a 5.0
Rodocrosita	MnCO <sub>3</sub>	Rojo Rosado a Pardo	48	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> a 4 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	3.3 a 3.6
Rodonita	MnSiO <sub>3</sub>	Rosa	42	5 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> a 6 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	3.3 a 3.6
Alabandita	MnS	Negro Fierro	63	3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> a 4	3.9

Tabla No. 6. A. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Acrocordita	$Mn_4Mg(AsO_4)_2(OH)_4 \cdot 4H_2O$	3½	3.26
Alabandita	MnS	3½-4	3.95-4.04
Alactita	$Mn_7(AsO_4)_2(OH)_8$	4½	3.83
Aldzhanita	$Ca_3B_2O_3, Cl, Mg, Mn$		2.21
Alodelfita	$5MnO_4 \cdot 2(Mn, Al)_2O_3As_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 5H_2O$		
Alurgita	Variedad de Moscovita		
Alleghanyita	$Mn_5Si_2O_8(OH)_2$	5½	4.02
Alluaudita	$(Na, Fe^{3+}, Mn^{2+})PO_4$	5-5½	3.52
Apjohnita	$Mn^{2+}Al_2(SO_4)_4 \cdot 24(o\ 22) H_2O$	1½	1.78
Ardenita	$Mn_5Al_5(As, V)O_4Si_5O_{20}(OH)_2 \cdot 2H_2O$	6-7	3.62
Armangite	$Mn_3(AsO_3)_2$	~4	4.43
Arrojádit	$(Na, Ca)_2(Fe^{2+}, Mn^{2+})_3(PO_4)_4$	~4	4.43
Arsencelasita	$2Mn(OH)_2 \cdot Mn_3(AsO_4)_2$		
Arseniopleita	$(Mn, Ca)_9(Mn, Fe)_2(OH)_6(AsO_4)_6$		
Arsenoclasite	$Mn_5(OH)_4(AsO_4)_2$	5-6	4.16
Astrofilita	$(K, Na)_3(Fe, Mn)_7Ti_2Si_8O_{24}(O, OH)_7$	3	3.30-3.40
Attakolita	$(Ca, Mn, Sr)_3Al_6(PO_4)_7SiO_4 \cdot 3H_2O$		3.23
Aurorita	$(Mn, Ag, Ca)Mn_3O_7 \cdot 3H_2O$	< 3'	
Babingtonita	$Ca_2Fe^{2+}Fe^{3+}Si_5O_{14}OH$	5½-6	3.36
Backebushita	$(Pb, Mn, Fe)_3V_2O_8 \cdot H_2O$		
Backstromita	$Mn(OH)_2$		
Bannisterita	$(K, Na, Ca)Mn_{10}Al_2Si_{15}O_{44} \cdot 10H_2O$	4	2.92
Barkevikita	$(Na, K)Ca_2(Fe, Mg, Mn)_5(Si, Al)_8O_{22}(OH, F)_2$	5-6	3.35-3.44
Barysilita	$MnPb_8(Si_2O_7)_3$	3	6.55-6.71
Beldongrita	$6Mn_3O_5 \cdot Fe_2O_3 \cdot 8H_2O$		
Bementita	$Mn_8Si_6O_{15}(OH)_{10}$	6	2.90-3.10
Bermanita	$Mn^{2+}Mn^{3+}_2(PO_4)_2(OH)_2 \cdot 4H_2O$	3½	2.84

Tabla No. 6. B. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Bertossaita	$(\text{Li,Na})_2(\text{Ca,Fe,Mn})\text{Al}_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH,F})_4$	6	3.10
Berzelita	$(\text{Ca,Na})_3(\text{Mg,Mn})_2(\text{AsO}_4)_3$	4½-5	~4.08
Beusita	$(\text{Mn,Fe,Ca,Mg})_3(\text{PO}_4)_2$	5	3.70
Birnessita	$(\text{Na,Ca})\text{Mn}_7\text{O}_{14} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1½	3.00
Bjarbyita	$(\text{Ba,Sr})(\text{Mn,Fe,Mg})_2\text{Al}_2(\text{OH})_3(\text{PO}_4)_3$	4	4.02
Bodenbenderita	Silicato y Titanato de Al, Y y Mn	6-6½	3.50
Brandita	$\text{Ca}_2\text{Mn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3½	3.67
Braunita	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6\text{SiO}_{12}$		
Brackebuschita	$\text{Pb}_4(\text{Mn,Fe})(\text{VO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		6.05
Brendenburgita	$3\text{Mn}_3\text{O}_4 \cdot 2\text{Fe}_3\text{O}_3$		
Bustamita	$(\text{Ca,Mn})\text{Si}_2\text{O}_6$	5½-6½	3.32-3.43
Calcofanita	$\text{ZnMn}_3\text{O}_7 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2½	3.98
Cafarsita	$\text{Ca}_3(\text{Fe,Ti})_3\text{Mn}(\text{AsO}_4)_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5½-6	3.90
Canasita	$(\text{Na,K})_3(\text{Ca,Mn,Mg})_4(\text{Si}_2\text{O}_5)_5(\text{OH,F})_3$		2.70
Carfolita	$\text{MnAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$	5-5½	2.90-3.04
Carynita	$(\text{Ca,Na,Pb,Mn})_3(\text{Mn,Mg})_2(\text{AsO}_4)_{3-y}(\text{OH})_x$	4	4.29
Caryopilita (Ectropita)	$\text{Mn}_6(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$	3-3½	2.83-2.91
Catoptrita	$\text{Mn}_{13}\text{Sb}_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{28}$	5½	4.56
Caswellita (Biotita Alterada)	$\text{Mn}_{14}\text{Sb}_2(\text{Al,Fe})_4(\text{SiO}_4)_2\text{O}_{21}$ $\text{Ca}_4(\text{Mn}^{3+},\text{Al,Fe})_4\text{Si}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$		
Chambersita	$\text{Mn}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	7	3.49
Chavesita	Fosfato Hidratado de Ca y Mn	~3	
Childrenita	$(\text{Fe,Mn})\text{AlPO}_4(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5	3.20
Clormanganokalita	$\text{K}_4\text{MnCl}_6$	2½	2.31
Clorita	$\text{A}_6(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8;$ $\text{A} = \text{Mg,Fe}^{2+},\text{Fe}^{3+},\text{Mn}$		
Clorofoenicita	$(\text{Mn,Zn})_5\text{AsO}_4(\text{OH})_7$	3-3½	3.46
Colombita (Tantalita)	$(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$	6	5.15
Congolita	$(\text{Fe,Mg,Mn})_3\text{ClB}_7\text{O}_{13}$		
Coronadita	$\text{Pb}(\text{Mn}^{2+},\text{Mn}^{4+})_8\text{O}_{16}$	4½-5	5.44
Crednerita	$\text{CuMnO}_2$	4	5.34
Cryptomelano	$\text{K}(\text{Mn}^{2+},\text{Mn}^{4+})_8\text{O}_{16}$	6-6½	~4.30
Danalita	$(\text{Fe,Mn,Zn})_4\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{S}$	5½-6	3.31-3.46
Dannemorita	$(\text{Fe,Mn,Mg})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		

Tabla No. 6. C. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Crednerita	$\text{CuMnO}_2$	4	5.34
Cryptomelano	$\text{K}(\text{Mn}^{2+}, \text{Mn}^{4+})_8\text{O}_{16}$	6-6½	~4.30
Danalita	$(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Zn})_4\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{S}$	5½-6	3.31-3.46
Dannemorita	$(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		
Deerita	$(\text{Fe}, \text{Mn})_{13}(\text{Fe}, \text{Al})_7\text{Si}_{13}\text{O}_{44}(\text{OH})_{11}$		3.84
Deeningita	$(\text{Mn}, \text{Ca}, \text{Zn})\text{Te}_2\text{O}_5$	4	5.05
Despujolsita	$\text{Ca}_3\text{Mn}^{4+}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	~2½	2.46
Dickinsonita	$\text{H}_2\text{Na}_6(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})_{14}(\text{PO}_4)_{12} \cdot \text{H}_2\text{O}$	3½-4	3.41
Dietrichita	$(\text{Zn}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	2	
Dixenita	$\text{Mn}_2(\text{OH})_2\text{SiO}_4(\text{AsO}_3)_2$	3-4	4.20
Ekmanita	$(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})_6(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{18} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2-2½	2.79
Ectropita	$\text{Mn}_2\text{Si}_8\text{O}_{28} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4	2.46
Eosforita	$(\text{Mn}, \text{Fe})\text{AlPO}_4(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	5	3.05
Ericaita	$(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	7-7½	3.17-3.27
Ericssonita	$\text{BaMn}_7\text{Fe}(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{O}, \text{OH})$	4½	4.21
Ernstita	$(\text{Mn}^{2+}_{1-x}\text{Fe}^{3+}_x)\text{Al}(\text{PO}_4)(\text{OH})_{2-x}\text{O}_x$ X= 0-1	3-3½	3.07
Espesartita	$\text{Na}_4(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Ce}, \text{Mn})_2\text{ZrSi}_6\text{O}_{17}(\text{OH}, \text{Cl})_2$	5-5½	2.74-2.98
Esquematita	$3\text{MnO}_2 \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	5½-6	
Esquizolita	$\text{HNa}(\text{Ca}, \text{Mn})_2(\text{SiO}_3)_3$		
Estewartita	$3\text{MnO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		2.94
Esturtita	$6(\text{Mn}, \text{Ca}, \text{Mg})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot 23\text{H}_2\text{O}$	3	2.05
Eveita	$\text{Mn}_2(\text{OH})(\text{AsO}_4)$	4	3.76
Fairfieldita	$\text{Ca}_2(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})(\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3½	3.08
Faheyita	$(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Na})\text{Be}_2\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		2.66
Feitknechtita	$\beta\text{-MnO}(\text{OH})$		3.80
Fenaksita	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Mn})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})_2$ (OH, F)	5-5½	2.74
Ferrichterita	$(\text{Na}, \text{Ca})_3(\text{Mg}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	5-6	3.44
Ferri-Sickerita	$(\text{Li}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+})\text{PO}_4$	~4	3.20-3.40
Ferroaxinita	$\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_2\text{BSiO}_{15}(\text{OH})$ con $\text{Ca} > 1.5$ ; $\text{Fe} > \text{Mn}$		
Filowita	$\text{H}_2\text{Na}_6(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ca})_{14}(\text{PO}_4)_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	4½	3.43
Flankinita	$(\text{Zn}, \text{Mn}, \text{Fe}^{2+})(\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{3+})_2\text{O}_4$	5½-6½	5.07-5.22
Flinquita	$\text{Mn}^{2+}_2\text{Mn}^{3+}\text{AsO}_4(\text{OH})_4$	4½	3.78
Fosfoferrita	$(\text{Fe}, \text{Mn})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	3-3½	3.29

Tabla No. 6. D. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Friedelita	$(\text{Mn,Fe})_8\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH,Cl})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	4-5	3.04-3.06
Fritzsheita	$\text{Mn}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	2½-3½	3.50
Frondelita	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{Fe}^{3+}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5$	4½	3.48
Gageita	$\text{H}_8(\text{Mn,Mg})_7\text{Si}_2\text{O}_{15}$		3.58
Galaxita	$\text{MnAl}_2\text{O}_4$	7½-8	4.10
Gamagarita	$\text{Ba}_4(\text{Fe,Mn})_2\text{V}_5\text{O}_{15}(\text{OH})_2$	4½-5	4.62
Ganofilita	$\text{NaMn}_3(\text{OH})_4(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}$	4-4½	2.84-2.88
Garnet	$\text{A}_3\text{B}_2(\text{SiO}_4)_3$ A = Ca, Mg, Fe <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> ; B = Al, Fe <sup>3+</sup> , Cr, V, Zr, Ti		
Gaudefroyita	$\text{Ca}_4\text{Mn}_{3-x}[(\text{BO}_3)_2/(\text{CO}_3)/(\text{O,OH})_3]$ con X ~ 0.17	6	3.35-3.50
Genthelvita	$(\text{Zn,Fe,Mn})_4\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{S}$	6-6½	3.62
Gerasimovskita	$(\text{Mn,Ca})_2(\text{Nb,Ti})_5\text{O}_{12} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	2	2.52-2.58
Giannettita	$\text{Na}_3\text{Ca}_3\text{Mn}(\text{Zr,Fe})\text{TiSi}_6\text{O}_{21}\text{Cl}$		
Glaucoicroíta	$\text{CaMnSiO}_4$	6	3.48
Gonyerita	$(\text{Mn,Mg,Fe})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2½	3.01
Goseletita	Silicato de Mn		
Graftonita	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Ca})_3(\text{PO}_4)_2$	5	3.67-3.79
Grifita	$(\text{Na,Al,Ca,Fe})_3\text{Mn}_2(\text{PO}_4)_{2.5}(\text{OH})_2$	5½	3.40
Groutita	$\text{HMnO}_2$	~5½	4.14
Grovesita	$(\text{Mn,Fe,Al})_{13}(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_{14}$		3.15
Hagendorfitita	$(\text{Na,Ca})(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_2(\text{PO}_4)_2$	3½	3.71
Hancoquita	Silicato de Pb, Mn, Ca, Al, etc.	6-7	4.00
Harstigita	$\text{MnCa}_6(\text{Be}_2\text{OOH})_2(\text{Si}_3\text{O}_{10})_2$	5½	3.16
Hauerita	$\text{MnS}_2$	4	3.46
Hausmannita	$\text{Mn}^{2+}_2\text{Mn}^{4+}\text{O}_4$	5½	4.84
Helvita	$\text{Mn}_7\text{FeBe}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{S}_2$	6	3.17-3.37

Tabla No. 6. E. Minerales de manganeso <sup>(a)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Hemafibrita	$Mn_3As_2O_8 \cdot 3Mn(OH)_2 \cdot 2H_2O$	3	3.60
Hematolita	$Mn_4Al(OH)_2[AsO_4][AsO_3]_2$	3½	3.49
Hendricksita	$K(Zn,Mn)_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	2½-3	3.40
Heterolita	$ZnMn_2O_4$	6	5.18
Hidroheterolita	$(Fe^{3+}, Mn^{3+})PO_4$	4-4½	3.41
Hielmita	Estannotantalato de Y, Fe, Mn, Ca		5.82
Hodgkinsonita	$MnZn_2(OH)_2SiO_4$	4½-5	3.91-3.99
Holandita	$Ba(Mn^{2+}, Mn^{4+}, Fe^{3+})_8O_{16}$	6	4.95
(Manganato de Mn)			
Holdenita	$(Mn,Zn)_6(AsO_4)(OH)_5O_2$	4	4.11
Howieita	$Na(Fe,Mn)_{10}(Fe,Al)_2Si_{12}O_{31}(OH)_{13}$		3.38
Huebneria	$MnWO_4$	4-4½	7.18
Hünherkobelita	$(Na_2,Ca)(Fe^{2+}, Mn^{2+})_2(PO_4)_2$	5	3.50-3.60
Hureaulita	$H_2(Mn,Fe)_5(PO_4)_4 \cdot 4H_2O$	3½	3.19
Hydrohetaerolita	$Zn_2Mn_4O_8 \cdot H_2O$		
Ilesita	$(Mn,Zn,Fe)SO_4 \cdot 4H_2O$		2.26
Inesita	$Ca_2Mn_7Si_{10}O_{28}(OH)_2 \cdot 5H_2O$	5½	3.03
Ixiolita	$(Ta,Fe,Sn,Nb,Mn)_4O_8$	6-6½	7.03-7.23
Jacobsita	$(Mn,Fe,Mg)(Fe,Mn)_2O_4$	5½-6½	4.76
Jimboita	$Mn_3B_2O_6$	5½	3.98
Johannsenita	$Ca(Mn,Fe^{2+})Si_2O_6$	6	3.44-3.55
Jouravskita	$Ca_6Mn_2(SO_4)_2(CO_3)_7(OH)_{12} \cdot 24H_2O$	2½	1.95
Kempita	$Mn_2Cl(OH)_3$	~3½	~2.94
Knebelita	$(Fe,Mn)_2SiO_4$	6½	3.96-4.25
Kentrolita	$PbMn^{3+}_2Si_2O_9$	5	6.20
Közulita	$(Na,K,Ca)_3(Mn,Mg,Fe,Al)_5Si_8O_{22}(OH,F)_2$	4-4½	8.48
Kupletsita	$(K,Na)_2(Mn,Fe)_4(Ti,Nb)Si_4O_{14}(OH)_2$	~3	3.20-3.23
Kurchatorita	$Ca(Mg,Mn)B_2O_5$	4½	3.02

Tabla No. 6. F. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

<i>Mineral</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Dureza</i>	<i>Densidad</i>
Kutnahoria	$\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Fe})(\text{CO}_3)_2$	3½-4	3.12
Lacroixita	$\text{Na}_2(\text{Ca}, \text{Mn})_4\text{Al}_3(\text{F}, \text{OH})_4\text{P}_3\text{O}_{16} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	4½	3.13
Landauita	$(\text{Mn}, \text{Zn}, \text{Fe})(\text{Fe}, \text{Ti})_3\text{O}_7$	7½	4.42
Landesita	$\text{Mn}_{10}\text{Fe}^{3+}_3(\text{PO}_4)_8(\text{OH})_5 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$	3-3½	3.03
Langbanita	$\text{Mn}^{2+}_4\text{Mn}^{3+}_9\text{Sb}^{5+}\text{Si}_2\text{O}_{24}$	6½	4.60-4.80
Lauecita	$\text{MnFe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	3	2.44-2.49
Lavenit	$(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Mn})_3(\text{Zr}, \text{Ti}, \text{Fe})(\text{SiO}_4)_2\text{F}$	6	3.51-3.55
Leucofoenicita	$\text{Mn}_7\text{SiO}_3\text{O}_{12}(\text{OH})_2$	5½-6	3.85
Lipscombite	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$		3.66
Lithioforita	$(\text{Al}, \text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$	3	3.14-3.40
Litiofilita	$\text{Li}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{PO}_4$	4-5	3.34
Lomonosovita	$\text{Na}_8(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})\text{Ti}_3\text{Si}_4\text{P}_2\text{O}_{24}$	3-4	3.15
Loseyita	$(\text{Zn}, \text{Mn})_7(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_{103}$	~3	3.27
Malardita	$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	~2	1.85
Magnesium- Chlorofoenicita	$(\text{Mg}, \text{Mn})_3(\text{AsO}_4)(\text{OH})_7$		3.37
Magnocolumbita	$(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	~6	5.17
Magnussonita	$(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Cu})_3(\text{AsO}_3)_3(\text{OH}, \text{Cl})$	3½-4	4.30
Manganaxinita	$\text{Ca}_2(\text{Mn}, \text{Fe})\text{Al}_2\text{BSi}_4\text{O}_{15}(\text{OH})$ con $\text{Ca} > 1.5$ y $\text{Mn} > \text{Fe}$		
Manganese- Hörnesita	$(\text{Mn}, \text{Mg})_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	1	2.64
Mangan-Neptunita	$(\text{Na}, \text{K})_2(\text{Mn}, \text{Fe})\text{TiSiO}_4\text{O}_{12}$		
Mangano-steenstrupina	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Tg}, \text{Ca})\text{Mn}(\text{SiO}_3)(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5½-6	3.29
Manganita	$\text{MnO}(\text{OH})$	4	4.33
Manganotantalita	$(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$	6-6½	8.00
Manganoestilbita	$\text{Mn}^{2+}_7\text{Sb}^{5+}\text{As}^{5+}\text{O}_{12}$		4.95

Tabla No. 6. G. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Manganolangebeinita	$K_2Mn_2(SO_4)_3$		3.02
Manganpyrosmalita	$(Mn,Fe)_8(Si_6O_{15})(OH,Cl)_{10}$	4½	3.13
Manganosita	MnO	5½	5.36
Magnetoplumbita	$(Pb,Mn)_2Fe_6O_{11}$	6	5.517
Manjiroita	$NaMn_8O_{16} \cdot nH_2O$	7	4.29
Margarosanita	$(Ca,Mn)_2PbSi_3O_9$	2½-3	4.33
Marokita	$CaMn_2O_4$		4.64
McGovernita	$(Na,Ca)(Ba,Y,U)_2(CO_3)_3 \cdot (1 \text{ ó } 2) H_2O$		3.58
Melanostibita	$Mn(Sb,Fe)O_3$	4	5.63
Messelita	$Ca_2(Fe^{2+},Mn^{2+})(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$	3½	3.16
(Neomesselita)			
Mooreita	$(Mg,ZnMn)_8SO_4(OH)_{14} \cdot (3 \text{ ó } 4) H_2O$	3	2.47
Muirita	$Ba_{10}Ca_2MnTiSi_{10}O_{30}(OH,Cl,F)_{10}$	~2½	3.86
Nasledovita	$PbMn_3Al_4(CO_3)_4(SO_4)O_5 \cdot 5H_2O$	2	3.07
Natrofilita	$NaMnPO_4$	4½-5	3.41
Naujakasita	$(Na,K)_6(Fe,Mn,Ca)(Al,Fe)_4Si_8O_{26} \cdot H_2O$	2-3	2.62
Neotocita	$Mn_2Fe_2Si_4O_{13} \cdot 6H_2O$	3-4	2.43
Neptunita	$(Na,K)_2(Fe^{2+},Mn)TiSi_4O_{12}$	5-6	3.19-3.23
Ninningerita	$(Mg,FeMn)S$		3.21-3.68
Niobofyllita	$(K,Na)_3(Fe,Mn)_6(Nb,Ti)_2Si_8(O,OH,F)_{31}$		3.42
Nordita	$Na_3Ce(Sr,Ca)(Mn,Mg,Fe,Zn)_2Si_6O_{18}$	5	3.43-3.49
Nsutita	$\gamma\text{-}MnO_2 \cdot Mn^{4+}_{1-x}Mn^{2+}_xO_{2-2x}(OH)_{2x}$ X= 0.06-0.07	8½	4.86
Oldhamita	$(Ca,Mn)S$	4	2.58
Orientita	$Ca_2Mn^{3+}_3Si_3O_{12}(OH)$	4½-5	3.05
Ortoericssonita	$BaMn_2Fe(Si_2O_7)(O,OH)$	4½	4.21
Ortopinakiolite	$Mg_3MnMn_2B_2O_{10}$	6	4.03
Palaita	$KMn_{10}Si_{12}O_{30}(OH)_{12}$	~1½	2.59

Tabla No. 6. H. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

<i>Mineral</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Dureza</i>	<i>Densidad</i>
Panetita	$(\text{Na}, \text{Ca}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})_2(\text{PO}_4)_2$		2.90-3.00
Pannantita	$(\text{Mn}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	2-3	3.06
Parsetensita	$3\text{MnO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$		2.59
Partschinita	$(\text{Mn}, \text{Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$		
Parwelita	$(\text{Mn}, \text{Mg})_5\text{Sb}(\text{Si}, \text{As})_2\text{O}_{10-11}$	5½	4.62
Piamontita	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn}^{3+})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{OH}$	6	3.45-3.52
(Piedmontita)			
Pinaquiolita	$\text{Mg}_3\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_2\text{B}_2\text{O}_{10}$	6	3.88
Piobelonita	$\text{PbMnVO}_4\text{OH}$	3½	5.38
Pirocroíta	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	2½	3.25
Pirofanita	$\text{MnTiO}_3$	5-6	4.54
Pirolusita	$\text{MnO}_2$	2-6	5.06
Pirossmalita	$(\text{Mn}, \text{Fe})_{14}\text{Si}_3\text{O}_7(\text{OH}, \text{Cl})_6$	4-4½	3.06-3.19
Piroxferroita	$(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Mn})\text{SiO}_3$		3.68-3.76
Piroxmangita	$(\text{Mn}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	5½-6	3.61-3.80
(Piroxeno de Mn)			
Poehita	$\text{H}_{16}\text{Fe}_8\text{Mn}_2\text{Si}_3\text{O}_{20}$	3½-4	3.70
Polianita	$\text{MnO}_2$	6-6½	4.99
Psilomelano	$\text{BaMn}^{2+}\text{Mn}^{4+}_8\text{O}_{16}(\text{OH})_{14}$	5-6	6.45
Pseudolaueíte	$\text{MnFe}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	3	2.46
Purpurita	$(\text{Mn}^{3+}, \text{Fe}^{3+})\text{PO}_4$	4-4½	3.69
Quentrolita	$3\text{PbO} \cdot 2\text{MnO}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	5	6.19
Queselita	$\text{PbMnO}_2 \cdot \text{OH}$	2½	6.84
Ramsdellita	$\gamma\text{-MnO}_2$	2-4	4.37-4.83
Ranciéita	$(\text{Ca}, \text{Mn}^{2+})\text{Mn}^{4+}_4\text{O}_9 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$		3.20-3.30
Redingita	$(\text{Mn}, \text{Fe})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	3-3½	3.23
Retziana	$\text{Mn}_2\text{Y}(\text{AsO}_4)(\text{OH})_4$	4	4.15
Richterita	$(\text{Na}, \text{K})_2(\text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ca})_6\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	5-6	2.97-3.13

Tabla No. 6. I. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Robertsita	$\text{Ca}_3\text{Mn}^{3+}_4(\text{OH})_6(\text{H}_2\text{O})_3[\text{PO}_4]_4$	3½	3.13-3.17
Rockbridgeita	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn})\text{Fe}^{3+}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_5$	4½	3.30-3.49
Rodocrosita	$\text{MnCO}_3$	3½-4	3.70
Rodonita	$\text{MnSiO}_3$	5½-6½	3.57-3.76
Roscherita	$(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe})_3\text{Be}_3(\text{PO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	4½	2.93
Roweita	$\text{Ca}^2\text{Mn}^{2+}_2(\text{OH})_4[\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_2]$	~5	2.93
Sacchita	$\text{MnCl}_2$		2.98
Salmonsita	$\text{Mn}^{2+}_9\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_8 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	4	2.88
Samsonita	$\text{Ag}_4\text{MnSb}_2\text{S}_6$	2½	5.51
Sanaíta	$(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Pb})\text{O} \cdot \text{TiO}_2$	6	5.30
Sanmartinita	$(\text{Zn}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mn})\text{WO}_4$		6.70
Sarcépsido	$(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})_3(\text{PO}_4)_2$	4	3.79
Sarquinita	$\text{Mn}_2\text{AsO}_4\text{OH}$	4-5	4.08-4.18
Schallerita	$(\text{Mn}, \text{Fe})_8\text{Si}_6\text{As}(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})_{26}$	~5	3.37
Scheteligita	$(\text{Ca}, \text{Mn}, \text{Sb}, \text{Bi})_2(\text{Ti}, \text{Ta}, \text{Nb}, \text{W})_2(\text{O}, \text{OH})_7$	5½	4.74
Schorl	$\text{Na}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH}, \text{F})_4$	7	3.10-3.25
Seamanita	$\text{Mn}^{2+}_3(\text{OH})_2[\text{B}(\text{OH})_4][\text{PO}_4]$	4	3.13
Seidozerita	$\text{Na}_2(\text{Zr}, \text{Ti}, \text{Mn})_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{F}_2$	4-5	3.47
Senaita	$\text{Pb}(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})_{24}\text{O}_{38}$	6	5.30
Serandita	$\text{Mn}_2\text{NaSi}_3\text{O}_8(\text{OH})$	4½-5	3.32
Shallerita	$6\text{MnO} \cdot \text{Mn}_2(\text{OH})_4 \cdot \text{As}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$		
Siclerita	$\text{Li}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{3+})\text{PO}_4$	~4	3.45
Sinadelfita	$2(\text{Al}, \text{Mn})\text{AsO}_4 \cdot 5\text{Mn}(\text{OH})_2$	4½	3.50
Sitaparita	$9\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO}_2 \cdot 3\text{CaO}$	7	5.00
Sobralita	$(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ca}, \text{Mg})\text{SiO}_3$	3½	
Sonolita	$\text{Mn}_9(\text{SiO}_4)_4(\text{OH}, \text{F})_2$	5½	3.82
Spessartina (Spessartita)	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	7-7½	3.80-4.25

Tabla No. 6. J. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Sursasita	$Mn_3Al_4Si_5O_{21} \cdot 3H_2O$		3.26
Staringita	$(Fe, Mn)_x(Sn, Ti)_{6-3x}(Ta, Nb)_{2x}O_{12}$	6-6½	7.17
Steenstrupine	$CeNaMnSi_3O_9$	5	3.10-3.60
Stewartita	$MnFe_2(OH)_2(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$		2.94
Strunzita	$MnFe_2(PO_4)_2(OH)_2 \cdot 8H_2O$		2.47-2.56
Sussexita	$MnBO_3H$	3-3½	3.30
Switzerita	$(Mn, Fe)_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	~2½	2.95
Szaibelyita	$(Mg, Mn)BO_3H$	3-3½	2.60
(Camsellita)			
Szmikita	$MnSO_4 \cdot H_2O$	1½	2.84-3.21
Takanelita	$(Mn^{2+}, Ca)Mn^{4+}_4O_9 \cdot H_2O$		3.41
Tantalita	$(Fe, Mn)(Ta, Nb)_2O_6$	6-6½	8.2
Tapiolita	$(Fe, Mn)(Ta, Nb)_2O_6$	6-6½	7.82
Tefroita	$Mn_2SiO_4$	6	4.11
Tetrawickmanita	$MnSn(OH)_6$		3.65
Tienschanita	$BaNa_2MnTiB_2Si_6O_{20}$	6-6½	3.29
Tinzenita	$(Ca, Mn, Fe)_3Al_2BiSi_4O_{15}(OH)$ con $Ca < 1.5$ y $Mn > Fe$	6-6½	3.07-3.13
Todorikita	$(Mn, Ca, Mg)Mn^{4+}_3O_7 \cdot H_2O$		3.49
Trigonita	$Pb_3Mn[AsO_3]_2[AsO_2(OH)]$	2-3	6.107.10
Trimerita	$CaMn_2(BeSiO_4)_3$	6-7	3.47
Triplita	$(Mn^{2+}, Fe^{2+}, Mg, Ca)_2(PO_4)(F, OH)$	5-5½	3.55-3.87
Triphylita	$Li(Fe^{2+}, Mn^{2+})PO_4$	4-5	3.42
Triploidita	$(Mn^{2+}, Fe^{2+})_2PO_4OH$	4½-5	3.70
Truscottita	$(Ca, Mn)_2Si_4O_9(OH)_2$		2.35
Varulita	$(Na_2, Ca)(Mn, Fe)_2(PO_4)_2$	5	3.58
Väyrynenite	$BeMnPO_4(OH, F)$	5	3.18-3.21
Verplanckita	$Ba_2(Mn, Fe, Ti)Si_2O_6(O, OH, Cl, F)_2 \cdot 3H_2O$	2½-3	3.52

Tabla No. 6. K. Minerales de manganeso <sup>(d)</sup>

Mineral	Fórmula	Dureza	Densidad
Wad (Ocre Negro)	Término Genérico para Óxidos Hidratados		
Wagnerita	$(Mg, Fe, Mn, Ca)_2 PO_4 F$	5-5½	3.15
Welinita	$Mn^{4+} Mn^{2+}_3 O_3 (SiO_4)$	4	4.47
Wenzelita	$(Mn, Fe, Mg)_3 (PO_4)_2 \cdot 5H_2O$		
Wickmanita	$(Mn, Ca) Sn(OH)_6$		3.89
Wiserita	$Mn_4 B_2 O_3 (OH, Cl)_4$	~2½	3.42
Wodginita	$(Ta, Nb, Sn, Mn, Fe)_{16} O_{32}$	~6	7.81
Wolframita	$(Fe, Mn) WO_4$	4-4½	7.37
Wolframixiolita	$(Nb, Ta, W, Ti, Fe, Zr, Mn, U, Ca, Mg)_3 O_6$		6.55
Woodruffita	$(Zn, Mn^{2+}) Mn^{4+}_3 O_7 \cdot 1-2 H_2O$	~4½	4.01
Yamatoita	$Mn_3 V_2 (SiO_4)_3$		
Yeatmanita	$(Mn, Zn)_{13} Sb_2 Si_4 Zn_2 O_{28}$	4	5.02
Yoshimuraita	$(Ba, Sr)_2 Ti Mn (SiO_4)_2 (PO_4, SO_4) (OH, Cl)$	4½	4.13
Zincdibraunita	$ZnO \cdot 2MnO_2 \cdot 2H_2O$		
Zinc-Fauserita	$(Mn, Mg, Zn) SO_4 \cdot 7H_2O$	2½	1.99
Zincita	$(Zn, Mn) O$	4	5.68
Zincobotryogen	$(Zn, Mg, Mn^{2+}) Fe^{3+} (SO_4)_2 (OH) \cdot H_2O$	~2½	2.20
Zussmanita	$K(Fe, Mg, Mn)_{13} (Si, Al)_{18} O_{42} (OH)_{14}$		3.15
Zwieselita	$(Fe^{2+}, Mn^{2+}, Mg, Ca)_2 (PO_4) (F, OH)$	5-5½	3.93-3.97

### III. 2. 3. GRADO DE LOS MINERALES DE MANGANESO

Los minerales de manganeso abarcan aquellos que contienen arriba del 35 %Mn. Minerales de manganeso ferruginosos contienen de 10 a 35 %Mn, con un 5 a 10 %Mn son descritos como minerales de hierro manganíferos. Los minerales de manganeso se divide en tres tipos de acuerdo al contenido de manganeso: *metalúrgico, químico y grado batería*.

Los minerales grado metalúrgico contienen entre 38.5 y 55 %Mn. La calidad de los minerales de manganeso también depende de la relación Mn:Fe y la concentración de impurezas de  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  y CaO. Los minerales grado metalúrgico requieren una relación Mn:Fe de 7.5:1 con un 78

%Mn, sin embargo, la formación de pompositos mejora los resultados. Un elemento de control es el fósforo, el cual no puede ser eliminado en la fusión, por tanto, el mineral grado metalúrgico debe contener abajo de 0.2 %P, ver Tabla No. 7.

**Tabla No. 7. Especificación del manganeso grado metalúrgico (base % seco) <sup>(e)</sup>**

<i>Elemento</i>	<i>Límite</i>	<i>%</i>
Mn	Mínimo	48.00
Fe	Máximo	6.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Máximo	7.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiO <sub>2</sub>	Máximo	11.00
As	Máximo	0.18
P	Máximo	0.19
Cu + Pb + Zn	Máximo	0.30

Los minerales usados para producir manganeso grado químico y grado batería tienen una composición similar a la de grado metalúrgico, pero se describen en términos de dióxido de manganeso (MnO<sub>2</sub>), con un 63 %Mn. Los minerales de dióxido de manganeso tienen 70 a 85 %MnO<sub>2</sub> (44 a 54 %Mn), muchos minerales de grado bajo son consumidos en la extracción de uranio en Sudáfrica, empleándolo como oxidante en la lixiviación.

La Tabla No. 8 presenta las especificaciones de la Union National Stockpile para minerales de manganeso grado químico-metalúrgico. El tipo A debe ser adecuado para usarse como agente oxidante en procesos químicos tales como la fabricación de hidroquinona. El tipo B debe ser satisfactorio para la fabricación de permanganato. Sin embargo, éstas no son especificaciones estándares de la industria.

Los minerales grado metalúrgico contienen arriba del 35 %Mn, mientras los minerales grado químico poseen arriba del 35 %MnO<sub>2</sub> y los minerales manganíferos tienen un contenido Mn+Fe arriba del 50 %.

Tabla No. 8. Especificación del manganeso grado químico <sup>(b)</sup>

<i>Constituyentes</i>	<i>Límite</i>	<i>Tipo A</i>	<i>Tipo B</i>
MnO <sub>2</sub>	Máximo, %	80.0	82.0
Mn	Máximo, %	50.0	53.0
Fe	Máximo, %	3.0	3.0
Si	Máximo, %	-	5.0
Al	Máximo, %	-	3.0
P	Máximo, %	-	0.2
As	Máximo, %	-	0.1

### III. 3. DIAGRAMA DE POURBAIX

La Figura No. 6, representa las condiciones de equilibrio termodinámico del sistema manganeso-agua a 25 °C, en ausencia de sustancias con las cuales el manganeso puede formar complejos solubles o sales insolubles.

El manganeso puede ser fácilmente disuelto por un ácido o neutralizar la solución oxidada con la formación de iones manganeso Mn<sup>2+</sup>, dando una coloración rosa pálido a la solución. En presencia de un agente como el oxígeno se puede oxidar la disolución de manganeso, formando óxidos sólidos: tales como el Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> de color café-oscuro, el Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de color negro o una variedad de MnO<sub>2</sub> anhidro o hidratado, de color café a negro. Un agente de mayor poder oxidante, favorece que las especies antes citadas estén en el estado hexa u heptavalente, con la formación de iones manganato de color verde MnO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (a pH altos) o iones púrpura de permanganato (MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>). La zona de estabilidad de los iones de permanganato cubre toda el área superior, a cualquier pH, arriba de la línea (b) se relaciona la oxidación del agua en oxígeno a presión atmosférica. Esta explicación muestra el carácter de la solución de permanganato.

El dominio de estabilidad de Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> existe en soluciones ligeramente ácidas, neutras o alcalinas; consecuentemente al contacto con una solución ácida; es posible la presencia de iones Mn<sup>2+</sup>,

habiendo la posibilidad de la formación de  $\text{MnO}_2$ . Sin embargo, esta reacción es compleja y esto puede dar a notar que siempre será más fácil la formación de óxidos no estequiométricos  $\alpha$  o  $\gamma$  y nunca la variedad estequiométrica  $\beta$ - $\text{MnO}_2$  o pirolusita. En presencia de un agente más oxidante, tal como  $\text{H}_2\text{O}_2$  y  $\text{ClO}^-$ , es factible la oxidación a  $\text{MnO}_2$ . El mecanismo de reacción es complejo y no está aún definido.

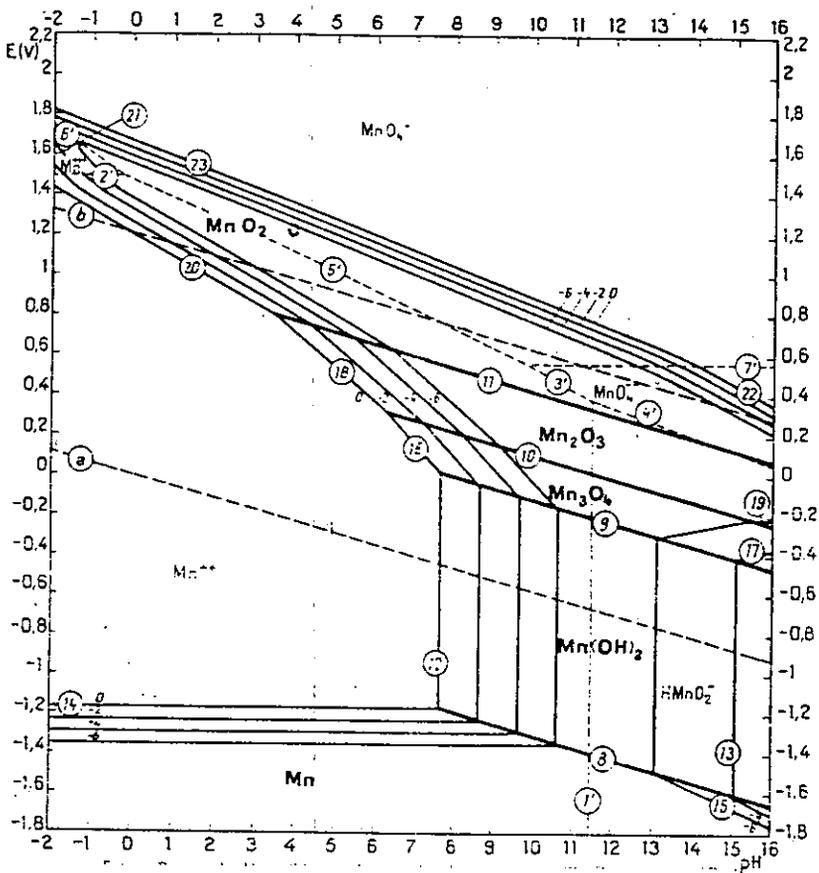


Figura No. 4. Sistema Mn-H<sub>2</sub>O a 25 °C <sup>(1)</sup>

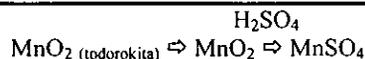
### III. 4. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE DIÓXIDO DE MANGANESO (EMD)

El dióxido de manganeso electrolítico, EMD, fue descubierto en 1918, realizándose pruebas de concentración y beneficio a nivel planta piloto en el año de 1932. Debido a numerosos problemas prácticos, no fue hasta 1950 cuando se llevó a escala industrial. El principal uso del  $\text{MnO}_2$  es como depolarizante en las pilas secas, sin embargo, se produce  $\text{MnO}_2$  de alta pureza mediante diversos procesos químicos, pero las propiedades fisico-químicas no siempre son adecuadas para el uso antes citado. Por este motivo, la mayor parte de  $\text{MnO}_2$  proveniente de minerales que cumplan con las características que se requieren, son destinado a la fabricación de celdas secas. El proceso tradicional en términos generales para tratar menas de carbonato de manganeso u óxidos se describe a continuación:

+ *Tostación Reductora.* Se mezcla el mineral con 10 a 20 % de hulla (o carbón vegetal) finamente molido y se calienta durante una hora a temperatura aproximada de  $815\text{ }^\circ\text{C}$ , en condiciones reductoras. Esta tostación reduce el  $\text{MnO}_2$  insoluble en ácido. El calcinado debe enfriarse en presencia de  $\text{CO}_2$  a  $38\text{ }^\circ\text{C}$  o menos para evitar la reoxidación. En el caso de ser rodocrosita este paso se omite.

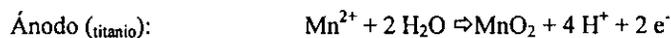
+ *Lixiviación.* El  $\text{MnO}$  se disuelve fácilmente en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  obteniendo una solución de  $\text{MnSO}_4$  de 50 a 60  $\text{g}_{\text{Mn}}/\text{L}$ , en operación continua el calcinado se lixivia con electrolito gastado. El ácido que contiene se neutraliza con el calcinado. Con una buena agitación se obtiene una extracción satisfactoria en una hora de lixiviación. No es conveniente la presencia de fierro, por lo que debe añadirse  $\text{MnO}_2$  para asegurar la oxidación de este último y después de ajustar el pH a 6.0 (con cal) se elimina fácilmente el fierro y aluminio, sólo ocasionalmente se eleva el pH a 7.5 para evaluar periódicamente las impurezas que precipitan a este valor, eliminando de esta forma las mismas.





+ *Separación de Residuos.* El residuo se elimina mediante la filtración con vacío, debido a la viscosidad de la solución. Se usa un poco de agua para lavar a fin de disminuir las pérdidas. Posteriormente, el electrolito se lleva hasta conseguir una concentración de 1 M de  $\text{MnSO}_4$  y 0.3 M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . La adición de  $\text{BaS}$ ,  $\text{Na}_2\text{S}$ , etc., precipita metales pesados como sulfuros, la adición de  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{NaOH}$  neutraliza y precipita el fierro III como óxido.

+ *Electrobeneficio.* El electrolito se somete a electrólisis para depositar el  $\text{MnO}_2$  en un ánodo de titanio. Se produce  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en cantidades equivalentes. La electrólisis se continúa hasta agotar el contenido de la solución, disminuyendo desde luego la velocidad de recirculación o agitación de las celdas. La densidad de corriente anódica debe ser de 8 a 10  $\text{mA/cm}^2$  a una temperatura de 95 °C. El depósito es de tipo escamoso y no presenta ningún problema en la limpieza de los ánodos.



+ *Tratamiento del Producto Terminado.* El depósito se desprende de los ánodos, se muele, se pulveriza (20 a 40  $\mu\text{m}$ ) y se lava para neutralizar los residuos de ácido y sulfatos con una solución de  $\text{NaOH}_{\text{diluida}}$ , debido a que estos residuos son perjudiciales para el rendimiento en las pilas secas.

+ *Análisis Químico del Dióxido de Manganeso Electrolítico.* El análisis químico del producto a comercializar es: 91 %  $\text{MnO}_2$ , 3 a 4 %  $\text{MnOx}$  y 3 a 4 %  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### **IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS**

El siguiente capítulo describe la secuencia de trabajo y sus resultados, primeramente se describe megascópicamente la muestra, para posteriormente valorar y cuantificar los elementos presentes (con la ayuda de difracción y fluorescencia de Rayos X y métodos analíticos), corroborando la forma en la que se encuentran las especies minerales en la matriz de la roca, esto con la ayuda de un estudio de minerografía.

Con la información recopilada anteriormente se realizaron operaciones de liberación y concentración de valores, la evaluación del tiempo de molienda combinado con una clasificación de tamaño de partícula es el primer aspecto a considerar. Subsecuentemente se realizaron pruebas de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley sobre muestra + 100 mallas, de forma complementaria se ejecutaron pruebas de concentración magnética. Finalmente se beneficio el material lixiviándolo con ácido sulfúrico, en este último caso el material era procedente de trituración.

#### IV. 1. ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICO

En la evaluación de un yacimiento mineral, deben de tomarse en cuenta una serie de factores íntimamente ligados entre sí, estos se pueden agrupar en dos categorías principales: factores variables, los principales son aquellos que pueden variar con el tiempo y son de carácter: técnico, económico y social, y factores invariables o naturales, son los que van a depender de las características propias del yacimiento y son: tonelaje, ley, propiedades físicas, químicas y mineralógicas del yacimiento (caracterización) y posición geográfica.

Las propiedades físicas, químicas y mineralógicas, influyen directamente en la explotación y beneficio de un yacimiento mineral de la siguiente manera. Desde un punto de vista químico y mineralógico es importante conocer en qué especies minerales se encuentra el elemento o compuesto que se pretende recuperar, ya que dependiendo de éstas propiedades, el metalurgista desarrollará la secuencia de operaciones para el proceso de beneficio más adecuado para la

recuperación de valores. Por lo tanto, hay que resaltar la importancia de la caracterización en la experimentación metalúrgica, la cual debe realizarse bajo el siguiente esquema: estudio megascópico, análisis cualitativo espectrográfico, análisis químico cuantitativo, difracción de Rayos X, minerografía y reconstrucción mineralógica.

#### IV. 1. 1. DESCRIPCIÓN MEGASCÓPICA

El análisis megascópico es fundamental en el conocimiento mineralógico y textural de los productos metalúrgicos.

La matriz es de **color** negro, en forma de capas una sobre otra con puntos y masivos amarillo metálico. Se presentan rellenos de fracturas de color blanco con cierta exfoliación y espesor variado. La **textura** de los carbonatos es de tipo microcristalino, la pirita está como masiva o diseminada y la calcita se encuentra como relleno de cavidades. Referente a la **mineralogía**, los carbonatos son el cuerpo de la roca asociados a los sulfuros, la calcita está intercalada entre las capas de los carbonatos. El **tipo de mineral** es una mena manganífera.

#### IV. 1. 2. ANÁLISIS CUALITATIVO ESPECTROGRÁFICO

La caracterización de la mena de forma cualitativa se realiza mediante la técnica de fluorescencia de Rayos X, esta técnica generalmente se emplea durante el inicio de la caracterización de minerales, mostrando un aspecto general de la composición química elemental y la proporción estimada de los elementos que contiene una muestra mineral. Esta información es revisada y los elementos que presentan un interés económico o influyen notablemente durante la experimentación metalúrgica serán analizados y cuantificados químicamente. El método se basa, cuando un elemento es bombardeado por un haz de electrones de alta energía se logra emitir líneas características del espectro, las más intensas son  $K\alpha$  y  $K\beta$  siempre denominadas "líneas características" por tener las propiedades de los elementos que los emiten. Este fenómeno explicado brevemente a la base de los tubos de rayos X. Las mismas líneas pueden ser emitidas si

el elemento en cuestión es bombardeado por un haz de rayos X de mucha energía, esto es lo que llamamos fluorescencia de rayos X” y es la base de los análisis químicos por esta técnica.

Las condiciones utilizadas en la fluorescencia de Rayos X fueron 50 kV, 40 mA, tubo de cromo y cristales LIF (para elementos pesados) y EDDT (para elementos ligeros). El sistema es un espectrómetro de Rayos X marca Rigaku, el límite de detección es de 60 ppm. La muestra a analizar requiere ser pulverizada a 100 % -200 mallas. Los resultados se presentan en la Tabla No. 11.

**Tabla No. 9. Resultados de la fluorescencia de Rayos X**

<i>Proporción Estimada</i>	<i>Elementos Químicos</i>	<i>Escala</i>
Mayor	---	+ 25 %
Mediano	Ca	10 a 25 %
Menor	Mn, Fe	1 a 10 %
Escasa	---	0.1 a 1 %
Mínimo	Ti	0.01 a 0.1 %
Trazas	Sr, Ba, Pb, Zn	- 0.01%

#### IV. 1. 3. ANÁLISIS QUÍMICO CUANTITATIVO .

El determinar la cantidad en que se encuentran los elementos y/o compuestos permite la evaluación de zonas con potencial minero-metalúrgico, la explotación de yacimientos minerales, el control de los procesos metalúrgicos y posiblemente fijar las transacciones de compra-venta de minerales. El objetivo de este apartado es determinar la composición química, cualitativa y cuantitativa, de los diversos productos metalúrgicos generados desde la caracterización de cabeza así como en las diferentes etapas de la experimentación. Las determinaciones se realizaron aplicando técnicas de volumetría, gravimetría e instrumental como la espectrofotometría de absorción atómica con flama.

Tabla No. 10. Análisis químico en muestra de cabeza

<i>Determinación, %</i>			
<i>Elemento</i>		<i>Óxidos</i>	
Mn	15.00	MgO	3.48
Fe	3.60	SiO <sub>2</sub>	10.17
S <sub>Total</sub>	2.34	CaCO <sub>3</sub>	32.90
Pxc	27.42	K <sub>2</sub> O	0.33
Insoluble	11.68	NaO	0.20
		CaO	17.49
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.51

#### IV. 1. 4. ESTUDIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de Rayos X es una herramienta útil durante el desarrollo de la caracterización de minerales, permite la identificación de especies minerales cristalinas que debido a su complejidad es difícil de identificar por otras técnicas, como son: minerales del grupo de las arcillas, carbonatos, sulfatos, etc. El método se basa en la propiedad que tienen los Rayos X de difractarse al incidir sobre las caras de las sustancias cristalinas.

Los parámetros para la ejecución de la difracción de Rayos X, fueron: 30 kV, 20 mA y un anticátodo de cobre ( $\lambda_{Cu} = 1.54 \text{ \AA}$ ). El equipo usado es un difractómetro marca Rigaku modelo Geiger- Flex con un límite de detección mayor a 2 %.

Las especies minerales cristalinas identificadas en el difractograma (anexo B) se enlistan en la Tabla No. 13, la forma de enunciarlos es en orden decreciente a su grado de cristalización.

Tabla No. 11. Resultados de la difracción de Rayos X <sup>(2)</sup>

<i>Especies Minerales</i>	<i>Fórmula</i>
Manganocalcita	$(Ca, Mn)CO_3$
Pirolusita	$MnO_2$
Rodocrosita	$MnCO_3$
Montmorillonita	$Ca_{0.24}Na_{0.01}Mg_{0.36}Fe_{0.02}Al_{1.75}Si_{3.87}O_{10}(OH)_2 \cdot 1.078H_2O$
Pirita	$FeS_2$
Yeso	$Ca(SO_4) \cdot 2H_2O$
Caolinita	$Al[(OH)_8]Si_4O_{10}]$
Psilomelano	$Ba^{2+}Mn^{2+}Mn^{4+}_8O_{16}(OH)_{14}$

#### IV. 1. 5. MINERAGRAFÍA

El objetivo de realizar un estudio de caracterización es para determinar los compuestos y/o minerales que constituyen el espécimen en cuestión. El conocimiento de la composición mineralógica y las características de textura permiten dar apoyo metalúrgico. Desde el punto de vista minero, ayuda en la planeación y explotación de un yacimiento. Finalmente, la caracterización es un apoyo fundamental en la experimentación e investigación metalúrgica para determinar (identificar) factores que pueden afectar los procesos de recuperación y para la selección de procesos adecuados utilizados en la separación y concentración de minerales de interés económico. La preparación de las muestras para estudio minerográfico, requirió la preparación de briquetas que son porciones de roca cortadas, desbastadas y pulidas con polvo de carburo de silicio y pasta de diamante. Así mismo se utilizaron láminas delgadas, las cuales únicamente se cortan y montan en el portaobjeto, para después darles el tratamiento de las briquetas con los abrasivos citados. Las superficie pulidas (briquetas) se utilizan para reconocer los minerales metálicos (luz reflejada), en tanto, que las láminas delgadas para los no metálicos (luz transmitida).

Para la identificación de las propiedades ópticas se emplea luz polarizada en dos modalidades.

Luz polarizada normal con analizador de posición (nicoles paralelos), se utiliza tanto para minerales isotrópicos como anisotrópicos, las propiedades a caracterizar son: color, pleocroismo, exfoliación e índice de refracción. La luz polarizada con analizador en posición (nicoles cruzados), se emplea para la identificación de minerales anisotrópicos y las propiedades ópticas más importantes son: birrefringencia y figura de interferencia.

**Tabla No. 12. Minerales primarios**

<i>Minerales Principales</i>	<i>%</i>	<i>Forma</i>	<i>Tamaño (<math>\mu\text{m}</math>)</i>	<i>Relación y Asociaciones Mineralógicas y Microtexturales</i>
<i>Rodocrosita</i>	+ 75	Masiva Microcristalina	2 a 8	En algunos casos se encuentra entre las vetas de calcita, pero en general en forma de masivos.
<i>Pirita</i>	- 5	Masiva Esferoides Anhedral Laminar	5 a 40	En general se presenta diseminada, en menor proporción está relleno de fracturas y como masivos. La forma esferoidal y laminar se encuentran dispersas y son de diferente espesor, normalmente esta última, se encuentra cercana a los masivos y es escasa.
<i>Pirolusita</i>	- 5	Aisladamente Diseminada	20 a 40	Esta se encuentra únicamente entre la matriz de carbonato, pues en ningún momento hay indicios del mismo en las vetas de calcita.
<i>Psilomelano</i>	- 5	Vetas	5	Formando vetillas que cortan a la matriz. De grano fino.

Tabla No. 13. Minerales secundarios

<i>Minerales</i>	<i>%</i>	<i>Relación y Asociaciones Mineralógicas y Microtexturales</i>
<i>Calcita</i>	- 5	Normalmente se encuentra como relleno de fractura, de espesores muy variados, con exfoliación, en algunos casos se presenta rodeando a masivos de carbonatos. Espesor máximo de 50.5 $\mu\text{m}$ . Por microsonda la calcita reporta una pequeña cantidad de manganeso en una relación 5:1 en promedio.
<i>Cuarzo</i>	- 5	Aísladamente diseminada con presencia entre los carbonatos y generalmente asociado a la calcita en los rellenos de fractura. Con espesores menor de 10.1 $\mu\text{m}$ . Este presenta extinción ondulante.
<i>Mineral Amorfo</i>	5 a 25	Se presenta manchando a los carbonatos, y en algunos casos como relleno de fractura con cierta exfoliación. También lo encontramos en algunos casos atrapando a los carbonatos.
<i>Sericita</i>	- 5	Se encontró únicamente en la parte lateral de una muestra, se identificó utilizando un índice de refracción ( $n= 1.56$ ).

#### IV. 1. 6. RECONSTRUCCIÓN QUÍMICA DE LOS COMPUESTOS QUE INTEGRAN LA MUESTRA DE CABEZA

$Mn_{\text{Total}}$  15% (datos de análisis de cabeza)

$$15 \%Mn * (15 MnCO_3/55 Mn) = 31.36 \%MnCO_3$$

Manganocalcita MC. El CaO presente en la MC es de 7.49 %

$$7.49 \% CaO * (100 CaCO_3/ 56 CaO)= 13.37 \%CaCO_3$$

Calcita C. El  $CaCO_3$  en la C es de 32.91 %

$$32.91 \% CaCO_3 * (56 CaO/ 100 CaCO_3)= 18.42 \% CaO C$$

Por lo tanto,

$$\text{CaO}_{\text{Total}} = 18.42 - 7.49 = 10.93 \% \text{CaO}$$

$$\text{CaCO}_3 = 32.90 - 13.37 = 19.53 \% \text{CaCO}_3$$

$$\text{CaO}_{\text{Total}} = \text{CaO}_{\text{MC}} + \text{CaO}_{\text{C}} = 7.49 + 18.42 = 25.91 \% \text{CaO}$$

**Tabla No. 14. Balance de compuestos químicos que integran la muestra**

<i>Especies</i>	<i>%</i>
CaCO <sub>3</sub>	46.26
MnCO <sub>3</sub>	31.36
Insoluble (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> )	11.68
K <sub>2</sub> O	0.33
Na <sub>2</sub> O	0.20
S <sub>Total</sub>	2.34
MgO	3.48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.52
Total (reconstrucción)	<b>98.17</b>
Comparativo de cabeza	<b>98.46</b>

La Tabla No. 14 presenta el balance de los elementos y/o compuestos que forman la muestra a estudiar, notando la aproximación por la reconstrucción vs el análisis en la muestra de cabeza.

#### IV. 1. 7. FOTOMICROGRAFÍAS

Es el campo seleccionado en superficies pulida al microscopio de polarización con luz reflejada, útil para diferenciar minerales metálicos de no metálicos. En cada una de sus subdivisiones para poder caracterizar más específicamente cada una de las especies se requiere de nicols cruzados, ya que con este último podemos evaluar propiedades como son la isotropía, anisotropía, pleocroismo, birrefringencia, etc.

**IV. 1. 7. 1. SUPERFICIES PULIDAS**

Amplificación: 90.9x

Escala 1 mm= 11  $\mu$ m



Figura No. 5. Vista de los carbonatos de manganeso (CM) con pequeñas manchas blancas de pirita (PI) diseminada en el mismo y moteado negro sobre los carbonatos (mineral amorfo, MA).

Amplificación: 730x

Escala 1 mm= 1.37  $\mu$ m

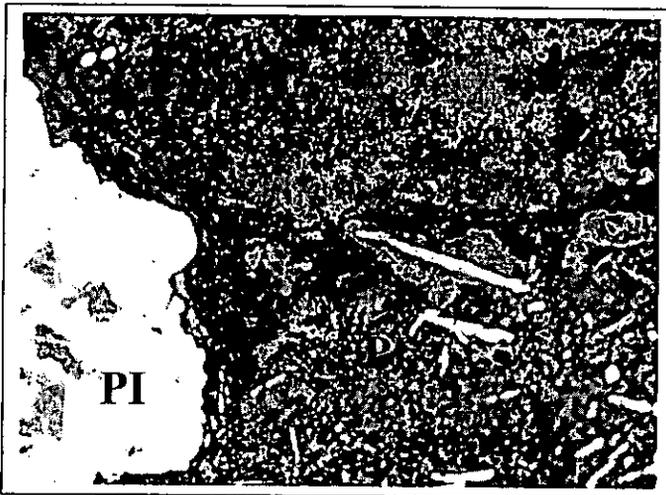


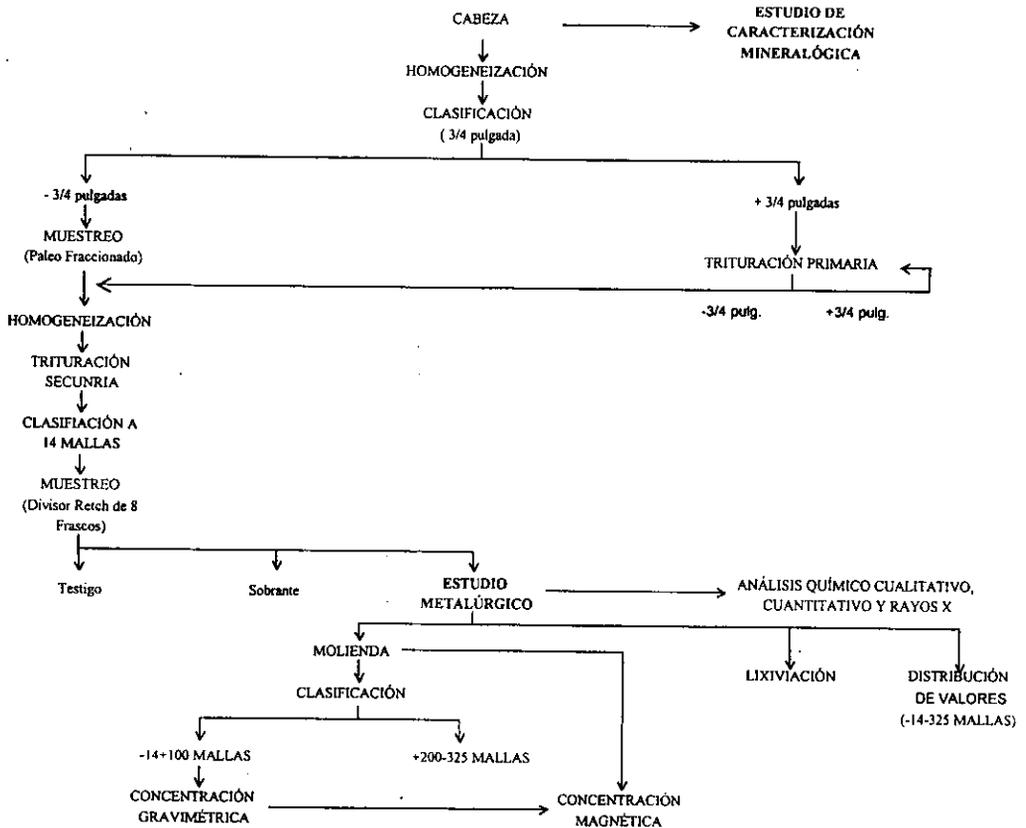
Figura No. 6. La pirita (PI) no sólo se presenta finamente diseminada sino en forma de láminas y masivos (en blanco).

**IV. 2. ESTUDIO METALÚRGICO**

El objeto de realizar un estudio metalúrgico es desarrollar por medio de pruebas y procesos a escala de laboratorio la recuperación y beneficio de minerales. La experimentación metalúrgica se realiza aplicando procesos de concentración magnética, gravimétrica e hidrometalurgia.

**IV. 2. 1. DIAGRAMA DE PREPARACIÓN, MUESTREO Y SECUENCIA DE TRABAJO**

La Figura No.15 presenta el muestreo y la secuencia de trabajo utilizada.



**Figura No. 15. Muestreo del material y secuencia de trabajo**

## IV. 2.2. MATERIAL Y EQUIPO

Tabla No. 15. Equipo y material utilizado en el presente trabajo

Etapa	Equipo	Material/ Accesorios	Observaciones
Homogeneización	---	·Pala Cuadrada para Muestreo	5 y 2 Pulgadas de Ancho
Clasificación a ¼ de Pulgada	---	·Malla ¼ Pulgada (19 mm)	Clasificación Manual
Trituración	·Trituradora de Quijadas y Rodillos	·Malla 14 (1.40 mm)	Producto 100 % - 14 Mallas
Caracterización Mineralógica	·Cortadora de Disco ·Desbastadoras y Pulidora ·Equipo de Difracción y Fluorescencia de Rayos X ·Microscopio Óptico (con Luz Reflejada y Transmitida)	·Porta y Cubreobjetos ·Polvo de Carburo de Silicio y Pasta de Diamante	---
Muestreo	·Distribuidor de Ocho Frascos Retsch MR	·Balanza (Exactitud de 0.1 g)	---
Distribución de Valores	---	·Malla Serie Arenas	---
Molienda	·Molino de Bolas	·Carga de Bola	Primaria
Concentración Gravimétrica	·Mesa Wilfley	·Alimentador Vibratorio	---
Concentración Magnética	·Separador Magnético (SMAI)	·Rejillas	Alimentación Manual
Lixiviación	·Reactor de 5 Bocas con Termostato Automático	·Agitador Vidrio y Propela de Teflón ·Balanza Analítica (Exactitud de 0.0001 g)	
Calcificación	·Bomba Peristáltica ·Horno de Resistencias	·Columnas de Precolación ·Crisol de Barro	Prueba Continua ---

**IV. 2. 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL****IV. 2. 3. 1. PREPARACIÓN Y MUESTREO**

El muestreo de los minerales ya sea en su lugar de origen o cuando por diversas causas, han sido depositados en un lugar ajeno a su origen; tienen por objeto principal obtener una muestra representativa para conocer en forma real, sus principales valores y características físicas, para definir la posibilidad de su explotación desde el punto de vista económico, el muestreo a que nos referimos, es sólo a nivel laboratorio. El material se clasificó manualmente, se homogeneizó con paleo alterno para conformar un apilamiento, el cual se dividió en ocho porciones mediante la técnica de paleo fraccionado, disminuyendo de forma radial.

**IV. 2. 3. 1. 1. RESULTADOS DE LA PREPARACIÓN Y EL MUESTREO**

Cada fracción se clasificó de acuerdo a la malla  $\frac{3}{4}$  pulgada, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla No. 16. Por ciento en peso de cada porción obtenida por paleo fraccionado**

<i>Porción</i>	<i>+3/4 pulg, g</i>	<i>-3/4 pulg, g</i>	<i>Total</i>	<i>+3/4 pulg, %</i>	<i>-3/4 pulg, %</i>
A	2258.3	4729.8	6988.1	32.32	67.68
B	1837.2	4616.9	6454.1	28.47	71.53
C	1827.1	4249.4	6076.5	30.07	69.93
D	1671.1	4288.7	5959.8	28.04	71.96
E	1689.4	4887.5	6576.9	25.69	74.31
F	1884.8	4262.7	6147.5	30.66	69.34
G	1693.2	4626.6	6319.8	26.79	73.21
H	1737.9	4774.5	6512.4	26.69	73.31
Total	14599.0	36436.1	51035.1		
Promedio				<b>29.50</b>	<b>70.50</b>

#### IV. 2. 3. 2. TRITURACIÓN

La trituración y la molienda son operaciones unitarias utilizadas a gran escala en los procesos metalúrgicos que involucran reducción de partículas sólidas, cuya finalidad es la liberación de valores contenidos en las mismas, o el preparar productos que satisfagan requerimientos de índole industrial.

La trituración de minerales se efectúa por compresión, fracturando el mineral en el momento de llegar a su límite elástico. En éstas condiciones cada vez que un mineral se tritura, hay un consumo de energía proporcional a la nueva superficie producida, por lo que se debe conocer: el consumo de energía industrial y experimental (kW) y la capacidad industrial y experimental (t).

Se procedió a reducir de tamaño de partícula la porción  $+3/4$  pulgadas usando una trituradora de quijadas, para ser después homogeneizada con el resto del material, la porción  $-3/4$  pulgadas. Ambas se fueron homogeneizando y preparadas a 100% -14 mallas en una trituradora de rodillos, material con el cual se realizaron las pruebas del estudio metalúrgico.

#### IV. 2. 3. 3. MOLIENDA

Esta operación se realiza con una finalidad principal la liberación de valores de un agregado mineral, siendo este paso posterior a la trituración, por lo tanto, la molienda deja al mineral en condiciones apropiadas para ser tratado posteriormente por procesos mecánicos, tales como concentración gravimétrica, magnética, lixiviación, flotación y procesos combinados. Los factores que intervienen en la molienda son: dilución de la pulpa (% de sólidos), uniformidad del tamaño de partícula, velocidad crítica y de trabajo del molino, carga de bolas y tamaño de partícula en alimentación y descarga. Como segundo paso a la molienda se tienen los procesos de separación de la pulpa siendo éstos: decantación, filtración, centrifugación, evaporación, etc.

Los valores de interés en la muestra se encuentran en una relación íntima, siendo el fierro la principal impureza. Esta operación se realizó en un molino de bolas con los siguientes parámetros.

**Tabla No. 17. Condiciones de operación del molino de 8 x 8 pulgadas**

<i>Variable</i>	
$M_{\text{Mineral}}$ , (kg)	~ 1
$V_{\text{Agua}}$ , (ml)	700
Velocidad Molino, (rpm)	740
Sólidos, (%)	58.80
Tiempo, (min)	1.5, 3 y 5

**Tabla No. 18. Gradiente de carga de bolas**

<i>Tamaño de Bola, pulgadas</i>	<i>Número</i>	<i>Masa, g</i>	<i>% Peso</i>
-1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	32	3774.9	31.00
-1 <sup>1</sup> / <sub>8</sub>	32	2867.0	23.54
-1	32	2152.8	17.68
- <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	33	1442.4	11.84
- <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	34	1002.9	8.23
- <sup>5</sup> / <sub>8</sub>	37	935.5	7.68
Total	200	12175.5	99.97

IV. 2. 3. 3. 1. RESULTADOS DE MOLIENDA

Tabla No. 19. Análisis granulométrico de los diferentes tiempos de molienda

Producto	Abertura ( $\mu m$ )	Tiempo de Molienda								
		5 min			3 min			1.5 min		
		%Peso	Peso Ac (-) [%]	Peso Ac (+) [%]	%Peso	Peso Ac (-) [%]	Peso Ac (+) [%]	%Peso	Peso Ac (-) [%]	Peso Ac (+) [%]
-14+20	-1400+850	2.25	100.00	2.25	7.37	100.00	7.37	14.79	100.00	14.79
-20+30	-850+600	2.82	97.75	5.07	8.42	92.63	15.79	12.97	85.21	27.76
-30+50	-600+300	17.64	94.93	22.71	25.25	84.21	41.03	25.08	72.24	52.84
-50+70	-300+212	13.64	77.29	36.35	10.37	58.97	51.40	8.36	47.16	61.20
-70+100	-212+150	8.90	63.65	45.24	8.18	48.60	59.58	6.29	38.80	67.50
-100+200	-150+75	18.97	54.76	64.22	12.32	40.42	71.89	10.34	32.50	77.84
-200+270	-75+53	4.24	35.78	68.45	3.28	28.11	75.18	2.42	22.16	80.25
-270+325	-53+45	1.05	31.55	69.50	0.49	24.82	75.66	0.29	19.75	80.55
-325+400	-45	30.50	30.50	100.00	24.34	24.34	100.00	19.45	19.45	100.00
Total		100.00			100.00			100.00		

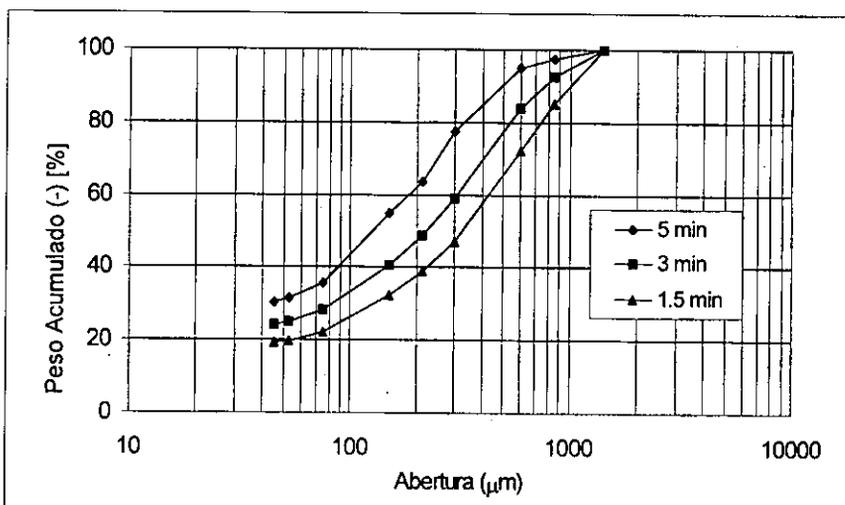


Figura No. 17. Distribución granulométrica de los diferentes tiempos de molienda

Tabla No. 20. Tamaño medio y estándar de los diferentes tiempos de molienda

Tamaño ( $\mu m$ )	Tiempo de Molienda, (min)		
	1.5	3	5
$T_{50}$	335	224	117
$T_{80}$	750	550	347

Tabla No. 21. Tiempo de Molienda 1.5 min

Producto	% Peso	Análisis, %					% Distribución Relativo/Absoluto				
		Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
-14+100	67.36	17.34	4.38	0.10	7.42	35.10	69.35	65.85	68.86	61.96	71.24
-100+200	10.38	16.35	3.80	0.04	9.12	31.72	10.09	8.84	4.93	9.99	9.92
-200+270	2.43	15.90	4.15	0.09	9.12	32.71	2.29	2.26	2.59	2.33	2.39
-270+325	0.29	16.15	4.45	0.13	9.44	31.47	0.28	0.29	0.45	0.29	0.28
-325	19.53	15.50	5.20	0.10	12.34	27.47	17.99	22.76	23.17	25.42	16.17
Total	100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Calculada		16.83	4.46	0.08	9.48	33.19					
Ley Analizada		15.00	3.60	2.34	9.16	32.90					

Tabla No. 22. Tiempo de Molienda 3.0 min

Producto	% Peso	Análisis, %					% Distribución Relativo/Absoluto				
		Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
-14+100	59.51	17.51	4.41	0.08	8.72	35.49	61.82	57.91	63.17	54.75	62.66
-100+200	12.34	16.40	4.20	0.04	8.70	33.21	12.00	11.43	6.44	11.33	12.22
-200+270	3.29	16.50	4.15	0.10	8.84	32.96	3.22	3.01	4.29	3.07	3.23
-270+325	0.49	16.70	4.65	0.10	8.88	32.71	0.48	0.50	0.63	0.46	0.47
-325	24.37	15.55	5.05	0.08	11.82	29.47	22.48	27.15	25.46	30.40	21.42
Total	100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Calculada		16.86	4.53	0.08	9.48	33.54					
Ley Analizada		15.00	3.60	2.34	9.16	32.90					

Tabla No. 23. Tiempo de Molienda 5.0 min

Producto	% Peso	Análisis, %					% Distribución Relativo/Absoluto				
		Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
-14+100	45.08	17.29	4.48	0.07	8.58	35.85	47.22	44.76	30.41	40.68	48.36
-100+200	19.03	16.40	4.05	0.08	8.78	33.96	18.90	17.06	15.09	17.57	19.34
-200+270	4.25	16.30	4.25	0.12	9.10	33.71	4.19	4.00	5.05	4.07	4.29
-270+325	1.05	16.60	4.35	0.09	9.08	32.71	1.06	1.02	0.94	1.01	1.03
-325	30.59	15.45	4.90	0.16	11.40	29.47	28.62	33.17	48.51	36.67	26.98
Total	100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Calculada		16.51	4.52	0.10	9.51	33.41					
Ley Analizada		15.00	3.60	2.34	9.16	32.90					

La etapa de clasificación puede servir como una etapa de preconcentración, así como para determinar la malla de corte, útil para conocer el tamaño de partícula de alimentación a algunos procesos subsecuentes. Una fracción importante del material se tiene a -270 mallas, eliminarlos repercute en la recuperación dificultando operaciones de separación líquido-sólido, sin embargo, este material puede tener valor para uso en las ferro-aleaciones.

#### IV. 2. 3. 4. DISTRIBUCIÓN DE VALORES

La granulometría expresa la distribución de tamaño de partículas en un mineral cualquiera, para el efecto se utiliza una serie de cribas o cedazos estandarizados y cuyas aberturas difieren en un factor igual a la raíz de 2, tomando como base la malla 200. A través de la distribución de valores se determina el grado de segregación y/o diseminación de los elementos de interés en la muestra, y cuantificar la distribución elemental en relación al tamaño de partícula. La determinación se realizó manualmente en húmedo, empleando las mallas de la Serie U. S. Standard Testing Sieve según A.S.T.M. E-11.

#### IV. 2. 3. 4. 1. RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE VALORES

Tabla No. 24. Distribución de valores en muestra de cabeza

Producto (mallas)	Abertura (mm)	% Peso	Peso Ac (+) [%]	Peso Ac (-) [%]
-2+1	-50.00+25.00	6.39	6.39	100.00
-1+3/4	-25.00+19.00	14.59	20.98	93.61
-3/4+1/2	-19.00+12.00	24.21	45.19	79.02
-1/2+3/8	-12.50+9.50	10.83	56.02	54.81
-3/8+4	-9.50+4.75	21.70	77.72	43.98
-4+6	-4.75+3.35	5.35	83.07	22.28
-6+8	-3.35+2.36	4.01	87.08	16.93
-8+10	-2.36+2.00	1.78	88.86	12.92
-10+12	-2.00+1.17	1.06	89.92	11.14
-12+14	-1.17+1.40	1.36	91.28	10.08
-14	-1.40	8.72	100.00	8.72
Total		100.00		

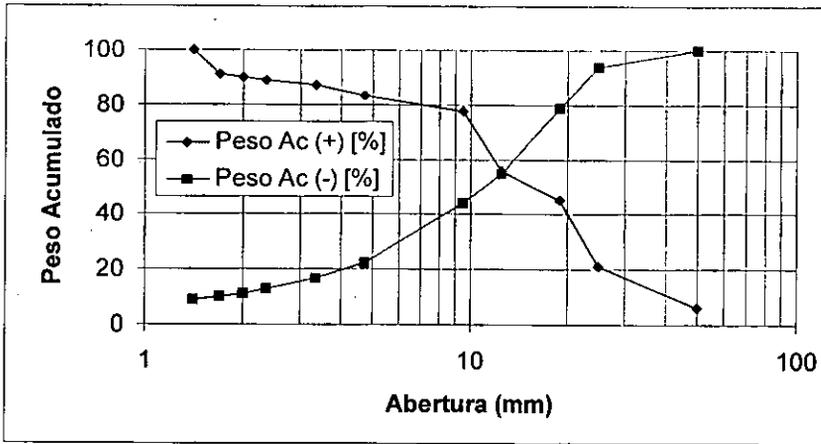


Figura No. 18. Granulometría en Muestra de Cabeza con  $T_{50}$  de 11 mm y  $T_{80}$  de 19 mm

Tabla No. 25. Balance metalúrgico de los valores en muestra de cabeza

Producto (mallas)	Abertura (mm)	% Peso	Análisis, %					% Distribución				
			Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
-2+1	-50.00+25.00	6.39	15.20	4.36	1.69	10.84	29.71	6.75	5.51	4.66	7.77	5.68
-1+3/4	-25.00+19.00	14.59	15.00	4.94	2.12	8.96	32.15	15.20	14.25	13.34	14.67	14.02
-3/4+1/2	-19.00+12.00	24.21	14.80	5.20	2.58	8.76	32.20	24.89	24.89	26.95	23.80	23.31
-1/2+3/8	-12.50+9.50	10.83	15.40	4.72	1.90	8.12	36.30	11.59	10.11	8.88	9.87	11.75
-3/8+4	-9.50+4.75	21.70	14.60	5.08	2.11	8.28	34.55	22.01	21.79	19.75	20.16	22.42
-4+6	-4.75+3.35	5.35	14.00	4.70	2.05	8.64	35.80	5.20	4.97	4.73	5.19	5.73
-6+8	-3.35+2.36	4.01	13.80	4.82	2.13	8.20	37.35	3.84	3.82	3.69	3.69	4.48
-8+10	-2.36+2.00	1.78	12.00	4.42	2.43	8.80	36.15	1.48	1.55	1.86	1.75	1.92
-10+12	-2.00+1.17	1.06	12.80	4.92	2.40	8.72	36.80	0.94	1.03	1.10	1.04	1.17
-12+14	-1.17+1.40	1.36	12.60	5.04	2.48	8.76	36.95	1.19	1.36	1.46	1.34	1.51
-14	-1.40	8.72	11.40	6.22	3.61	10.96	30.76	6.91	10.72	13.58	10.72	8.02
Total		100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Analizada			15.00	3.80	2.34	10.20	32.90					
Ley Calculada			14.40	5.06	2.32	8.91	33.44					

Se observa en la muestra de cabeza una diseminación de valores, no obstante más del 80 %Mn se encuentra entre -2+4 mallas (-50mm+4.75 mm).

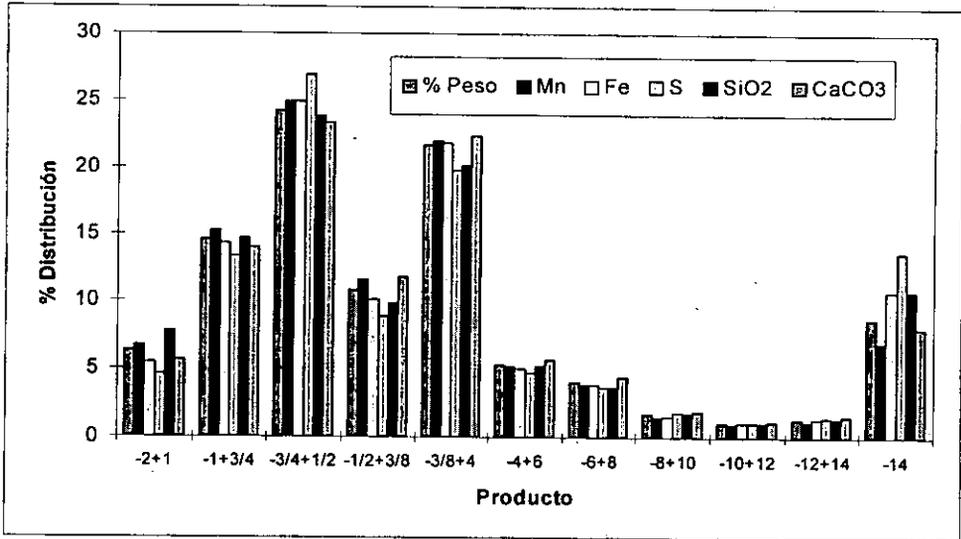
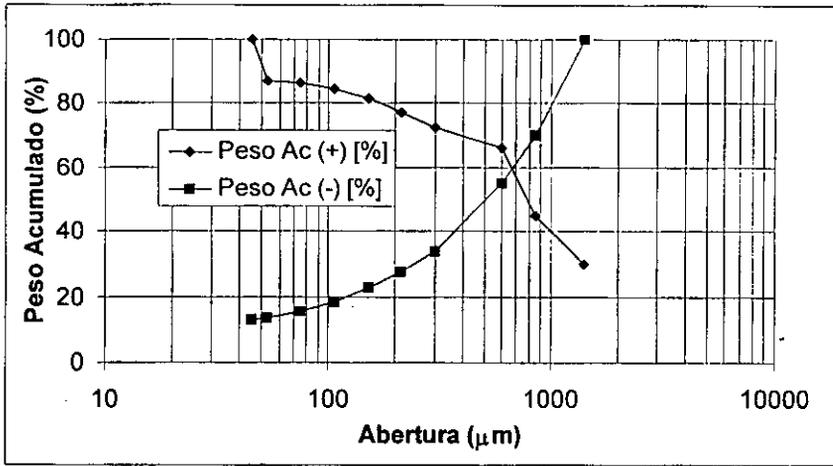


Figura No. 19. Diseminación de valores en muestra de cabeza

Tabla No. 26. Granulometría a -14 mallas

Producto	Abertura ( $\mu m$ )	% Peso	Peso Ac (+) [%]	Peso Ac (-) [%]
-14+20	-1400+850	29.79	29.79	100.00
-20+30	-850+600	14.96	44.76	70.21
-30+50	-600+300	21.44	66.20	55.24
-50+70	-300+212	6.45	72.65	33.80
-70+100	-212+150	4.67	77.32	27.35
-100+140	-150+106	4.43	81.75	22.68
-140+200	-106+75	2.92	84.67	18.25
-200+270	-75+53	2.00	86.67	15.33
-270+325	-53+45	0.51	87.18	13.33
-325+425	-45	12.82	100.00	12.82
Total		100.00		



**Figura No. 20. Distribución granulométrica en muestra 100 % -14 mallas para las pruebas metalúrgicas**

El comportamiento que se observa en las Figuras No. 18 y 20, es similar e independiente de la escala a la que se encuentran.

#### IV. 2. 3. 5. CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA (MESA WILFLEY)

Los métodos de separación por gravedad se usan para tratar una gran variedad de materiales, que varían desde los sulfuros metálicos pesados como la galena (densidad relativa 7.5) hasta el carbón (densidad relativa 1.3). El fundamento del método es cuando una capa fluyente de agua corre sobre una superficie plana inclinada, el agua más próxima a dicha superficie se retarda por la fricción del agua absorbida sobre dicha superficie y la velocidad aumenta en dirección a la superficie del agua. Si se introducen partículas de mineral en el interior de la capa, las partículas pequeñas no se moverán tan rápidamente como las partículas grandes, puesto que estarán sumergidas en la porción de la capa de movimiento más lento. Las partículas de alta densidad relativa se mueven más lentamente que las partículas más ligeras y en esa forma se produce un

desplazamiento lateral del material. La capa que fluye separa efectivamente las partículas gruesas ligeras de las partículas pequeñas pesadas.

Haciendo uso de las propiedades físicas de los minerales encontrados en la muestra y debido a que cada uno posee diferente gravedad específica es posible establecer una alternativa de concentración de valores de fierro, principal impureza a eliminar. Para lograr tal fin se utilizó una Mesa Wilfley marca Denver para laboratorio No. 10 y durante la ejecución de la prueba, se ajusta el ángulo de inclinación de la misma.

**Tabla No. 27. Parámetros utilizados en la prueba de Concentración Gravimétrica**

<i>Variable</i>	
Flujo de Agua	5 L/seg
Ángulo de la Mesa	5 °
Frecuencia	360 golpes/min
Velocidad de la mesa	270 r.p.m.

Los datos del cuadro anterior son variables y van en función de los valores a recuperar y la ganga que los impurifica.

## IV. 2.3.5.1. RESULTADOS DE LA PRUEBA No. 1 (PRODUCTO -14+100 MALLAS)

Tabla No. 28. Tiempo de Molienda 1.5 min

Producto	% Peso		Análisis, %						% de Distribución Relativo						% de Distribución Absoluto								
	Rel	Abs	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
Lama	32.15	21.66	15.00	2.90	0.09	9.10	38.46	27.83	21.38	34.35	39.43	35.23	19.30	14.08	23.65	24.43	25.10						
Medio	26.04	17.54	16.60	3.60	0.10	3.60	34.71	24.94	21.50	30.91	12.63	25.75	17.30	14.15	21.29	7.83	18.35						
Conc	41.80	28.16	19.58	5.96	0.70	8.51	32.76	47.23	57.13	34.74	47.94	39.02	32.75	37.61	23.92	29.71	27.79						
Total	100.00	67.36					100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	69.35	65.85	68.86	61.96	71.24						
Ley Calculada							17.33	4.36	0.08	7.42	35.10	11.67	2.94	0.06	5.00	23.63							

Tabla No. 29. Tiempo de Molienda 3.0 min

Producto	% Peso		Análisis, %						% de Distribución Relativo						% de Distribución Absoluto								
	Rel	Abs	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
Lama	42.73	25.45	15.60	3.25	0.08	9.24	37.96	38.06	31.49	41.99	45.27	45.70	23.53	18.23	26.53	24.79	28.64						
Medio	14.07	8.37	16.25	3.45	0.09	8.28	35.21	13.05	11.00	15.55	13.36	13.96	8.07	6.37	9.82	7.31	8.74						
Conc	43.20	25.71	19.82	5.87	0.08	8.35	33.14	48.89	57.51	42.46	41.37	40.34	30.22	33.30	26.82	22.65	25.28						
Total	100.00	59.51					100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	61.82	57.91	63.71	54.75	62.66						
Ley Calculada							17.51	4.41	0.08	8.72	35.49	17.51	4.41	0.08	8.72	35.49							

Tabla No. 30. Tiempo de Molienda 5.0 min

Producto	% Peso		Análisis, %						% de Distribución Relativo						% de Distribución Absoluto								
	Rel	Abs	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
Lama	42.40	19.11	15.05	3.15	0.10	9.00	38.71	36.90	29.78	63.71	44.46	45.78	17.43	13.33	19.38	18.09	22.14						
Medio	11.45	5.16	15.45	3.20	0.09	8.74	36.96	10.23	8.17	15.48	11.66	11.80	4.83	3.66	4.71	4.74	5.71						
Conc	46.15	20.81	19.81	6.03	0.03	8.16	32.95	52.87	62.05	20.81	43.88	42.42	24.97	27.78	6.33	17.85	20.51						
Total	100.00	45.08					100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	47.22	44.76	30.41	40.68	48.36						
Ley Calculada							17.29	4.48	0.07	8.58	35.85	17.29	4.48	0.07	8.58	35.85							

De la prueba de concentración gravimétrica se puede destacar que se observa un ligero zoneamiento, entre los sulfuros de color brillante en la parte superior del abanico formado entre los rifles de la mesa Wilfley y los carbonatos en una coloración negra de menor densidad que los primeros, en ambas fases se aprecian partículas muy pequeñas de color blanco debido a la presencia de sílice, sin embargo, esto puede deberse a la asociación en la que se encuentran las especies minerales, otros factores que influyen en los resultados es el arrastre mecánico y/o liberación de especies.

#### IV. 2. 3. 6. CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA (SMAI)

Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia en las propiedades magnéticas entre los minerales componentes de la mena y se usan para separar los minerales valiosos de la ganga no magnética. Los materiales se clasifican en dos amplios grupos, según los atraiga o repela un magneto: *los diamagnéticos* se repelen a todo lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta el punto donde la intensidad de campo ya es muy pequeña. Aquí las fuerzas que actúan son muy pequeñas y las sustancias diamagnéticas no se pueden concentrar magnéticamente. Los *paramagnéticos* son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta los puntos de mayor intensidad de campo.

Los separadores magnéticos se clasifican en máquinas de alta y baja intensidad y además se subdividen en separadores de alimentación en seco y alimentación en húmedo. Los separadores de baja intensidad se usan para tratar materiales ferromagnéticos y algunos minerales altamente paramagnéticos.

Con el objeto de observar el comportamiento de este mineral al proceso de concentración magnética, se sometió a una serie de pruebas en el separador magnético de alta intensidad (Eriez

Magnetics<sub>MR</sub>), el cual es un equipo de operación en húmedo e intermitente hasta la saturación del producto magnético en el área sometido al campo magnético.

La presencia de especies magnéticas presenta un camino a seguir mediante diferentes intensidades de campo magnético. El sistema a utilizar es un separador magnético de alta intensidad con alimentación manual.

**Tabla No. 31. Variables utilizadas en la Concentración Magnética**

<i>Variable</i>	
No. Rejillas	4
Campo Magnético	1550, 2600 y 4800 Gauss
Equivalencia	1.55, 2.60 y 4.80 Tesla
No de Pasadas, <sup>(3)</sup>	1

<sup>(3)</sup> Una vez por cada voltaje y tres diferentes voltajes para cada muestra, dato para conocer las equivalencias en Gauss.

## IV. 2. 3. 6. 1. RESULTADOS DE LA PRUEBA No. 1 (CONCENTRADO DE MESA WILFLEY)

Tabla No. 32. Tiempo de Molienda 1.5 min

Producto	% Peso		Análisis, %						% de Distribución Relativo						% de Distribución Absoluta								
	Rel	Abs	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
1550 G	1.62	0.68	16.35	12.05	0.07	8.80	19.98	1.35	3.27	1.52	1.67	0.99	0.64	1.87	0.53	0.80	0.38						
2600 G	2.73	1.14	20.00	4.06	0.09	8.50	24.22	2.79	1.86	3.29	2.73	2.02	1.32	1.06	1.14	1.31	0.79						
8000 G	18.49	7.73	20.15	5.55	0.05	8.44	32.22	19.03	17.22	12.40	18.34	18.19	8.99	9.83	4.31	8.79	7.10						
No Magnético	77.16	32.26	19.50	6.00	0.08	8.52	33.46	76.84	77.68	82.79	77.26	78.81	36.29	44.36	28.76	37.04	30.75						
Total	100.00	41.80						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	47.23	57.13	34.74	47.94	39.02						
Ley Calculada								19.98	5.96	0.07	8.51	32.76	19.58	5.96	0.07	8.51	32.76						

Tabla No. 33. Tiempo de Molienda 3.0 min

Producto	% Peso		Análisis, %						% de Distribución Relativo						% de Distribución Absoluta								
	Rel	Abs	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
1550 G	0.59	0.26	18.20	15.90	0.08	9.10	19.98	0.54	1.60	0.59	0.64	0.36	0.27	1.60	0.59	0.64	0.36						
2600 G	1.54	0.66	21.55	7.70	0.07	8.30	24.22	1.67	2.01	1.35	1.53	1.12	0.82	2.01	1.35	1.53	1.12						
8000 G	7.54	3.30	19.85	5.60	0.08	8.36	32.22	7.65	7.28	7.65	7.65	7.42	3.74	7.28	7.65	7.65	7.42						
No Magnético	90.24	38.99	19.80	5.80	0.08	8.34	33.46	90.14	89.11	90.41	90.18	91.10	44.07	89.11	90.41	90.18	91.10						
Total	100.00	43.20						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	48.89	57.51	42.46	41.37	40.34						
Ley Calculada								19.82	5.87	0.08	8.35	33.14	19.82	5.87	0.08	8.35	33.14						

Tabla No. 34. Tiempo de Molienda 5.0 min

Producto	% Peso		Análisis, %						% de Distribución Relativo						% de Distribución Absoluta								
	Rel	Abs	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	
1550 G	0.58	0.27	17.00	17.50	0.05	9.24	16.73	0.50	1.70	0.87	0.66	0.30	0.27	1.05	0.18	0.29	0.13						
2600 G	1.32	1.32	21.10	9.25	0.04	8.40	23.47	1.40	2.02	1.57	1.35	0.94	0.74	1.25	0.33	0.59	0.40						
8000 G	16.18	0.00	19.60	5.50	0.05	8.22	32.96	16.01	14.76	24.16	16.29	16.19	8.46	9.16	5.03	7.15	6.87						
No Magnético	81.92	0.00	19.85	6.00	0.03	8.14	33.21	82.09	81.52	73.40	81.69	82.52	43.40	50.59	15.27	35.85	35.03						
Total	100.00	1.59						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	52.87	62.05	20.81	43.88	42.42						
Ley Calculada								19.81	6.03	0.03	8.16	32.95	20.04	10.65	0.04	8.54	22.32						

IV. 2. 3. 6. 2. RESULTADOS DE LA PRUEBA No. 2 (PRODUCTO DE MOLIENDA DIRECTA)

Tabla No. 35. Tiempo de Molienda 1.5 min

Producto	% Peso	Análisis, %				% Distribución Relativa/Absoluta					
		Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
1550 G	0.65	14.80	9.60	2.71	9.40	3.74	0.84	1.11	3.46	0.58	0.07
2600 G	0.71	17.00	6.80	1.43	9.18	26.22	0.80	0.86	2.00	0.62	0.56
8000 G	5.39	16.60	4.80	1.02	9.06	33.71	5.92	4.93	10.80	4.64	5.43
No Magnético	93.25	15.00	5.60	0.46	10.61	33.71	92.64	93.40	83.75	94.15	93.94
Total	100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Calculada		15.10	5.59	0.51	10.51	33.46					
Ley Analizada		15.00	3.60	2.34	9.16	32.90					

Tabla No. 36. Tiempo de Molienda 3.0 min

Producto	% Peso	Análisis, %				% Distribución Relativa/Absoluta					
		Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
1550 G	0.45	13.25	13.25	3.33	9.56	13.48	0.39	1.13	1.42	0.41	0.19
2600 G	0.90	18.80	8.80	1.59	8.98	26.22	1.11	1.17	1.37	0.77	0.74
8000 G	6.51	16.40	4.90	0.87	9.68	11.49	6.97	6.10	5.43	6.00	2.33
No Magnético	92.14	15.20	5.20	1.04	10.58	33.71	91.53	91.60	91.77	92.82	96.75
Total	100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Calculada		15.30	5.23	1.04	10.50	32.11					
Ley Analizada		15.00	3.60	2.34	9.16	32.90					

Tabla No. 37. Tiempo de Molienda 5.0 min

Producto	% Peso	Análisis, %				% Distribución Relativa/Absoluta					
		Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
1550 G	0.52	14.00	5.60	2.56	8.58	22.47	0.48	0.54	1.24	0.45	0.32
2600 G	1.44	17.60	5.65	1.40	8.16	29.96	1.68	1.51	1.89	1.19	1.20
8000 G	4.86	18.40	4.60	0.68	8.26	29.96	5.95	4.16	3.11	4.08	4.07
No Magnético	93.19	14.80	5.40	1.07	9.94	36.21	91.88	93.78	93.76	94.27	94.40
Total	100.00						100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ley Calculada		15.01	5.37	1.06	9.83	35.75					
Ley Analizada		15.00	3.60	2.34	9.16	32.90					

#### IV. 2. 3. 7. LIXIVIACIÓN

Un proceso hidrometalúrgico que se emplea para la recuperación de metales a partir de sus minerales es la lixiviación, la cual consiste de un sistema apropiado en el que se ataca al mineral, disolviéndolo y pasando el metal a la solución como una especie iónica. La lixiviación por precolación es empleada para minerales de baja ley. En este proceso se lixivía el mineral a tamaño normal introduciéndolo en columnas con la finalidad de humectar el mineral e ir disolviendo los valores pasando a la solución como ión y recirculando la solución para enriquecimiento.

Debido a que los valores de interés en la muestra se encuentran como carbonatos, el contacto de ésta con un ácido permitirá disolver el manganeso. Con la reconstrucción química de los compuestos que integran la muestra (sección IV.1.6) permite calcular la cantidad de ácido sulfúrico teórico necesario para reaccionar con el material. Algunos parámetros considerados en este estudio fueron: cantidad de ácido, porcentaje de sólidos, temperatura y tratamiento térmico (calcinación). El sistema es un reactor cilíndrico de cinco bocas con termostato automático y agitador de velocidad variada.

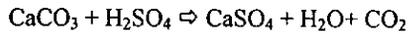
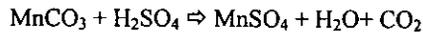
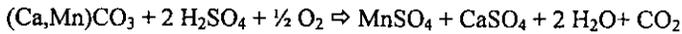
Tabla No. 38. Variables para Pruebas de Lixiviación Intermittente

Variable	Unidad	Magnitud/ No. De Prueba							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Granulometría	Malla	100% -14							
Agitación		1 <sup>(4)</sup>							
Dilución	Sólido:Disolvente	5:1							
Volumen	ML	500							
Relación Mineral:H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Estequiométrico*	0.5	0.8	0.8	2.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Calcinación	° C	--	--	950	--	--	--	--	--
Temperatura	° C	21	21	21	21	60	40	40	40
Sólidos	%	16	16	14	16	16	16	50	30

<sup>(4)</sup> Escala del sistema. \* Se requieren 98.27 g de ácido por cada 100 g de mineral, es decir, 0.50 E corresponden a 100 g de mineral y 49.14 g de ácido y en contraparte 2.0 es un exceso del 100 % de ácido (196.54 g).

#### IV. 2. 3. 7. 1. CANTIDAD DE H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> UTILIZADA EN LA LIXIVIACIÓN

Reacciones de Interés



$$7.49\%_{CaO} * \frac{107.5(Ca,Mn)CO_3}{(0.5)56CaO} = 28.75\%_{MC}$$

$$28.75\%_{MC} * \frac{0.5 * 115CaO}{107.5MC} = 15.37\%_{MnCO_3, MC}$$

$$28.75\%_{MC} * \frac{0.5 * 115MnCO_3}{107.5MC} = 15.99\%_{MnCO_3, R}$$

Rodocrosita R. Base 100 g mineral

$$32.9\%_{CaCO_3(C)} * \frac{98g_{H_2SO_4}}{100g_{CaCO_3}} = 32.24g_{H_2SO_4}$$

$$28.75\%_{MC} * \frac{2 * 98g_{H_2SO_4}}{107.5g_{MC}} = 52.41g_{H_2SO_4}$$

$$15.99 \%_R * (98 \text{ g}_{\text{H}_2\text{SO}_4} / 115 \text{ g}_R) = 13.62 \text{ g}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$$

Sumando las cantidades se requiere por cada 100 g de mineral  $98.27 \text{ g}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ .

#### IV. 2. 3. 7. 2. RESULTADOS DE LA LIXIVIACIÓN BACH

Debido a que los resultados obtenidos en la etapa de concentración no fueron significativamente de carácter trascendente se procedió a experimentar con procesos de extracción sin realizarse algún proceso de concentración, lixiviando muestra de cabeza; los resultados obtenidos se presentan a continuación.

**Tabla No. 40. Resumen de los productos de lixiviación en  $\text{H}_2\text{SO}_4$**

<sup>(5)</sup> E: Estequiométrico. <sup>(6)</sup> C: Calcinación. <sup>(7)</sup> Ex: Exceso

Condiciones	Prueba	Producto	V, L	m, g	Mn			% Recuperación Mn	Fe			% Recuperación Fe
					g/L	%	g		g/L	%	g	
0.50 E (5)	1	Licor	0.50	93.00	21.40		10.70	70.56	1.40		0.70	16.01
		Residuo				4.80	4.46	29.44	3.95	3.67	83.99	
0.80 E	2	Licor	0.50	91.80	26.80		13.40	86.39	0.38		0.19	5.17
		Residuo			2.30	2.11	13.61	3.80	3.49	94.83		
0.80 E + C (6)	3	Licor	0.50	78.90	2.50		1.25	8.93	0.71		0.36	8.41
		Residuo			16.15	12.74	91.07	4.90	3.87	91.59		
100 Ex (7)	4	Licor	0.50	92.70	27.20		13.60	47.83	5.00		2.50	47.01
		Residuo			16.00	14.83	52.17	3.04	2.82	52.99		
60 °C	5	Licor	0.50	97.60	30.12		15.06	69.35	3.60		1.80	30.82
		Residuo			6.82	6.66	30.65	4.14	4.04	69.18		
40 °C	6	Licor	0.50	96.50	19.50		9.75	63.49	1.95		0.98	18.01
		Residuo			5.81	5.61	36.51	4.60	4.44	81.99		
50 %S	7	Licor	0.50	524.70	16.25		8.13	9.24	0.97		0.49	1.87
		Residuo			15.21	79.81	90.76	4.84	25.40	98.13		
30 %S	8	Licor	0.50	223.80	20.75		10.38	26.96	0.60		0.30	2.87
		Residuo			12.56	28.11	73.04	4.53	10.14	97.13		

Tabla No. 41. Porcentaje de disolución del manganeso

Tiempo, min	Estequiométrico				Temperatura		Sólidos	
	100 %	0.80 %	0.80 % + C	0.50 %	40 °C	60 °C	30 %	50 %
No. Prueba	4	2	3	1	6	5	8	7
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0
5	69.76	71.17	2.11	60.22	40.32	50.61	66.74	0
15	77.91	84.65	3.32	71.59	56.52	66.79	75.65	62.26
30	87.67	88.96	5.70	78.78	65.56	72.99	70.97	58.74
60	89.13	93.35	9.58	73.46	71.53	78.82	72.21	52.07
90	89.49	97.82	11.77	64.67	80.59	80.81	71.55	57.89
120	87.44	92.41	13.48	79.30	77.12	87.28	74.48	54.23
150	83.98	97.90	14.01	78.37	72.65	84.29	63.17	55.75
180	88.56	97.48	14.16	75.40	73.69	75.29	56.54	53.68
240	90.51	92.08	15.45	72.81	70.39	85.74	70.96	44.09

Durante la lixiviación con  $\text{SO}_2$  los productos fueron difíciles de monitorear y analizar, cuando se realizó la separación sólido-líquido se observó la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  (Anexo C). Cabe destacar que en cada una de las pruebas los residuos presentan decoloración.

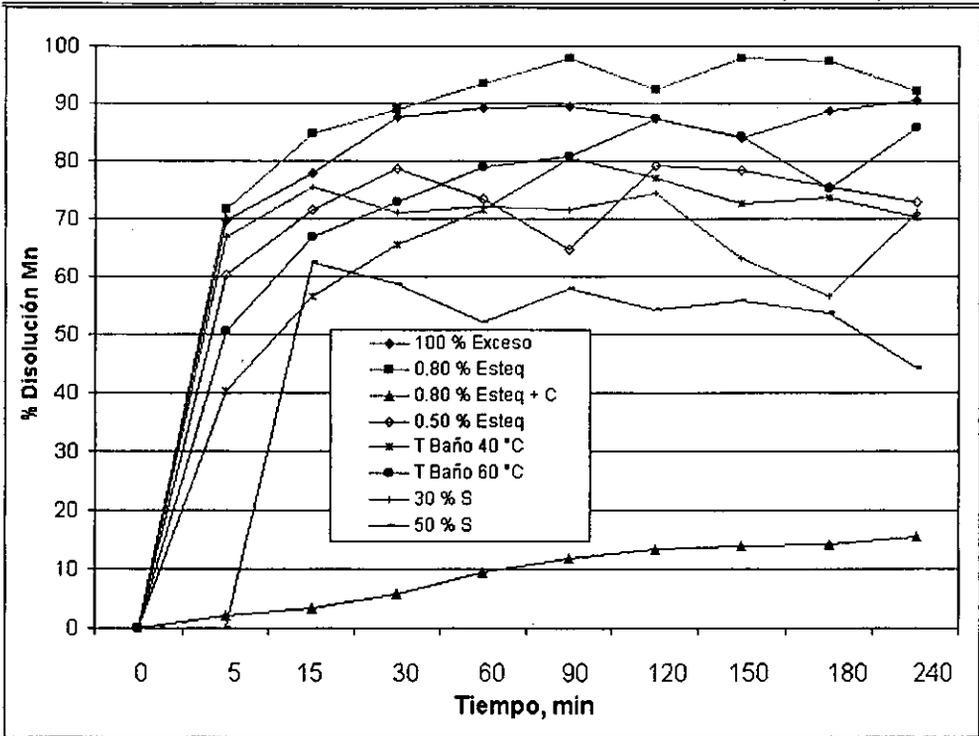


Figura No. 21: Porcentaje de disolución del manganeso contra el tiempo de disolución a diferentes parámetros de lixiviación (sistema bach)

#### IV. 2. 3. 7. 3. RESULTADOS DE LA PRUEBA CONTINUA

Otra alternativa que se realizó fue el enriquecimiento de la solución a través de diferentes etapas, las condiciones de operación se describen a continuación.

Tabla No. 39. Variables para pruebas de lixiviación continua

<i>Variable</i>	<i>Magnitud</i>
Concentración de $H_2SO_4$	5 g/L
Volumen de la Solución	4.6 L
Temperatura	18 a 22 °C
Sólidos Carga 1, 2, 3 y 4	55, 56, 32 y 26 %

Debido a que el material a utilizar era de diferente granulometría se procedió a calcular el peso volumétrico, a fin de cuantificar el volumen que ocupa una cantidad de material, el cual es de 1.63 t/m<sup>3</sup> para producto +¼ pulgada y 1.43 t/m<sup>3</sup> para producto -¼ pulgada.

**Tabla No. 42. Cantidades de manganeso obtenidas para cada etapa de la prueba continua**

Solución Rica	Volumen, L	gMn/L	gMn	Solución Mediana	Volumen, L	gMn/L	gMn	Residuo	Peso, g	%Mn	gMn
4	4.12	18.00	74.16	4	4.58	20.80	95.26	1	4664.4	12.90	601.71
3	3.97	20.40	80.99	3	4.09	19.40	79.35	2	3816.2	14.00	534.27
2	4.28	20.20	86.46	2	4.60	20.20	92.92	3	2206.8	14.85	327.71
1	4.16	18.60	77.38	1	4.09	12.20	49.90	4	1638.0	15.70	257.17

**Tabla No. 43. Por ciento de disolución de manganeso, fierro y calcio en la solución rica**

Solución Rica	Volumen, L	Tiempo, h	Análisis, g/L			% Distribución		
			Mn	Fe	Ca	Mn	Fe	Ca
4	4.12	24	18.00	0.07	0.0238	9.62	0.11	0.02
3	3.97	48	20.40	0.10	0.0237	11.66	0.21	0.02
2	4.28	72	20.20	0.14	0.0243	17.05	0.51	0.03
1	4.16	96	18.60	0.15	0.0235	20.13	0.77	0.04

**Tabla No. 44. Por ciento de disolución de manganeso, fierro y calcio en la solución mediana**

Solución Mediana	Volumen L	Tiempo	Análisis, g/L			% Distribución		
			Mn	Fe	Ca	Mn	Fe	Ca
4	4.58	24	20.80	0.15	0.0253	12.35	0.27	0.02
3	4.09	48	19.40	0.16	0.0245	11.42	0.35	0.02
2	4.60	72	20.20	0.20	0.0242	18.32	0.79	0.04
1	4.09	96	12.20	0.15	0.0267	12.98	0.76	0.05

**Tabla No. 45. Por ciento de disolución de manganeso, fierro y calcio en el residuo**

Residuo	Tiempo	Peso g	Análisis, %			% Recuperación		
			Mn	Fe	Ca	Mn	Fe	Ca
1	24	4664.4	12.90	5.36	14.00	78.03	99.61	99.97
2	48	3816.2	14.00	4.86	13.70	76.92	99.44	99.96
3	72	2206.8	14.85	5.24	14.40	64.63	98.70	99.93
4	96	1638.0	15.70	4.88	14.80	66.89	98.48	99.91

Cabe destacar que el porcentaje de disolución global en la prueba continua apenas alcanzó el 27 %Mn. Durante la prueba continua la cama de mineral servía como filtro, pues la solución estaba recirculando, llegando a distinguir un color rosa pálido, sin embargo, una vez que se descargó esta solución se observó la precipitación de calcio proporcionándole a la solución un tono amarillo.

## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

## V. 1. DE LA CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

La muestra estudiada es de color negro, en forma de capas exfoliables de espesor variado, la textura es de tipo microcristalino (tamaño de grano menor a 3  $\mu\text{m}$ ). La matriz está constituida por capas de carbonatos, entre estas hay relleno de fracturas de calcita y cuarzo de tipo granular asociado a las vetillas.

De la fluorescencia de Rayos X, el calcio es el elemento que se encuentra en mayor proporción, los minerales que contienen éste son manganocalcita y la calcita. En menor proporción el manganeso formado parte de la manganocalcita, así como de otras especies identificadas como son la pirolusita, la rodocrosita y el psilomelano, que al cuantificarlo como elemento tiene una ley de 15 %. El fierro está en la misma proporción (1-10 %), al valorarlo la ley es de 3.60 % y la especie mineral en la que se encuentra es la pirita.

Otros elementos identificados son el titanio, estroncio, bario, plomo y el zinc, sin embargo, no se consideró su beneficio como parte de los objetivos del presente trabajo. El titanio debido a su relevancia económica en el mercado de los metales, actualmente puede beneficiarse y obtenerlo como un subproducto, cabe destacar que en la difracción de Rayos X no se determinó alguna especie asociada a este elemento, esto debido al límite de detección del sistema, el cual requiere que las especies estén en más de un 2 %.

De los elementos traza sólo el bario se encuentra asociado al psilomelano, la caolinita es un silicoaluminato, esta especie tiene relación con el cuarzo, debido a que es una variedad del primero.

A fin de identificar mejor las especies minerales y la proporción de los elementos se recomienda utilizar una lámpara de fierro, ya que a través de ésta se puede tener una mayor amplitud en los picos del difractograma para las especies de manganeso.

Referente a la mineralogía de la muestra se encuentra influenciada por la misma naturaleza, de tipo sedimentario, los minerales de manganeso identificados se mencionaron anteriormente.

Una vez que se identificaron y cuantificaron las especies de interés es posible conocer la forma en que se encuentran asociados unos con otros. La pirita se identificó con ayuda de un microscopio óptico de luz reflejada, la forma en que se presentan es en granos y láminas diseminadas a través de toda la matriz.

El psilomelano se distingue por un bandeo paralelo (o estratiforme) de tamaño variado. La presencia de la pirolusita es de tipo isla siendo los granos de tamaño y forma irregular.

Con la ayuda de un microscopio óptico de luz transmitida se caracterizaron los minerales no metálicos, como la calcita o el cuarzo. En principio ambas especies son de color blanco, sin embargo, al utilizar nicoles cruzados la calcita permite el paso de la luz, el cuarzo por el contrario se oscurece, esto debido a la anisotropía y las propiedades ópticas de los minerales se puede caracterizar las especies, dependiente del tipo de sistema cristalino de cada mineral.

Con el análisis de la identificación de especies, cuantificación y relación textural se puede establecer en primera instancia una problemática de liberación de valores, así mismo, la caracterización de los minerales debe realizarse como un estudio independiente a fin de ampliar la información reportada en el presente trabajo. Cabe hacer mención que los trabajos que se realicen en el futuro consideren de forma importante el análisis de la matriz de carbonatos para que se pueda cuantificar la proporción de cada especie presente, esta información se puede complementar con la ayuda de un estudio de liberación de valores en el cual se cuantifica la proporción de cada especie en un intervalo de tamaños.

## V. 2. DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

A partir del análisis granulométrico (Figura No.18) y la distribución de valores practicado a la muestra de cabeza, el tamaño medio y estándar es de 11 y 19 mm, respectivamente (Figura No. 19).

De la Tabla No. 25, se observa que no hay una malla en la cual predominen los valores de manganeso, la mejor relación de Mn:Fe (3.49:1) se tienen en la fracción gruesa, en ningún caso la relación es mayor a la de cabeza (4.17:1). Como ya se mencionó anteriormente la muestra no presenta una segregación de valores, por lo cual, se procedió a triturar toda la muestra por pasos alternos de trituración-clasificación, ésto con el objeto de evitar la generación de finos, fuente de pérdida de valores. El 80.44 %Mn se encuentra en la fracción -2+4 pulgadas en este caso la preconcentración manganeso-ferro es similar. Ligeras segregaciones de azufre en las fracciones -3/4+1/2 pulgada y a -14 mallas, cabe destacar que la única especie determinada asociada a este elemento es la pirita. Al retirar estas fracciones eliminamos el 40.53 %Fe, sin embargo, se retiraría el 31.8 %Mn. Aun así se puede establecer una reducción de tamaño para aplicar una etapa preconcentradora.

Por la forma en la que se encuentran la especies minerales (pirita, calcita y manganocalcita), es difícil llegar a su liberación para obtener un concentrado de alguna especie mineral. El análisis granulométrico y la distribución de valores corroboran lo anterior. Indicando que los valores se encuentran en la fracción gruesa, por tanto, hay que moler para liberar y concentrar.

Debido a que las pruebas son a nivel laboratorio la granulometría de alimentación de los equipos es a 14 mallas (1.4 mm), al realizar el análisis granulométrico a una fracción se le determina el tamaño medio y estándar, 500 y 1000  $\mu\text{m}$ , respectivamente (Figura No.20).

De la evaluación de los productos de molienda, sólo el azufre y la sílice ofrecen oportunidad para la liberación y separación, en menor proporción el calcio, sin embargo, persiste una fuerte relación Mn-Fe-Ca. Confirmando los resultados evaluados en caracterización mineralógica.

Elementos de control como el azufre a un tiempo de molienda de 5.0 min. presenta una concentración del 48.51 % (Tabla No. 23), el doble al obtenido a 1.5 min. (23.17 %, ver Tabla No. 21), de forma similar se comporta la sílice. No hay que olvidar que en todos los casos las leyes de manganeso y hierro, son muy similares para los diferentes tiempos de molienda en los diferentes productos. El incremento en la concentración del azufre puede deberse a que éste proceda de los masivos de pirita, aun así la liberación en la matriz de carbonatos no se logra. Para los diferentes tiempos de molienda eliminar la fracción -325 mallas (45  $\mu\text{m}$ ), repercute en la pérdida del 20 %Mn (ley de 15.5 %Mn). En ninguna de las fracciones analizadas de forma individual exhibe una relación Mn:Fe superior a la cabeza.

Se debe especificar que a moliendas finas existe mayor liberación con el inconveniente de un exceso de finos, el retirar los mismos repercuten en la recuperación de manganeso. Por lo tanto se sugiere una molienda en pasos (circuito cerrado) para establecer una carga circulante y control de finos.

### V. 3. DE LA EVALUACIÓN DE CONCENTRACIÓN

Al evaluar la concentración gravimétrica se encontró que no existen condiciones para formar un concentrado con una relación Mn:Fe del tipo 7:1. De las Tablas No. 28 al No. 30, se describen los resultados de las pruebas realizadas, en cada uno de los diferentes concentrados se determinaron leyes superiores a 19 %Mn, esto nos habla de una preconcentración de valores, no obstante las relaciones Mn:Fe no superan 3.50:1. En estos productos conforme se incrementa el tiempo de molienda la recuperación absoluta es menor, es decir, debido a que son productos procedentes de una etapa previa de clasificación la cantidad de material utilizado en la molienda a 1.5 min es

mayor que en los otros casos (64.36 wt/o). Por tanto, a mayores relaciones manganeso-ferro menor porcentaje de recuperación.

Lograr productos con la relación deseada Mn:Fe no ha sido fácil, en este caso las lamas de Mesa Wilfley reportan valores de 4.78:1 a 5.17:1, esta es la fracción fina consecuencia de la relación de los valores con el hierro a niveles de liberación alto (Tablas No. 28 al 30).

En el caso de la sílice y la calcita, ofrece una alternativa para poder ser eliminados parcialmente conforme se incrementa el tiempo de molienda, sin embargo, esto repercute desfavorablemente en la formación de finos y con esto en la pérdida de valores.

Las pruebas de concentración magnética aplicados a los concentrados de Mesa Wilfley, confirman que una fracción de hierro total está uniformemente relacionado con el manganeso. De los diferentes concentrados magnéticos se logran leyes de manganeso superiores a la de cabeza, sin embargo, en estos concentrados el elemento a eliminar es el hierro; debido a su diseminación en la matriz de carbonatos hay arrastre de valores de manganeso.

En el caso de los productos no magnéticos se logra una preconcentración de valores de manganeso pero igualmente presenta un enriquecimiento de hierro, lo cual repercute en la calidad del concentrado no magnético.

La pirita presenta susceptibilidad magnética pero la intensidad de campo utilizada no es lo suficiente para concentrar los valores, es por ello que se requiere mayor campo magnético, este consumo se refleja en la cantidad de energía utilizada principal fuente de gastos de la industria y repercusión en las utilidades del proceso. Una alternativa a seguir a fin de disminuir en caso de ser necesario esta etapa es la separación electrostática, la cual a diferencia de la utilizada en este trabajo mantiene el campo magnético abierto.

Las relaciones Mn:Fe para los diferentes productos no es favorable, en el mejor de los casos fue de 4.93:1 (concentrado magnético de 1.5 min. de molienda, 1.32 %Mn de recuperación y ley de

20 %Mn). Los resultados de la molienda directa son desfavorables y no aportan una alternativa de concentración.

Las concentraciones magnéticas realizadas sobre esta muestra, no dieron resultados que puedan considerarse adecuados ya que se obtuvieron relaciones manganeso-ferro alrededor de 5.1:1, valor muy por debajo del 7:1 mínimo deseado.

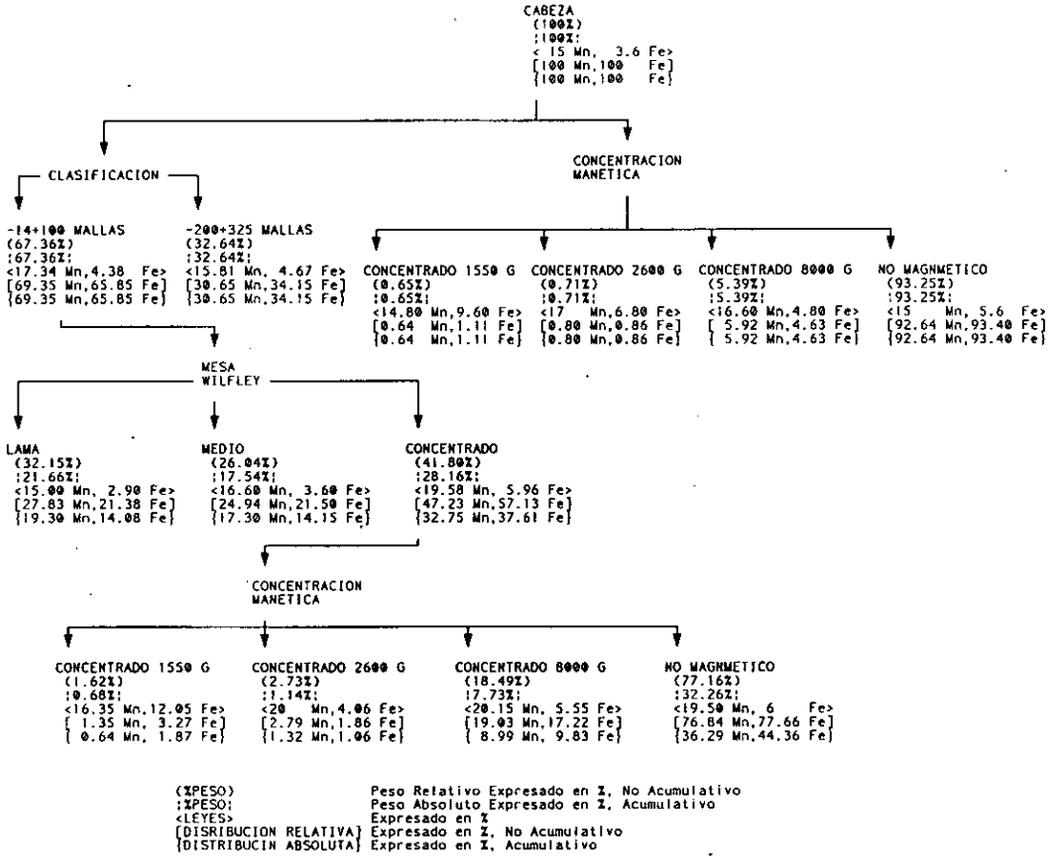
El procesamiento convencional para los minerales de manganeso demandan niveles de concentración mayores a 25 % Mn partiendo de una mena mayoritariamente constituida por Rodocrosita ( $MnCO_3$ ).

Los resultados obtenidos en las concentraciones magnéticas son debido principalmente a la ausencia de especies magnéticas de fierro. Por otro lado, ya que la principal especie de fierro es la pirita, se podría intentar una tostación magnetizante.

Algunas alternativas para poder obtener concentrados viables son la concentración en medio denso, la flotación inversa y la biolixiviación, esto a fin de eliminar la pirita.

La flotación inversa se cree no puede ser de forma directa, ésto por la falta de liberación de especies, sin embargo, dado los resultados granulométricos puede ser posible la eliminación de los finos y flotar los gruesos con ácido grasos al fierro-manganeso. Los finos se lixivian con ácido sulfúrico, para así aumentar la recuperación (se sugiere la reducción con carbón vegetal).

V. 3. I. RESULTADOS DE MOLIENDA (TIEMPO 1.5 min.)







**V. 4. DE LA LIXIVIACIÓN BACH Y CONTINUA**

En las pruebas No. 1 a la No. 4 se observa la variación de la disolución de manganeso en función de la cantidad de ácido sulfúrico utilizado, a 90 minutos de lixiviación las muestras con 100 % de exceso y 0.80 % del estequiométrico de ácido alcanza el 89.49 % y 97.82 % de disolución de manganeso, respectivamente. Subsecuentemente en este tiempo las curvas de lixiviación empiezan a decrecer; la prueba No.4 (Cuadro No. 40) reporta una relación manganeso-ferro 1:1; esta disolución del manganeso se debe al excedente de ácido presente, favoreciendo por tanto las impurezas en el licor, como son el calcio y el fierro, en el caso del calcio éste precipita al hacer la separación sólido-líquido, las especies asociadas a éste son la manganocalcita y el yeso, ambas especies son solubles en ácido. Debido a los inconvenientes se propuso utilizar menor cantidad de ácido (0.50 % del estequiométrico), donde la máxima disolución alcanzada fue del 78.78 %Mn en 30 minutos. Dada la naturaleza del mineral, se determina una fuerte demanda de disolución en términos de disolución ácida, se emplea  $H_2SO_4$  dadas las ventajas químicas y económicas del mismo.

La disolución de manganeso es menor cuando la muestra es sometida a calcinación, la máxima disolución alcanzada es de 15.45 %Mn, en muestra sin tratamiento se alcanza un 97.82 %Mn de disolución a 90 minutos; los factores que pudieron influir negativamente en la muestra tratada térmicamente son: condiciones para la formación de la torta o manejo de producto calcinado, este último favorece la reoxidación de especies. Puede ser ventajosa la aplicación de la calcinación antes de la lixiviación, no obstante costosa desde el punto de vista económico.

Una alternativa para evitar la interferencia del fierro y calcio, puede ser la cristalización fraccionada, esto a través del cambio de pH. Desde esta alternativa se puede proceder a desarrollar la precipitación o cristalización del manganeso de forma selectiva a la especies de interés.

La temperatura no es una variable que influya significativamente en la disolución del manganeso en este caso, debido a que el incremento de la temperatura no es proporcional a la disolución de los valores, sin embargo, en el caso del fierro al incrementar la temperatura el fierro se disuelve más. La variación de un gradiente de temperatura de 20 °C (pruebas No. 5 y No. 6), sólo favorecen en un 5 % la recuperación del manganeso una respecto de la otra, desde el punto de vista económico es desventajoso el realizar la prueba bajo esta condición.

Las pruebas realizadas variando el porcentaje de sólidos muestran un que a pulpas más espesas (50 %S) el porcentaje de disolución de Mn es menor de forma similar es el comportamiento del fierro, esto se debe a la poca movilidad y difusión del ácido a través de las partículas.

Al analizar la progresión de la disolución del manganeso respecto al tiempo (Pruebas No. 1, No. 8 y No. 9, respectivamente) las variaciones del manganeso en el licor no es mayor a 4% comparada entre las pruebas ya citadas, haciendo inadecuado la variación de la relación sólido-líquido.

Con base en otros estudios realizados para la lixiviación de otras especies, una alternativa de lixiviación es la a través de pasos (ciclos), analizando de forma preliminar la posibilidad de enriquecimiento continuo y sucesivo de manganeso por precolación sobre mineral triturado se tienen los siguientes resultados.

Existen tres variables por destacar que influyen en los resultados, estas son: el tiempo de retención en la columna, el número de etapas a utilizar (ciclos) y la granulometría del material.

El tiempo de retención en la columna fue de 24 horas entre cada etapa, debido a que este valor es constante no se puede discutir ampliamente su importancia. En contraparte está el número de etapas (ciclos) de lixiviación; del cual se puede concluir que a mayores ciclos se ve favorecido la disolución del manganeso, en el primer ciclo (24 horas) se tiene una recuperación de 9.62 %Mn al cuarto ciclo (96 horas) se alcanza una recuperación del 20.13 %Mn.

En el caso de la solución mediana, la recuperación al incrementar el número de ciclos es variado, esto podría ser debido a la tercera variable antes citada, el tamaño de partícula. A granulometría más gruesa la disolución aumenta de forma adversa a tamaños más finos, esto puede deberse a que exista la formación de una capa pasivante que evita la difusión del ácido a través de las partículas, en el caso de la solución rica no ocurre esto debido a que es material fresco.

Cabe destacar que el porcentaje de disolución de impurezas en el licor (calcio y fierro) no supera el 0.20 g/l de Fe y el 0.0267 g/l Ca.

## V. 5. ESTUDIO ECONOMICO

En la presente sección se hará un análisis del costo-beneficio de la concentración y generación de productos de un carácter comercial. Esta sección se involucra para complementar la información obtenida en la experimentación metalúrgica.

Normalmente la explotación de manganeso se lleva a cabo sobre aquellos minerales que por sus características y contenido permiten su directa aplicación industrial o son fácilmente concentrables. De estos últimos se obtienen normalmente altos contenidos de manganeso en colas y lamas mismos valores que no son recuperables por su íntima asociación con la matriz o por su alta ley de manganeso.

Los minerales de manganeso se evaluarán en el presente trabajo a dos grandes grupos, con carácter comercial y son:

- a) La industria siderúrgica, es la de mayor consumo en volumen por sus normas rígidas y los bajos precios hacen necesaria la explotación de minerales de alta ley o con beneficio muy económico. La explotación de minerales de baja ley es incoesteable.

Los spiegeleisen o spiegel es un hierro de primera fusión alto en manganeso que se emplea tanto en el convertidor Bessemer como en el proceso básico. Se produce en altos hornos o en hornos eléctricos. Los grados más importantes que se producen son:

Elementos	Análisis de Resultados		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Mn	16-19 %	19-21 %	26-28 %
C	6.5 % máximo	6.50 % máximo	6.50 % máximo
Si	3.0 % máximo	3.0 % máximo	1.0 % máximo

Con los datos citados anteriormente se encontró una fuente de aplicación con carácter comercial para minerales de baja ley, ahora se evaluará el costo del procesamiento para poder obtener las especificaciones de la materia prima par ferro-aleaciones citadas con anterioridad.

La base de cálculo para la evaluación económica es: masa del mineral 1 tonelada métrica seca, análisis químico de cabeza 15 %Mn y 4.75 %Si, bajo estas especificaciones de ley, el material no es apto para su aplicación directa en la industria por lo que se requieren operaciones unitarias de liberación y concentración de valores. Aplicando estas técnicas a la muestra se obtienen medios de concentración gravimétrica con leyes de 16.60 %Mn y 3.60 %SiO<sub>2</sub> (1.68 %Si), cumpliendo en ley los requerimientos descritos para el tipo A.

El costo de procesamiento del mineral y otros gastos generados por las actividades y operaciones se enlistan a continuación:

Operación	MN/ton
Trituración	11.68
Molienda	23.65
Concentración Gravimétrica	110.00
Otros*	44.02
<b>TOTAL</b>	<b>192.40</b>

\* Los conceptos considerados son: mano de obra, mantenimiento equipo eléctrico y mecánico, energía eléctrica, gastos varios de muestreo y administrativos.

Referente a las etapas y productos que se evaluarán para determinar los gastos se mencionan enseguida:

Productos	%Peso		%Mn	%Distribución	
	Rel/Abs			Relativo/Absoluto	
-14+100 Mallas	67.36/67.36		17.34	69.35/	69.35 % Mn
Medios (Mesa W)	26.04/17.54		16.60	24.94/	17.30 %Mn

Se tienen 1000 kg<sub>Mineral</sub> se producen 175.4 kg de medios a un tiempo de molienda de 1.5 min., la cantidad de manganeso generada en este producto de la concentración gravimétrica es de 29.1164 kg y el porcentaje de recuperación en la concentración gravimétrica es de 17.30 %Mn, por tanto, la cantidad de manganeso es de 5.0371 kg, teniendo un costo-beneficio de \$ 192.40 MN.

Considerando un producto para ferro-aleaciones de bajo grado de manganeso (16-19 %Mn) el costo en el mercado es de 47 c/lb (10.5689 \$/Kg), al considerar la cantidad de material obtenida se tiene que el producto en el mercado es de \$ 53.2369.

Al comparar los costos por procesar una tonelada de mineral (\$192 MN 40/100) respecto del costo del producto generado para su comercialización (\$53 MN 23/100) es incoesteable y no se pagan los gastos generados, haciendo inadecuada esta aplicación del material, sin embargo se propone otra alternativa del material para ser comercializado.

- b) Diferentes usos industriales. Las sales de manganeso se utiliza para la industria química, agricultura, ganadería, apicultura, pilas secas, etc. y manganeso electrolítico para aleaciones tanto ferrosas como no ferrosas, cuyos precios más altos garantizan la explotación económica de sus minerales de baja ley.

Aunque en la actualidad no hay estudios sobre la necesidad de manganeso en los suelos cultivables de México, se sabe que este elemento es esencial para una mayor eficiencia en los cultivos.

Una segunda alternativa de estudio económico de procesamiento del material es la lixiviación para obtener sulfato de manganeso monohidratado utilizable como fertilizante, para hacer la evaluación se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en la lixiviación a 0.80 %  $H_2SO_4$  (la cantidad de ácido usado es por cada 100 g mineral se necesitan 78.62 g de ácido).

Los costos derivados de la obtención de la sal se describen a continuación:

Operación	\$/ton
Trituración	11.68
Cristalización/ Filtración	50.00
Reactivos	432.00
Otros*	44.02
<b>TOTAL</b>	<b>537.68</b>

\* Se consideran los mismos conceptos citados anteriormente.

Existen fertilizantes en el mercado con gran aplicación en el cultivo de algunos vegetales, las especificaciones del producto en el mercado son: sulfato de manganeso monohidratado con 25 %Mn mínimo, el costo del mismo es de \$ 7 MN 70/100, en base a este dato se hace la evaluación para evaluar su costo-beneficio.

De 100 g<sub>Mineral</sub> se obtienen 13.40 g<sub>MnSO<sub>4</sub> 5H<sub>2</sub>O</sub>, por tanto de una tonelada se tienen 134 Kg de la sal, con esta cantidad se tiene que el porcentaje de disolución de lixiviación es de 86.39 %, por tanto se genera 81.17 Kg de sulfato de manganeso monohidratado, que al evaluar respecto al costo en el mercado nos genera \$ 625 MN 3/100.

En este caso el costo-beneficio es de \$ 537 MN 68/100, el costo del producto en el mercado es mayor que este, por tanto, se generan utilidades de \$ 87 MN 62/100 por tonelada procesada de mineral, es decir, por cada peso que se invierta se ganan 16 centavos de peso; siendo ésta una fuente de aprovechamiento de minerales de baja ley. Si en algún momento la cantidad de fierro

fuese una limitante se podría utilizar un filtro ayuda como la zeolita el cual permite retener partículas en suspensión, además de ser un material de bajo costo.

Los precios de los insumos de lixiviación fueron provistos en la misma fecha, todos los precios están en pesos mexicanos (MN), los derivados de la operación en la producción se obtuvieron de operaciones minero-metalúrgicas reales y el costo de los productos se obtuvieron a través cotizaciones con los proveedores del servicio que comercializan este tipo de productos.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los costos de operación para el procesamiento de mineral empleado en la industria metalúrgica e industria química (fertilizante).

<b>Industria Siderurgica (ferro-aleación)</b>	<b>Industria Química (fertilizante)</b>
Costo de operaciones 192.40 pesos/ton	Costo de operaciones 537.68 pesos/ton
Mn producido 5.037 kg	Mn producido 81.17 kg
Precio del Mn (mercado) 10.5689 pesos/kg	Precio del Mn (mercado) 7.70 pesos/kg
Costo del producto generado 53.24 pesos	Costo del producto generado 625.30 pesos

## **VI. CONCLUSIONES**

La muestra estudiada presenta una cantidad indeterminada de Manganocalcita-Rodocrosita, que influye significativamente en los procesos estudiados. Un aspecto por destacar es que se requiere una investigación específica para diferenciar las especies carbonatadas de manganeso.

Debido a la naturaleza de la diseminación y a la complejidad de la asociación mineralógica la muestra no responde a la concentración convencional, en procesos de separación gravimétrica y magnética de alta intensidad, en ninguna de las pruebas realizadas se alcanzó una relación manganeso-ferro de 7:1.

Para los minerales cuyas características y contenidos de manganeso no satisfacen los requisitos para su aplicación directa o beneficio, la lixiviación es una alternativa de trabajo con la limitante del contenido del carbonato de calcio y de la especie de ferro quienes reportan un alto consumo de ácido, en este trabajo se obtuvo una relación de 25:1 (Mn:Fe) en el mejor de los casos, sin embargo, tiene aplicaciones como fertilizantes con una ganancia de 16 centavos por cada peso invertido.

Finalmente,

- 1) El principal problema a destacar es la necesidad de la caracterización mineralógica para determinar las especies, entre carbonatos de manganeso y subsecuentemente la asociación con las especies de hierro.
- 2) Es posible conseguir altas relaciones Mn:Fe a expensas de tener bajos porcentajes de recuperación de manganeso.
- 3) Las mejores alternativas para trabajar muestras con estrecha relación mangenoso-hierro es por vía hidrometalúrgica, con tiempo de lixiviación de 90 minutos se alcanza más de un 80 % de disolución de valores.
- 4) Con la información obtenida en el presente trabajo se puede diseñar un proceso que se combinaría para poder obtener leyes y recuperaciones con carácter comercial.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- A) Manríquez, O.V.M. 1995. **“Problemática de la optimización en la concentración integral de minerales de MnO<sub>2</sub>, grado batería y su posible efecto sobre el rendimiento en pilas secas comerciales fabricadas a base de estos”**. Tesis, Facultad de Química UNAM. México, pp. 10-35.
- B) Espinosa, J.M. 1986. **“Minerales y rocas”**. Edit. SEP- UNAM. México, pp. 20-31.
- C) 1995. **“Anuario estadístico de la minería mexicana”**. Edit. SECOFI. México, pp. 20-35.
- D) Lincoln, R.W., Robert, R.G. 1967. **“Encyclopedia of minerals”**. Edit. Van Nostrand Reinhold Company. New York.
- E) Zúñiga, M.F. 1967. **“Manganeso”**. Edit. Comisión de Fomento Minero. México, pp. 15-30.
- F) 1974. **“Selected power diffraction data of minerals”**. Edit. Joint Committee on powder diffraction standards, First edition. USA, pp. 25, 36, 48, 56.
- G) Espinosa, L.L. 1975. **“Tratamiento de minerales mangano- argentíferos”**. Edit. Comisión de Fomento Minero. México.
- H) Pande, A.M., Gupta, K.N. y Altekar, V.A. 1982. **“Single cell extraction of zinc and manganese ores”**. Vol. 9 Hydrometallurgy. USA, pp. 57-68.
- I) Mingliang, Y., Xianging M. et al. 1995. **“Studies on the leaching kinetics of manganese carbonate ore at room temperature”**. Vol. 2 Proceedings of the XIX IMPC. Edit. SME. San Francisco CA, pp. 203-206.

**ANEXOS**

Manganocalcita (Ca,Mn)CO <sub>3</sub>			Pirrolita MnO <sub>2</sub>			Rodocrosita MnCO <sub>3</sub>			Quarzo SiO <sub>2</sub>		
d, °A		I/I1	d, °A		I/I1	d, °A		I/I1	d, °A		I/I1
Teórico	Experimental		Teórico	Experimental		Teórico	Experimental		Teórico	Experimental	
3.01	3.00	100	3.14	3.13	100	3.66	3.68	35	1.25	1.26	4
2.47	2.45	30	2.13	2.12	25	2.84	2.83	100	3.34	3.34	100
2.26	2.23	50	—	—	—	1.77	1.77	30	2.28	2.28	12
2.07	2.08	40	—	—	—	—	—	—	2.12	2.12	9
1.85	1.85	80	—	—	—	—	—	—	1.81	1.81	17
1.59	1.56	40	—	—	—	—	—	—	1.67	1.67	7
—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.54	1.54	15

Mountmorillonita Ca <sub>0.24</sub> Na <sub>0.01</sub> Mg <sub>0.36</sub> Fe <sub>0.02</sub> Al <sub>1.75</sub> Si <sub>3.87</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·1.078H <sub>2</sub> O			Pirita FeS <sub>2</sub>			Yeso CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O		
d, °A		I/I1	d, °A		I/I1	d, °A		I/I1
Teórico	Experimental		Teórico	Experimental		Teórico	Experimental	
15.00	14.73	100	3.12	3.13	36	7.56	7.69	100
1.50	1.50	50	2.7	2.7	84	2.86	2.87	27
—	—	—	2.42	2.43	66	—	—	—
—	—	—	2.21	2.21	52	—	—	—
—	—	—	1.63	1.63	100	—	—	—

Psilomelano (Ba,H <sub>2</sub> O) <sub>2</sub> Mn <sub>5</sub> O <sub>10</sub>			Caolinita Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>			Calcita CaCO <sub>3</sub>		
d, °A		I/I1	d, °A		I/I1	d, °A		I/I1
Teórico	Experimental		Teórico	Experimental		Teórico	Experimental	
2.88	2.87	40	7.17	7.13	100	3.86	3.86	12
2.18	2.19	85	3.58	3.56	80	3.03	3.03	100
—	—	—	—	—	—	2.49	2.49	3
—	—	—	—	—	—	2.28	2.28	14
—	—	—	—	—	—	2.09	2.09	18
—	—	—	—	—	—	1.92	1.92	5
—	—	—	—	—	—	1.91	1.91	17
—	—	—	—	—	—	1.87	1.88	17
—	—	—	—	—	—	1.60	1.60	8



