



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO DE BIOOXIDACIÓN DE UN CONCENTRADO DE
MAGNETITA
CON BACTERIAS MESÓFILAS PARA LA
ELIMINACIÓN DE SULFUROS.**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:

MARÍA DOLORES GERÓNIMO SANTIAGO



CIUDAD DE MÉXICO

2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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: ANTONIO HUERTA CERDÁN

VOCAL: ROSA ELVA RIVERA SANTILLÁN

SECRETARIO: JUAN MANUEL DE LA ROSA CANALES

1ER. SUPLENTE:

2° SUPLENTE: MARIO EDUARDO CRUZ SÁNCHEZ

SITIO DÓNDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE QUÍMICA. DEPARTAMENTO DE

INGENIERÍA METALÚRGICA. LABORATORIO 212

DE METALURGIA EXTRACTIVA. EDIFICIO D.

**ASESOR DEL
TEMA:**

Dra. Rosa Elva Rivera Santillán

SUSTENTANTE:

María Dolores Gerónimo Santiago

**SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTA OBRA,
CON FINES ACADÉMICOS, POR CUALQUIER FORMA, MEDIO O
PROCEDIMIENTO, SIEMPRE Y CUÁNDO SE INCLUYA LA CITA
BIBLIOGRÁFICA DEL DOCUMENTO Y EL DIRECTOR DE TESIS.**



AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE

RESUMEN	9
OBJETIVOS	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. GENERALIDADES	13
2.1 HIERRO.....	13
2.1.1 MINERALES DE HIERRO.....	16
2.1.2 APLICACIONES DEL HIERRO.....	18
2.2 PRODUCCIÓN DE HIERRO.....	19
2.2.1 PRINCIPALES PRODUCTORES DE HIERRO.....	21
2.2.2 PRODUCCIÓN NACIONAL.....	25
2.3 MAGNETITA.....	27
2.3.1 CARACTERÍSTICAS... ..	28
2.3.2 APLICACIONES.....	29
2.4 AZUFRE.....	30
2.4.1 ELIMINACIÓN DEL AZUFRE.....	31



2.5 BIOMINERÍA.....	32
2.5.1 BIOLIXIVIACIÓN.....	33
2.5.2 BIOOXIDACIÓN.....	34
2.5.3 MICROORGANISMOS OXIDANTES.....	35
2.5.3.1 CLASIFICACIÓN.....	39
2.5.3.2 PERIODOS DE CRECIMIENTO.....	40
2.5.3.3 <i>ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS</i> Y <i>ACIDITHIOBACILLUS THIOOXIDANS</i>	41
2.6 MECANISMOS DE BIOOXIDACIÓN.....	44
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	46
3.1.1 REACTIVOS, MATERIAL Y EQUIPOS.....	47
3.1.2 METODOLOGÍA.....	48
3.1.3 DIAGRAMA DE FLUJO.....	52
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CONCENTRADO DE MAGNETITA.....	53



4.1.1 ANÁLISIS MORFOLÓGICO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	53
4.1.2 FLUORESCENCIA DE RAYOS X (FRX).....	54
4.1.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	55
4.2 ESTUDIO DE BIOOXIDACIÓN DEL CONCENTRADO DE MAGNETITA.....	56
4.2.1 PARÁMETROS DE BIOOXIDACIÓN.....	56
4.2.1.1 CRECIMIENTO BACTERIAL (Bacterias/ml).....	56
4.2.1.2 pH.....	60
4.2.1.3 POTENCIAL OXIDO-REDUCCION.....	62
4.2.1.4 CONDUCTIVIDAD K (μ S).....	66
4.2.1.5 DISOLUCIÓN DE HIERRO	68
4.2.1.5.1 % Fe^{2+} EN SOLUCIÓN.....	69
4.2.1.5.2 % Fe^{3+} EN SOLUCIÓN	69
4.2.1.5.3 % Fe TOTAL EN SOLUCIÓN	70
4.3. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO DE MAGNETITA.....	73
4.3.1 ANÁLISIS MORFOLÓGICO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	73



5. CONCLUSIONES.....74

6. BIBLIOGRAFÍA.....76



RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el estudio de la biooxidación de una muestra de concentrado de magnetita (Fe_3O_4), con microorganismos mesófilos a fin de evaluar la aplicación de esta técnica como un método de eliminación de sulfuros. Se presentan los resultados de la caracterización del concentrado de Magnetita de la Cía. Minera Peña Colorada por el estudio de fluorescencia (FRX), difracción de rayos X (DRX) y observación morfológica al microscopio electrónico de barrido (MEB). Se obtuvieron cepas de bacterias nativas de una muestra de mineral de magnetita. Se activaron y se adaptaron al mineral bacterias mesófilas que se tienen disponibles en el laboratorio de metalurgia extractiva (212), edificio D, Facultad de Química. Se realizaron estudios de biooxidación de los sulfuros presentes en una muestra de concentrado de magnetita para evaluar la viabilidad de la técnica. Se midieron parámetros fisicoquímicos, potencial (oxido-reducción), pH, en los matraces que se tenían como estudio, el crecimiento de las bacterias se midió periódicamente, así como el % disolución de Fe total, % de disolución de Fe^{2+} , % de disolución de Fe^{3+} . Al término de la experimentación de la biooxidación del concentrado de magnetita los residuos se analizaron por microscopía electrónica de barrido (MEB), con el propósito de observar la interacción de las bacterias con la muestra en la eliminación del azufre. Los resultados obtenidos de la biooxidación muestran que los sistemas con mayor población bacteriana presentan una mayor disolución de Fe. Aunque las bacterias *Acidithiobacillus Ferrooxidans* se adaptan con mayor rapidez al sistema, en comparación a las *Acidithiobacillus Thiooxidans*, la disolución con ambas bacterias es relativamente muy baja, con lo que la técnica resulta viable para eliminar los sulfuros presentes como impurezas en el concentrado de magnetita.



OBJETIVOS

Objetivo general:

- Estudiar la biooxidación de magnetita (Fe_3O_4) con microorganismos mesófilos, a fin de evaluar la aplicación de esta técnica como un método alternativo de eliminación de sulfuros.

Objetivos particulares:

- Obtener cepas de bacterias autóctonas.
- Reactivar cepas de bacterias mesófilas disponibles en el laboratorio.
- Adaptar al concentrado de magnetita (Fe_3O_4), los microorganismos autóctonos y los re-activados.
- Realizar pruebas de biooxidación para evaluar la viabilidad de la técnica como método de eliminación de sulfuros de un concentrado de magnetita (Fe_3O_4).



1. INTRODUCCION

El hierro es la principal materia prima para la fabricación de acero. La industria minera mundial extrae hierro a partir de minerales de hematita y magnetita. La hematita es un mineral con alto contenido en hierro que lo hace una opción ideal para la extracción. En contraste, la magnetita tiende a contener niveles bajos de hierro siendo necesario concentrar mineral para aumentar su contenido, complicando el proceso de extracción. El mineral hematita contiene entre el 58% y el 65% de hierro. La magnetita natural contiene entre 20% y 30% de hierro. La extracción de hierro requiere de tratamientos adecuados para su liberación y eliminación de impurezas las cuales muchas veces son acarreadas hasta la última etapa de procesamiento del mineral.

El mineral de hierro (magnetita Fe_3O_4) viene asociado a contaminantes, como el azufre, elemento que durante la fusión agrieta el pellet afectando su calidad, por la presión interna al desalojarse como SO_2 , el cual es emitido hacia la atmósfera siendo un contaminante ambiental. Otro problema es la presencia sílice la cual genera porosidad. Varios investigadores han estudiado la eliminación de sulfuros, mediante un proceso de flotación con xantatos, sin embargo, estos compuestos son considerados tóxicos al medio ambiente.

Ante esta situación, en las últimas décadas se ha propuesto una alternativa que ha dado buenos resultados en el tratamiento de minerales de baja ley, logrando la liberación del metal de interés y eliminando contaminantes como el azufre. Esta técnica conocida como biolixiviación, es un proceso de oxidación bioquímica catalizada o asistida por microorganismos. La aplicación de bacterias que oxidan a diferentes especies minerales, es una vía para la recuperación de metales a partir de sus minerales, amigable con el medio ambiente, ya que es un proceso natural, no contaminante.



En el presente trabajo se propone aplicar la técnica de biooxidación como un pretratamiento buscando eliminar los sulfuros metálicos contenidos como impurezas en el concentrado de magnetita, previo a la peletización de éste, con el fin de promover la implementación de las técnicas biológicas en la industria minera, técnicas de bajo costo, de alta eficiencia, fácil control, amigables con el medio ambiente y autosustentable.

2. GENERALIDADES

2.1. HIERRO

El hierro constituye cerca del 6% en peso de la corteza terrestre. Es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad (figura 1)[1]. Aunque muy raramente se encuentra libre en la naturaleza, la facilidad con que sus óxidos son reducidos por el carbón y la abundancia de los mismos en la superficie terrestre, hicieron posible su descubrimiento y aplicación a la fabricación de utensilios y armas [2].

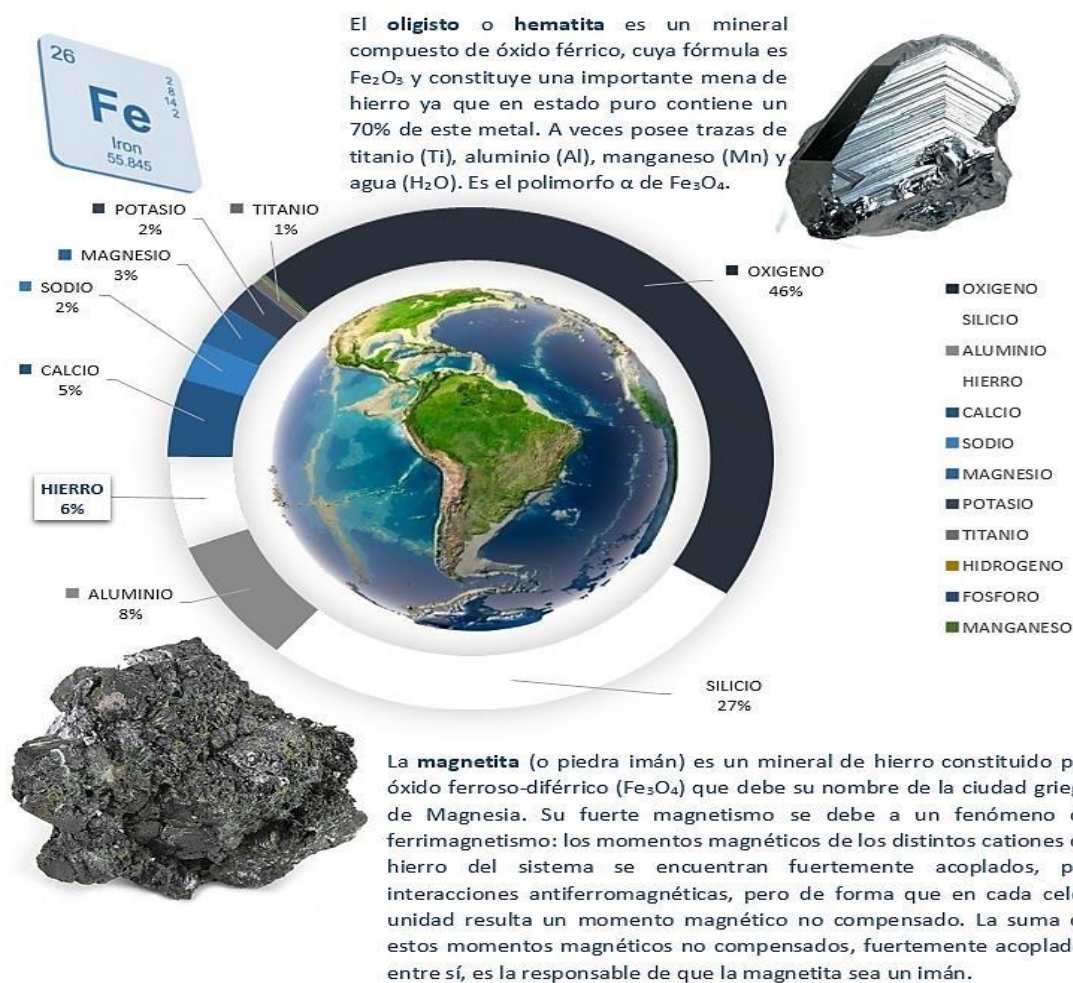


Figura 1 % De hierro en la corteza terrestre y los minerales de los que se obtiene.

El hierro cristaliza en el sistema cúbico. Por debajo de los 910 °C, la celdilla elemental es cúbica intracentrada. Hasta los 768 °C tiene propiedades magnéticas (hierro α) a esta temperatura desaparecen las propiedades magnéticas (hierro β) y la arista de la celdilla elemental aumenta ligeramente de 2,86 a 2,90 Ångstrom. A 910 °C se produce la transformación a hierro γ en el cual la celdilla es cúbica de caras centradas. A partir de los 1401°C es cúbica intracentrada (hierro δ estructura que se mantiene hasta los 1530 °C, temperatura a la que el hierro funde. Por lo tanto, en sentido estricto, el hierro tiene sólo dos formas alotrópicas la α , estable hasta los 910°C y la γ que es estable únicamente en el rango de temperatura de 1401°C hasta 1530 °C. Sin embargo, los cambios de estado son relativamente lentos, especialmente a medida que disminuye la temperatura del metal, y es bastante frecuente encontrar ambas formas fuera de sus límites de temperatura . Las propiedades del hierro se enlistan en la tabla 1 [3].

Se puede obtener hierro de elevada pureza electrolizando soluciones de sus sales (cloruros, sulfatos, etc.). En este proceso se utiliza chatarra de hierro como ánodo. El hierro puro, así obtenido, es muy frágil. Sin embargo, sometido al proceso de recocido se vuelve dúctil, adquiriendo buenas propiedades eléctricas y magnéticas. Pero, en la industria no se utiliza el hierro puro sino aleado con otros elementos entre los cuales el más importante es el carbono [4].

Tabla 1. Propiedades físicas del hierro.

SÍMBOLO	Fe
MASA ATÓMICA PROMEDIO (U.M.A.)	55,847
MASAS ISOTÓPICAS (U.M.A.) Y ABUNDANCIA RELATIVA	
⁵⁴ Fe	53,939612. (5,82 %)
⁵⁶ Fe	55,934939. (91,18 %)
⁵⁷ Fe	56,935396. (2,1 %)
⁵⁸ Fe	57,933277. (0,28 %)
DENSIDAD A 20 °C (g. cm ⁻³)	7,869
PUNTO DE FUSIÓN (°K)	1.809
PUNTO DE EBULLICIÓN (°K)	3.273
CALOR ESPECÍFICO 0 – 100 °C (cal g ⁻¹ °C ⁻¹)	0,111
CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR A PRESIÓN CONSTANTE ENTRE 298 Y 1809 °K EN J. °K ⁻¹ mol ⁻¹	23,97449 + 8,67750t + 0,000277t ² - 0,000086t ³ - 0,000005/t ² (t =K/1000)
CAPACIDAD CALORÍFICA MOLAR DEL LÍQUIDO A PRESIÓN CONSTANTE ENTRE 1.809 Y 3.133 °K EN J. °K ⁻¹ mol ⁻¹	46,02400 - 1,884667×10 ⁻⁸ t + 6,094750×10 ⁻⁹ t ² - 6,640301×10 ⁻¹⁰ t ³ - 8,246121×10 ⁻⁹ /t ² (t =K/1.000)
CALOR MOLAR DE FUSIÓN (A 1.809 °K Y 1 bar)	12,40 kJ.mol ⁻¹
CONDUCTIBILIDAD TÉRMICA A 18 °C (cal.cm ⁻¹ . °C ⁻¹ .s ⁻¹)	0,16
COEFICIENTE DE DILATACIÓN LINEAL (°C ⁻¹)	1,3 x 10 ⁻⁵
MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (kg. mm ⁻²)	21.070
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (kg. Mm ⁻²)	22,0
ALARGAMIENTO A ROTURA (L = 5D)	50,0 %
DUREZA BRINELL (H _d)	60



2.1 MINERALES DE HIERRO

El hierro se encuentra en numerosos minerales y mineraloides, en la figura 2 se observan, hematita (Fe_2O_3) figura (a), limonita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) figura (b), magnetita (Fe_3O_4) figura (c) y siderita (FeCO_3) figura (d), etc. Si bien hay una diversidad de minerales de hierro distribuidos sobre la corteza terrestre (óxidos, carbonatos, sulfuros, sulfatos, silicatos, etc.) [5] son pocos los minerales usados comercialmente como fuente de hierro. La razón estriba en la cantidad de metal, o ley, que el mineral contenga. Para ser utilizados en la industria siderúrgica estos materiales deben contener al menos un 40% de hierro.

Las impurezas (ganga), que siempre acompañan a los minerales, disminuyen el porcentaje de hierro en los mismos. La magnetita contiene, teóricamente 72,3% de hierro, la hematita 69,9%

En cambio, el contenido teórico de hierro en la piritita es de apenas 46,6%. Los porcentajes reales disminuyen debido a la ganga.

Otro factor que puede condicionar el uso de un mineral de hierro como materia prima para la obtención de acero, es la presencia de ciertos elementos que puedan dificultar el proceso o que le transfieran al producto características indeseadas.

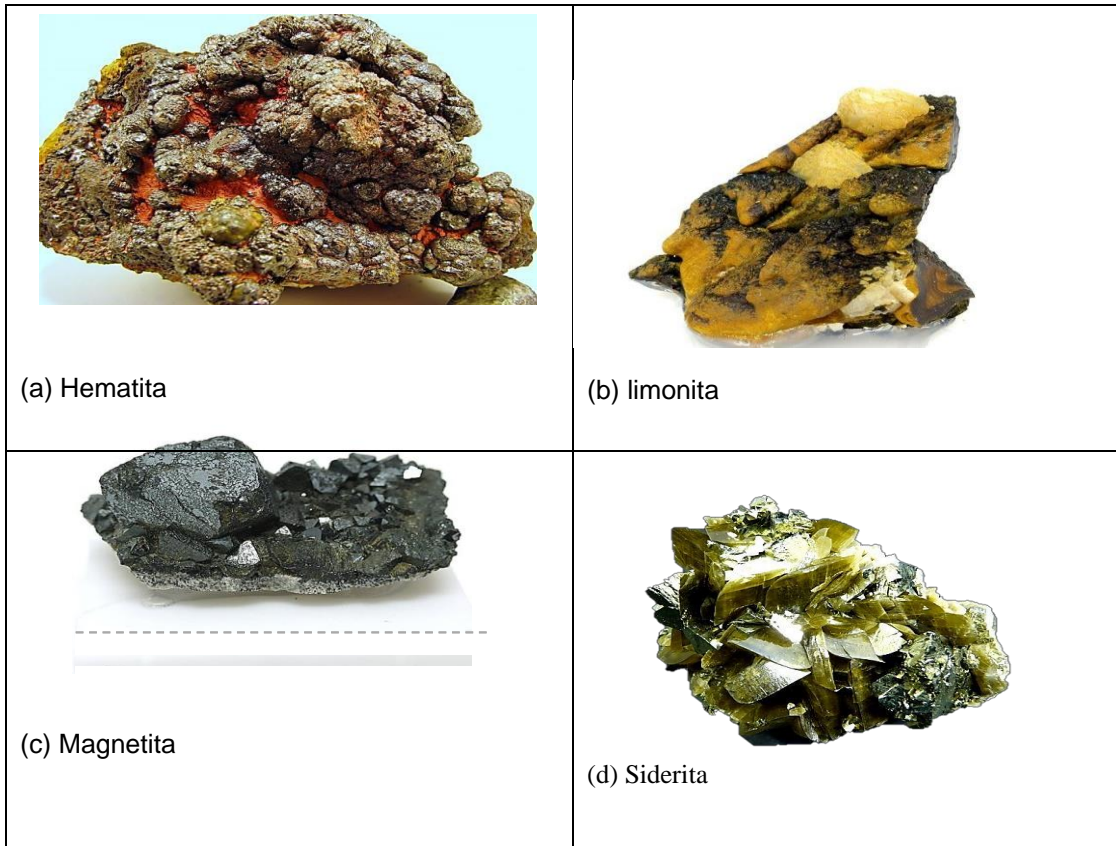


Figura 2. Principales minerales de hierro.

Estos óxidos son a nivel industrial y tecnológico los minerales con más aplicación para la obtención de hierro. Aunque los depósitos de hematita y magnetita son los más importantes, sólo difieren en el estado de valencia del Fe y su estructura cristalina, y en que la siderita contiene carbonato [6]. En el caso de la magnetita se aprovechan las propiedades magnéticas para concentrar el mineral por medios físicos, en el caso de la hematita se utilizan la adición de reactivos químicos que reaccionan selectivamente en la superficie del mineral y forman compuestos hidrofóbicos que flotan [7].



2.1.2 APLICACIONES DEL HIERRO

El hierro tiene su mayor aplicación en la industria siderúrgica, utilizado como elemento matriz para combinarse con otros elementos metálicos y no metálicos, dependiendo de su aplicación. Se considera que una aleación de hierro es acero cuando se tiene un 2% de carbono, si es mayor se considera fundición.

En general, entre los principales usos del hierro destacan:

- Hierro fundido: hierro parcialmente refinado que contiene hasta un 5% de carbón. El hierro fundido es de alta dureza aunque quebradizo, siendo ideal para piezas moldeadas como los bloques de motores de automóviles.
- Hierro forjado: hierro casi puro combinado con un material similar al vidrio. El hierro forjado es más suave que el hierro fundido y no se oxida. Se utiliza en muebles de exterior, enrejados y otros elementos decorativos.
- Aceros: Es la forma de utilización más común del hierro. Contiene cerca del 1% de carbón y presenta gran cantidad de usos, entre los que destaca los aceros para construcción de estructuras.
- Aceros inoxidables: contiene cromo, lo cual lo vuelve muy resistente a oxidarse
El acero inoxidable es ideal para piezas de vehículos, equipamientos hospitalarios y utensilios de cocina



El acero en la actualidad es la base de la sociedad por sus aplicaciones, su consumo está en aumento debido a su alta demanda.

El hierro se emplea en pigmentos, cementos, refractarios básicos, en la fundición de los metales no ferrosos y como un constituyente en algunos agentes catalíticos, se combina con los elementos no metálicos para mejorar sus propiedades como el cloro, halógeno, azufre, fósforo, boro, carbono y silicio.

2.2 PRODUCCIÓN DE HIERRO

El 31 de diciembre de 2013 el precio del hierro, con un estándar de 62% de contenido de fierro, se cotizó en el mercado chino en 133,3 US\$ por tonelada, valor que descendió a 69,9 US\$ por tonelada el 15 de diciembre del año 2014, es decir una caída de 47,6%, siendo éste el registro más bajo desde abril de 2009, cuando la crisis mundial estaba en pleno desarrollo.

Esta situación es debida, por una parte a un importante aumento en la oferta de los principales productores de mineral de hierro: Vale, BHP, FMG y Rio Tinto, que en los primeros nueve meses del presente año expandieron su producción en 13,5% y por otra parte, una debilitada demanda china, medida a través de la producción de PIG Iron, mercado que representa alrededor del 60% del consumo mundial de hierro y que ha retrocedido en un 0,3%.



En el transcurso del presente año los principales productores de mineral de hierro han aumentado su producción presionando a la baja el precio, constituyéndose en una estrategia para ganar posicionamiento de mercado, induciendo a los productores menos eficientes a salir del mercado. Esto implica que el precio del hierro permanecerá en torno al nivel actual por un periodo prolongado.



2.2.1 PRINCIPALES PRODUCTORES DE HIERRO

De acuerdo a World Steel Association la producción de mineral de hierro se sitúa en torno a 2.000 millones de toneladas anuales y presenta un alto grado de concentración a nivel de países productores. Durante el 2013 cuatro países acumulan más del 70% de la producción global (figura 3): Australia 31,6%, Brasil 18,9%, China 14%¹ e India 7%.

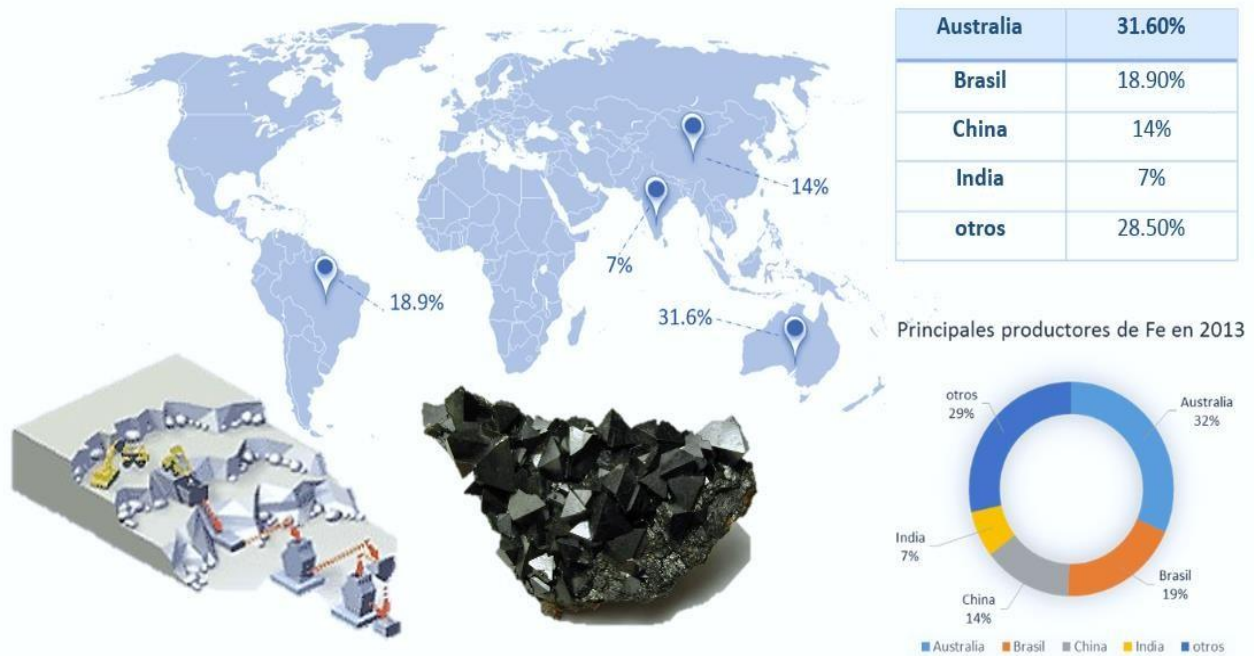


Figura 3. Principales productores de Fe en 2013.[9]

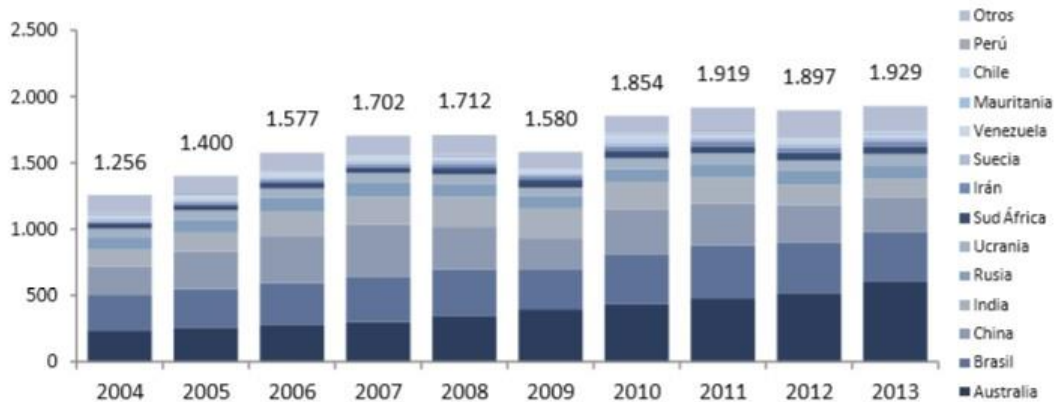
En términos agregados entre los años 2004 y 2013 la producción mundial creció a una tasa promedio anual de 4,4%. Sin embargo, Australia elevó su producción a razón de 10% anual, lo que le permite actualmente liderar en la producción global.

La figura 4 destaca evolución de la producción mundial de mineral de hierro entre los años 2004 y 2013. En dicho periodo la producción aumentó 673 millones de toneladas, equivalente a un promedio anualizado de 4,4%.

¹ Del informe de World Steel Association, el 80% de la producción de hierro de China tiene una baja concentración de hierro. Por ello, en las estadísticas mundiales se considera aquella fracción, del orden de 20%, que tiene una calidad homologable con la del resto del mundo. Sobre la base de dicha consideración China ocupó el tercer lugar en la producción mundial de hierro de 2013.



En figura 4 Se aprecia que entre el 2010 y 2013 la producción mundial hierro permaneció relativamente estancada, registrando un aumento anualizado de sólo un 1%. Periodo en el cual se produce una caída en la producción de India (-10,2%), China (-5,9%) y Brasil (-0,5%) [10].



Fuente: En base a World Steel Association

Figura 4. Evolución de la producción de mineral de hierro 2004-2013 (Millones de toneladas).

En tanto, Australia mantuvo un elevado ritmo de expansión de 8,9%, lo que le ha permitido escalar al primer lugar en la producción de hierro de alta calidad.

La Tabla 2 resume la información de las 10 principales operaciones productoras de hierro a nivel mundial, las que en conjunto representaron el 45% de la producción global en 2013.

Entre éstas, seis operaciones mineras se desarrollan en Australia, tres en Brasil y una en China. A nivel de compañías sobresale Vale de origen brasileño con tres operaciones mineras, le sigue BHP con dos operaciones en Australia.



Tabla 2. Las 10 principales operaciones productoras de hierro a nivel mundial [10]

Año 2013 (millones de toneladas).

País	Nombre de la Planta	Compañía	Producción
China	Others, Iron ore, China	World, dummy	191
Australia	Hamersley Iron Ore Mines	Hamersley Iron Pty Ltd	133
Brazil	Vale Northern System (Carajas) Iron Ore Mines	Vale Iron	105
Australia	Chichester Range Iron Ore Mines	Fortescue Metals Group Ltd	95
Australia	Yandi Iron Ore Mine	BHP Western Australian Iron Ore Mines	77
Australia	Mount Newman Iron Ore Mines	Mount Newman Mining Co Pty Ltd	68
Australia	Robe River Iron Mines	Robe River Iron Associates	62
Australia	Area C Iron Ore Mine	BHP Western Australian Iron Ore Mines	55
Brazil	Minas Centrais Iron Ore Complex	Vale SA	38
Brazil	Mariana Iron Ore Complex	Vale SA	38
Producción de hierro de las 10 principales compañías a nivel mundial			862

Fuente: Reuters

Durante el 2013 cinco productores representaron más del 45% de la producción mundial de mineral de hierro: Vale (16,1%), BHP (11,2%), Rio Tinto (10,6%), FMG (4,9%) y Anglo American (2,2%), siendo precisamente este grupo de compañías las que durante el presente año registraron alzas significativas de producción [11].

Sobre la base de los reportes de producción de dichas compañías, al tercer trimestre de 2014 se verificó un alza conjunta de 13,5%, lo que sumado a la expansión de 7,2% de la producción de China, el principal consumidor mundial, configuró un escenario de superávit de oferta de mineral de hierro que actualmente está presionando el precio a la baja.

En el 2014 el crecimiento de la oferta de mineral de hierro superó a la de otros minerales metálicos. La oferta de hierro se expandió 9,5% el año pasado, la mayor alza desde el 2010 (17,4%), estimaciones del informe de World Steel Association, la oferta de mineral de hierro para el presente año se situaría en 2.112 millones de toneladas [12].



La Figura 5 destaca el crecimiento en la oferta de seis diferentes minerales metálicos en 2014.



Fuente: Macquarie Research, Commodities, septiembre de 2014.

Figura 5. Crecimiento en la oferta de seis diferentes minerales metálicos en el 2014 [12].

A pesar de la desaceleración por la que atraviesa la economía china, el dinamismo en las importaciones de mineral de hierro se ha mantenido en el presente año, ello sustentado por una demanda de acero inducida por los programas gubernamentales de construcción de infraestructura, focalizados principalmente en inversiones ferroviarias, puertos, aeropuertos y sector energía y por otra parte, en el fuerte impulso exportador de acero hacia mercados desarrollados [12].

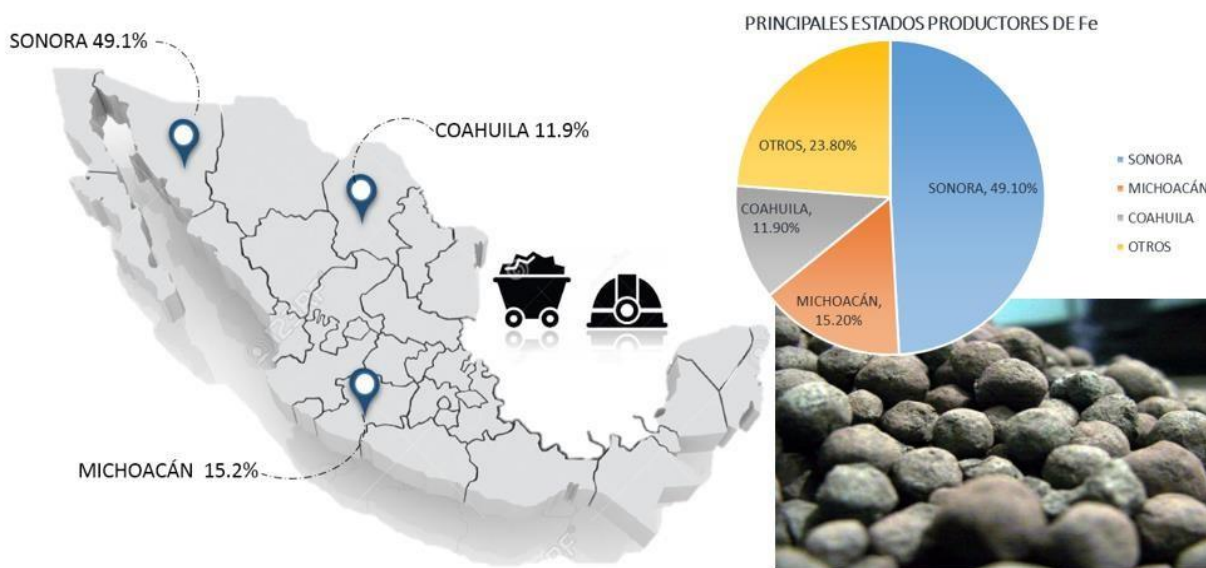


Figura 6. Principales estados productores de Fe en la república mexicana 2012.

2.2.2. PRODUCCIÓN NACIONAL

México no puede considerarse como un país rico en minerales ferríferos, sus reservas son modestas comparadas con las de países ricos en estos minerales.

En el 2012, las cifras indican que la producción nacional de hierro fue de 22.9 millones de toneladas (Figura 6), 11.6% superior al 2011. Principales estados productores: Sonora, 49.1%; Michoacán, 15.2%; Coahuila 11.9% y otros, 23.8%

En México, las principales minas de hierro corresponden a magnetita y hematita. Las reservas de Fe por estado son: Oaxaca con el (49.3%), Coahuila con el (22.9%) y Michoacán con el (9.03%) reúnen el 81.2% del total nacional de reservas. La tabla 3 muestra las reservas de Fe por estado [13].



Tabla 3. Reservas de Fe en México [13].

ESTADO	RESERVAS (MILES DE TONELADAS)				LEY PROMEDIO FE %
	POSITIVAS	PROBABLES	POSIBLES	TOTAL	
BAJA CALIFORNIA	18,077	9,449	11,660	39,186	58.40
SONORA	12,995	700	17,532	31,227	54.16
SINALOA	5	821	160	986	35.00
JALISCO	24,761	599	57,009	82,369	52.60
COLIMA	68,782	56,695	55,608	181,084	53.94
MICHOACÁN	116,545	57,907	45,255	219,707	55.33
GUERRERO	16,236	34,951	6,131	57,318	58.40
OAXACA	211,749	7,810	979,468	1,199,027	54.16
CHIAPAS	2			2	35.00
CHIHUAHUA	14,245			14,245	52.30
COAHUILA	239,953	17,756	300,000	557,709	56.76
DURANGO			495,000	495	38.63
NUEVO LEON		1,000	6,600	7,600	56.96
TAMAULIPAS		120		120	64.83
ZACATECAS	1,055	4,949	2,633	8,637	53.85
PUEBLA		2,097	5,935	8,032	49.50
HIDALGO	123	51	68	242	50.02
VERACRUZ	8,040	8,398	8,490	24,928	38.33

Fuente: Panorama actual de los yacimientos ferríferos de México, 2006, SGM



2.1.3 MAGNETITA

La magnetita fue el primer material magnético que el hombre observó en la naturaleza y el primero que utilizó tecnológicamente al introducir con su uso mejoras cruciales en los sistemas de orientación para la navegación (en particular, con el desarrollo de la brújula). Es uno de los óxidos de hierro más abundantes en la naturaleza, y se encuentra naturalmente en muy diversos ambientes, razón por la cual presenta intereses especiales en diferentes campos.

Un apasionante tema entre biólogos y naturalistas ha sido el de los métodos de orientación de especies como aves, abejas, tortugas y peces durante sus procesos migratorios. Muchas clases de células y especies animales pueden sintetizar sus propios cristales de magnetita, y se cree que éstos hacen parte de mecanismos especiales de magneto-recepción que emplean para orientarse y navegar. En efecto, una de las brújulas más pequeñas conocidas tiene lugar en las llamadas bacterias magneto tácticas, que contienen del orden de medio centenar de nano partículas de magnetita, con diámetros de entre 20 y 150 nanómetros, que forman estructuras magnéticas de entre 1 y 3 micrómetros de largo. Estas estructuras se encuentran alineadas en el interior de las células por medio de la acción de una proteína. Es el caso por ejemplo de la *Magnetospirillum magnetotacticum*

(figura 7). Son amplios los estudios en este campo y múltiples los reportes de identificación de magnetita en los órganos de diversas especies.[8]

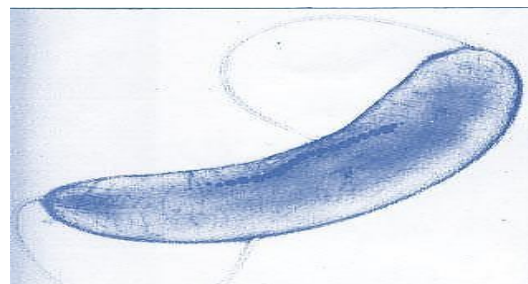


Figura7. Bacteria *Magnetospirillum magnetotacticum*, mostrando su cadena de cristales en esta imagen realizada con Microscopio electrónico de transmisión[15]



2.1.3.1 CARACTERÍSTICAS

Dentro de los múltiples materiales con propiedades magnéticas de alta relevancia se encuentra la magnetita, un material ferrimagnético de valencia mixta de la familia de las espinelas cuya fórmula molecular es Fe_3O_4 . La magnetita cuenta con estructuras cristalina y magnética complejas que le dan propiedades muy interesantes.

La magnetita presenta una densidad de $5,18 \text{ g/cm}^3$, cristaliza en el grupo espacial $\text{Fd}3\text{m}$ y su celda unidad en el sistema cúbico, con parámetro de red $a = 0,8395 \text{ nm}$, está compuesta por 8 fórmulas moleculares para un total de 56 iones: 32 oxígenos y 24 hierros. En la estructura los dos diferentes sitios cristalinos (que resultan tener geometría de tetraedros y octaedros en relación con los átomos de oxígeno) forman la base para dos subredes cúbicas inter-penetradas con contribuciones de momento magnético desiguales y anti-paralelas.

Este aspecto da lugar al comportamiento ferrimagnético del compuesto a baja temperatura ($T < 859 \text{ K}$). A temperaturas por encima de $T_V \sim 120 \text{ K}$ (llamada temperatura de Verwey) los electrones en los sitios B se encuentran térmicamente deslocalizados entre los iones Fe^{3+} y Fe^{2+} (en el fenómeno conocido como *electrón hopping*), lo que da lugar a la alta conductividad eléctrica y térmica de la magnetita en comparación con otras ferritas. Debido a este hecho la magnetita es la única ferrita que presenta comportamiento semimetálico; es decir, tiene carácter semiconductor en lugar de aislante[14].

Para ilustrar la riqueza y complejidad de su estructura, la figura 8 muestra una celda unitaria de la magnetita compuesta por 56 átomos. Para facilitar la identificación se han resaltado con líneas los ambientes de un par de iones en sitios tetraédricos y octaédricos.

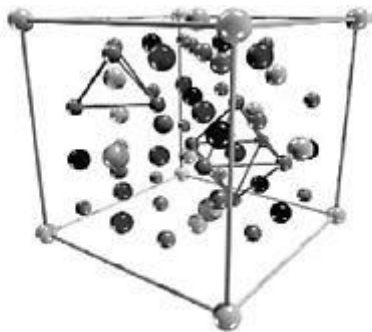


Figura 8. Celda unidad de la magnetita. Se indican con ayuda de líneas continuas, un sitio tetraédrico y uno octaédrico (nótese el número de iones de oxígeno entorno a cada átomo de hierro). Se usó el siguiente código de colores: gris para oxígenos, gris claro para iones Fe^{3+A} , gris claro para los Fe^{2+B} y negro para los Fe^{3+} [15].

2.1.3.2. APLICACIONES

La magnetita es un mineral inestable, siendo ésta la característica útil ante ácidos o bases fuertes acuosos, oxidantes o reductores fuertes, comportándose como cualquier otro óxido de amplio uso en química orgánica, estudios demuestran que la capacidad de la magnetita ha ido en aumento en un amplio rango de campos como en los fluidos magnéticos, almacenamiento de datos y biomedicina. En biomedicina su aplicación en liberadores de medicamentos específicos, separación de células cancerosas, reparación de fluidos y agentes de contraste en imagen por resonancia magnética, por mencionar algunos.

En el ámbito de tratamientos de residuos también ha ido ganando importancia en los últimos años, ya que han aparecido, nuevas tecnologías en la eliminación de contaminantes presentes en el agua. Se ha utilizado la magnetita en la eliminación de distintos metales pesados, desechos radiactivos, contaminantes orgánicos (fenol, anilina, compuestos orgánicos volátiles, tintas) e incluso para la separación de ácidos grasos en disoluciones orgánicas y aceites vegetales.

La ventaja de la magnetita es debida a su actividad y su facilidad de aislamiento que presenta gracias al comportamiento super-paramagnético que presenta.

Otra de sus aplicaciones es su uso como pigmento de pinturas anticorrosivas, linóleo y en la industria textil, la utilización como colorante en la producción de vidrio, en la fabricación de imanes permanentes. Además se utiliza como partículas ultra-finas en algunos dispositivos para grabaciones magnéticas y almacenamiento de datos, es utilizada también en compuestos para pulir.

La magnetita y la hematita, son los óxidos de hierro más utilizados como catalizadores, en la descomposición del peróxido de hidrógeno [17], es muy utilizado en aplicaciones médicas, debido a que permite separar moléculas biológicas de las células [18], tiene una gran demanda por el suministro de medicamentos, debido a que no es tóxica y es compatible con el cuerpo humano. En la industria siderúrgica la magnetita es la materia prima para la obtención del hierro. La magnetita junto con coque y piedra caliza alimentan a un alto horno, que es una planta industrial que reduce el hierro existente en el mineral para liberar el hierro.

2.4 AZUFRE

En la industria siderúrgica la producción de hierro y acero se ve afectada por el contenido de este elemento, el azufre, que afecta las propiedades mecánicas y químicas con la formación de inclusiones sulfurosas en el acero, se ha mencionado con anterioridad la alta demanda de los productos de hierro y acero que hacen a nivel mundial un producto esencial, la problemática de que el azufre esté presente en minerales como la magnetita es porque también se encuentra en la naturaleza, ejemplo de estos minerales con contenidos de azufre es la pirrotita (FeS) y/o la pirita (FeS_2), galena (PbS), blenda (ZnS), calcosina (Cu_2S), y también en diferentes sulfatos como barinita (BaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), etc., debido a esto se realizan procesos para su eliminación, como la peletización y fundición, y como

una técnica alternativa en este trabajo la biooxidación para la eliminación de el azufre.

2.4.1 Eliminación del azufre

Para una obtención de hierro y acero de calidad, se trata de eliminar el alto contenido de azufre que exigen las industrias, durante el proceso de refinamiento el mineral pasa por etapas de conminución, como son: trituración, molienda y separación magnética, el objetivo es lograr un tamaño óptimo y así formar los pellets de magnetita que alimentan a un alto horno. La peletización y fundición tiene el objetivo erradicar esta problemática, la eliminación del azufre contenido en el mineral, el proceso de paletizado mejora las características físicas (granulométricas, resistencia a la compresión, degradación e índice de tambor y porosidad), químicas (hierro total, hierro ferroso, azufre, fósforo y basicidad) y metalúrgicas (hinchamiento, reductibilidad, degradación a baja temperatura y reducción bajo carga), ofreciendo la oportunidad de disminuir el contenido de azufre de minerales contaminados con especies sulfurosas.

Los pellets obtenidos deben de cubrir ciertas características como son: la uniformidad del tamaño, resistencia física, resistencia al choque térmico, buena porosidad y tamaño apropiado, sin estas características el pellet corre el riesgo de que al ser sometido a la cocción, explote por la presión de vapor o agrietándose interiormente. En la cocción el pellet es sometido a una atmosfera oxidante, desulfurización, en este paso no se logra eliminar el azufre en su totalidad se elimina un 85 y 88%. Cuando está listo se lleva al alto horno para la producción de arrabio, el resto es llevado al alto horno donde la eliminación en esta planta química elimina hasta un 95% del azufre total de la carga y esta eliminación es debida fundamentalmente a la escoria [16].

En este proceso el azufre que se encuentra en la escoria al combinarse con el oxígeno de la atmósfera forma SO_2 que escapa hacia la atmósfera generando un gas contaminante, el dióxido de azufre, aparte de su toxicidad para los seres vivos, genera la lluvia ácida, siendo un problema ambiental.

2.5 BIOMINERÍA

La minería es una de las actividades que más afectan al medio ambiente y al hombre. Sin embargo, los avances tecnológicos permiten evitar un impacto ambiental severo recurriendo a la Biominería.

Desde tiempos remotos, los microorganismos han desempeñado un papel relevante en diferentes procesos de interés para la humanidad, desde su intermediación en la producción de alimentos y bebidas hasta su participación en las enfermedades infecciosas, aunque sólo en los últimos 150 años la ciencia ha permitido comprender, al menos parcialmente, la naturaleza de la acción microbiana. Obviamente, la minería tampoco es completamente ajena a la intervención de microorganismos aunque sólo en el último medio siglo y a partir del aislamiento de una bacteria en una explotación minera (específicamente en las minas de Río Tinto, Huelva, España), se ha comprendido la importancia de su participación. Actualmente, el reconocimiento de dicha participación ha originado una nueva especialidad denominada biominería que describe esencialmente a la tecnología de explotación de minerales utilizando la acción de microorganismos.

Bajo el término biominería se enmarcan diferentes procesos de la explotación de los minerales abarcando desde la concentración de las especies de interés (a través de la bioflotación), la recuperación de los elementos presentes en ellas (biolixiviación) o facilitando su recuperación (biooxidación) y hasta su acción en tareas de remediación ambiental (biorremediación).

2.5.1 BIOLIXIVIACIÓN

En la actualidad se sabe que este proceso puede ser catalizado por un elevado número de microorganismos entre los cuales se encuentran levaduras, hongos y bacterias pero son ciertos géneros de estas últimas las más eficientes.

Por esa razón, suelen utilizarse como sinónimos los términos biolixiviación y lixiviación bacteriana aunque el último sólo se refiere a la catálisis producida por bacterias.

La lixiviación bacteriana es un proceso que ocurre naturalmente ya que las bacterias involucradas se encuentran fundamentalmente asociadas a los minerales sulfurados. Es así que, previamente al descubrimiento de dichas bacterias, existen fuertes indicios de su participación en procesos hidrometalúrgicos para la explotación de sulfuros.

En 1947, se aisló la primera bacteria de clara participación en la disolución de sulfuros; dicho microorganismo recibe el nombre actual de *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Actualmente se sabe que participan una variedad de microorganismos de los cuales los más importantes son las de especies acidófilas capaces de oxidar azufre y/o hierro; entre ellos se destacan las bacterias pertenecientes al género *Acidithiobacillus* y al *Leptospirillum*.

Más recientemente se ha comprobado que también existe una rica variedad de otros microorganismos, tanto dentro del dominio de las bacterias como del de las arqueas.



Estos microorganismos acidófilos, ya que son activos a pH por debajo de 3, han sido clasificados utilizando un variado número de criterios tales como temperatura (mesófilos, termófilos moderados y termófilos), pH óptimo (acidófilos, neutrófilos, alcalófilos) y también sobre la base del modo de adquisición de carbono: autótrofos (asimilan directamente CO_2), heterótrofos (utilizan fuentes orgánicas de carbono) y mixótrofos que usan ambos. En general, los microorganismos incluidos dentro de las arqueas resultan extremófilos en términos de temperatura respecto de las bacterias [19]

2.5.2 BIOOXIDACIÓN

El término es aplicado cuando el elemento a recuperar no puede ser solubilizado por los microorganismos pero su presencia beneficia la recuperación del mismo, a través de la degradación de la matriz mineral en la que está ocluido el elemento de interés. Si bien las mayores aplicaciones de esta metodología son para minerales de oro, es potencialmente aplicable a plata (cuando se encuentra nativa e incluso como sulfuro).

Esta metodología puede realizarse en tanques agitados en lugar de pilas o bateas, el tratamiento en tanques casi está limitado al pretratamiento de concentrados refractarios de arsenopirita para la recuperación posterior de oro [20].

Muchas de las plantas de biooxidación fueron construidas por Gencor y operan a 40 °C aunque las construidas por BacTech en Australia operan a 50 °C. Existen muchas plantas en la actualidad en Australia, Brasil, Sudáfrica y Perú



entre otras, aunque probablemente la planta de Sansu en Ghana es la más grande procesando a través de 24 tanques de un millón de litros de capacidad, hasta 1000 toneladas diarias de concentrados.

El proceso de lixiviación por tanques agitados se aplica a escala industrial para la recuperación de cobalto en Uganda y ya existe una planta piloto para la recuperación de níquel en Sudáfrica. Hay ya un elevado grado de avance para utilizar esta metodología en forma rentable para la recuperación de cobre a partir de calcopirita pero operando a temperaturas mayores a 75 °C.

La lixiviación máxima en un mineral depende de las condiciones óptimas de crecimiento de los microorganismos, ya que es posible la obtención de metales por medio de las reacciones de oxidación enzimática, esto se la atribuye a los microorganismos involucrados que producen enzimas para su digestión, a partir del azufre y sus compuestos, y su fuente de energía son los electrones que realizan a partir de la oxidación de los minerales; los demás factores o parámetros involucrados son: los micronutrientes, O₂ y CO₂, pH, temperatura, agentes surfactantes y extractantes, el hierro y el azufre son elementos esenciales para el desarrollo de los microorganismos lixiviantes.

2.5.3 MICROORGANISMOS OXIDANTES

Los microorganismos son los seres vivos más simples que existen, fueron la primera forma de vida que existió en el planeta, sus pocas formas en las que se presentan y su clasificación por su adaptabilidad a condiciones extremas como el caso de lugares inhabitables para el ser humano las caracteriza únicas.

Se desarrollan en medio ácido a pH menores a 3 y temperaturas de -20°C hasta más de 50°C.

Las bacterias pertenecen a la clase procariota debido a que su núcleo no está rodeado por una membrana, consisten de una molécula de ADN. Se clasifican como quimiolitautótrofas, su fuente de alimento son los materiales inorgánicos, que las distinguen de las autótrofas que utilizan CO₂, y las heterótrofas las cuales utilizan compuestos orgánicos como fuente de carbono, proliferando en cuestión de segundos.

En la figura 9, se observa las partes de una bacteria *Tiobacillus*, constituida por: la pared celular, membrana citoplásmica, mesozonas, citoplasmas, proto-núcleo y plásmidos.

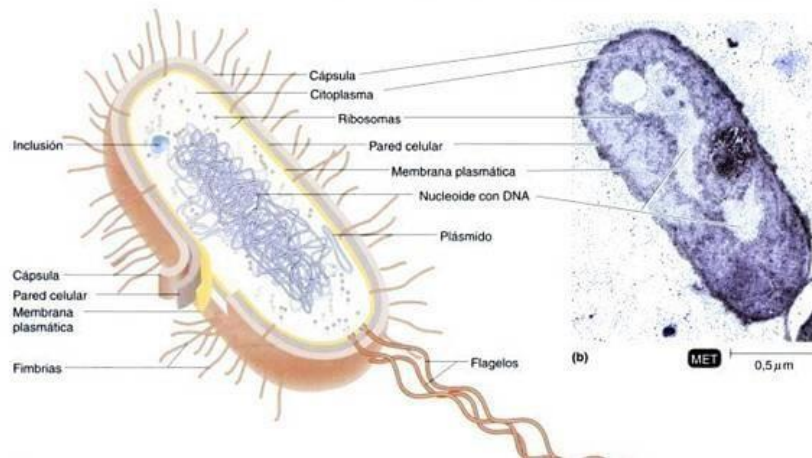


Figura 9. Esquema de la estructura celular de una bacteria del género *Tiobacillus*.
Fuente: [21].



De las especies *Thiobacillus* que se conocen la que más atención ha recibido es la *Thiobacillus ferrooxidans*, cuya presencia fue demostrada por Colmer y Hinkle, a comienzos de los años 50, en el drenaje de unas minas de carbón que reportaban altos contenidos de ácido y hierro [22]. Los microorganismos involucrados en los procesos de biolixiviación corresponden a bacterias extremófilas, las que se caracterizan por desarrollarse en condiciones extremas tales como pH ácidos y concentraciones de elementos metálicos, y cuya principal fuente de energía está dada por la oxidación del ion ferroso a férrico y la de compuestos reducidos de azufre.

La bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, ha sido la más estudiada para la biolixiviación y por consiguiente de la que existe mayor información, sin embargo existen otros microorganismos identificados que solubilizan minerales sulfurados, como los que se encuentran en la tabla 4, a los cuales es posible clasificarlos de acuerdo tanto a la importancia comercial en operaciones biohidrometalúrgicas. Como también a aquellas que únicamente pueden ser exploradas en pruebas de laboratorio pero que parecen ser prometedoras a futuro.

Tabla 4 [23]. Listado de microorganismos biolixiviantes.

Grupo	Nombre	Características fisiológicas
Mesófilos (Temperatura 20-40°C)	<i>Thiobacillus Ferroxidans</i>	Oxida a Fe^{2+} , S^0 , $S_2O_3^{2-}$, U^{4+} , sulfuros metálicos, etc. Oxida a H_2S , S^0 y $S_2O_3^{2-}$ a H_2SO_4 ; no oxida a sulfuros metálicos.
	<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	Oxida a Fe^{2+} , pero no a S^0 .
	<i>Leptospirillum ferroxidans</i>	
Termófilos extremos (Temperatura 50-90°C)	<i>Solfobabu acidocaldarius</i> <i>Acidianus brierleyi</i>	Oxida a Fe^{2+} y S^0 ; reduce al Fe^{3+} anaeróbicamente. Oxida a Fe^{2+} , S^0 , MoS_2 y $CuFeS_2$. Reduce MoS_2 anaeróbicamente.
Termófilos moderados (Temperatura 40-55°C)	<i>Solfobabus solfataricus</i> <i>Solfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Oxida a Fe^{2+} y S^0 ; forma endoesporas

Estos microorganismos son aerobios (requieren de la captación libre de oxígeno), acidófilos (se desarrolla en rangos de pH que varían en un rango de 3 y 5 de acides) y a temperaturas que oscilan de 25°C y 90°C.

2.5.3.1. CLASIFICACIÓN

Las bacterias autótrofas: Fabrican su propio alimento a partir de sustancias inorgánicas. Para ello utilizan la energía solar si son bacterias fotosintéticas, o la toman de compuestos químicos si son bacterias quimio sintéticas [24]

Las bacterias heterótrofas: Obtienen su alimento de otros seres. Hay bacterias saprófagas que viven sobre materia muerta produciendo su descomposición. Otras son parásitas pues viven a expensas de diversos seres vivos, como la Salmonella, que produce la diarrea. Hay bacterias que se asocian con organismos para beneficiarse mutuamente, como sucede con *Escherichia coli* que vive en el intestino humano, donde sintetiza o fabrica ciertas vitaminas que el hombre aprovecha.

Las bacterias se pueden clasificar atendiendo a su forma, respiración, nutrición y a otras características (figura 10). Según su forma, las bacterias se clasifican en cocos si son esféricas; bacilos, si tienen forma de bastón; briones, si tienen forma de coma, o espirilos cuando tienen forma de sacacorchos.

Los cocos pueden estar aislados en algunas especies; también los hay por grupos (diplococos), en cadenas largas (estreptococos) o formando racimos (estafilococos) o.



figura10. Clasificación de las bacterias según su forma fuente [21]

Según el tipo de respiración las bacterias pueden ser aerobias, si usan el oxígeno para respirar; o anaerobias, si pueden respirar en ausencia de oxígeno.

Según la composición química de la pared bacteriana se clasifican en Gram positivas (Gram+), si dicha pared está formada por una capa de una sustancia llamada mureina, lo que hace que frente a un reactivo colorante la bacteria se coloree azul, y en Gram negativas (Gram-), si además de la capa de mureina existe otra lipídica y la coloración frente al colorante será rojo.

2.5.3.2 PERIÓDOS DE CRECIMIENTO

Como todo proceso con células microbianas, el crecimiento bacteriano es representado a través de una curva que muestra las diferentes fases de crecimiento microbiano como se muestra en la figura 11. [24]

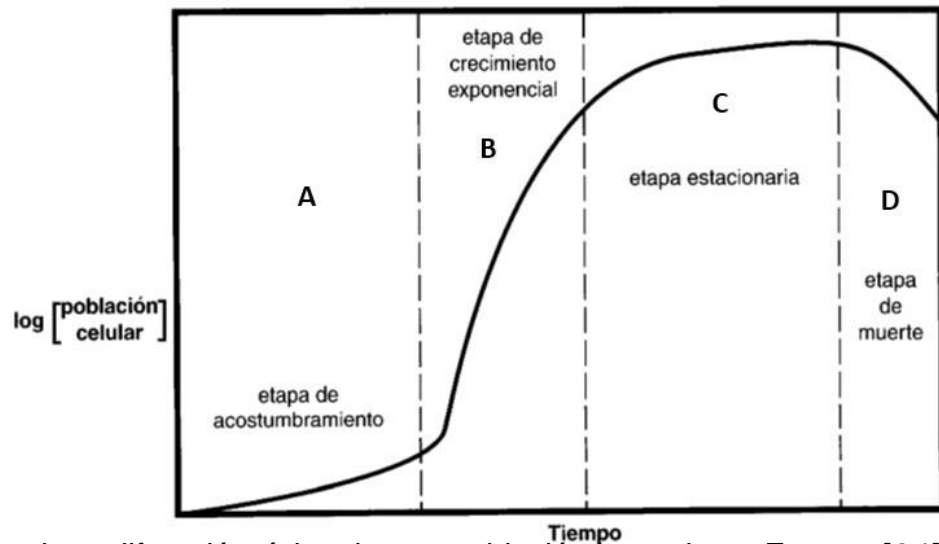


Figura 11. Curva de proliferación típica de una población bacteriana. Fuente: [24].



- La primera fase **(A)** indica la etapa en la cual el microorganismo se está adaptando a un ambiente nuevo y estructurando mecanismos de reacción para la construcción de moléculas para su mantenimiento y definición celular.
- La segunda fase exponencial o de crecimiento **(B)** representa el incremento exponencial de la población microbiana, el microorganismo va generando características importantes entre las cuales se encuentra el tiempo de duplicación o generación, es decir, el tiempo que una determinada población requiere para duplicarse.
- La tercera fase estacionaria **(C)** representa una limitación en la velocidad de solubilización en virtud que el crecimiento cesa por carencia de uno o más nutrientes esenciales que componen al sustrato, pese a que la reproducción celular ha cesado las células permanecen viables hasta llegar hasta la cuarta fase **(D)**, la de muerte, en la cual las células entran en lisis y se desintegran

2.5.3.3 *ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS* Y *ACIDITHIOBACILLUS THIOOXIDANS*. [25]

Son bacterias Gram negativas cuyas características son:

- Quimiolitotótrofas: obtienen energía necesaria de minerales inorgánicos.
- Autótrofas: utilizan el bióxido de carbono.
- Aerobias: el oxígeno es el principal aceptor de electrones.
- Mesófilas: temperatura óptima, 30°C.
- Acidófilas: viven en ambientes ácidos $\text{pH} \leq 3$

Acidithiobacillus ferrooxidans:

Se encuentra en ambientes asociados a depósitos sulfurados, debido a que las condiciones son propicias para el desarrollo de esta bacteria, se clasifica como la más importante dentro de ámbito metalúrgico debido a que es la más estudiada de su género y a nivel industrial ha demostrado gran éxito debido la oxidación de minerales sulfurados, debido a que su fuente de energía es la oxidación del Fe^{2+} y especies reducidas del azufre, se reproduce por fusión binaria, creciendo en medios ácidos, se le clasifica como un microorganismo quimiolitotrofo obligado u autótrofo facultativo, es decir obtiene su energía a partir de su oxidación de especies inorgánicas reducidas, además utiliza como fuente de carbono el CO_2 del aire que se encuentra disuelto en el líquido, para así poder realizar el proceso de biosíntesis.

Acidithiobacillus Thiooxidans:

Esta bacteria se ha encontrado junto con la *Acidithiobacillus Ferrooxidans*, en las mismas condiciones propicias para su reproducción, la diferencia radica, en que utiliza como fuente de energía la oxidación del azufre elemental o compuestos de azufre, como sulfuros y tiosulfatos, para obtener su energía, convirtiéndolo en el azufre elemental y en ácido sulfúrico, por lo tanto es más tolerante a medios muy ácidos cercanos a cero, debido a esto se reproduce propiciamente, posee flagelo polar que le da una movilidad a comparación de la bacteria *Acidithiobacillus Ferrooxidans*. Es importante en la lixiviación porque mejora y complementa la actividad de la bacteria *Acidithiobacillus Ferrooxidans*, tiene una singular habilidad para oxidar al azufre elemental y producir fácilmente ácido sulfúrico, en cual en presencia del oxígeno es rápidamente usado por la bacteria



Acidithiobacillus Ferrooxidans, para oxidar al ion ferroso y a su vez producir sulfato férrico, iniciando así el ciclo de la oxidación de los sulfuros metálicos. Juega un rol determinante y fundamental en mantener el pH lo suficientemente bajo como para que no precipite el ion férrico por hidrólisis [25]

Las principales características de *Acidithiobacillus Thiooxidans* y *Acidithiobacillus ferrooxidans* se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. [23] Principales características de las *Acidithiobacillus Thiooxidans* y *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Características	<i>Acidithiobacillus Thiooxidans</i>	<i>Acidithiobacillus Ferrooxidans</i>
Tamaño	0.5 x 1-1.5 μ m	0.3 x 1-1.2 μ m
Rango de temperatura	15 a 37°C	10 A 37 °C
Temperatura optima	30 °C	30 °C
Rango de pH	1-4.6	0.5 – 6
pH óptimo	2.0	2.0-3.5
Fuente de energía	= $S^{2-}, S^{0}, S_2O_6^{2-}$	Fe ²⁺ , S ⁰ , S ₂ ⁻ , UO ₂ ⁺
Fuente de Carbono	CO ₂	CO ₂
Fuente de Nitrógeno	NH ₄	NH ₄
Aceptores de electrones	O ₂ , Fe ³⁺	O ₂



MECANISMOS DE BIOOXIDACIÓN

Helmut Tributsch [26] propone la existencia de los siguientes tres mecanismos para la biolixiviación: directo, indirecto y cooperativo. Asimismo indica que es necesario que las bacterias hagan contacto con el sulfuro a través de una capa de polímeros extracelulares, los que actúan como medio para la reacción de disolución del mineral.

I. Mecanismo directo

La bacteria ataca al sulfuro metálico de forma directa, mediante su adhesión a la superficie del mineral y posterior oxidación enzimática de éste por transporte de electrones desde la parte reducida del mineral, generalmente un sulfuro, al oxígeno disuelto.

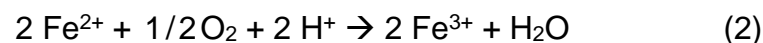
La reacción general es:



La adherencia de bacterias al mineral es, por tanto, un requisito del mecanismo directo y es la principal evidencia presentada en defensa del mismo.

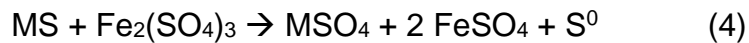
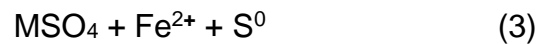
II. Mecanismo indirecto

El mecanismo indirecto considera la acción de iones férricos sobre minerales sulfurados mediante una disolución química, así por medio de esta reacción se producen ion ferroso y azufre elemental. Posteriormente, éstos son oxidados biológicamente a ion férrico e ion sulfato respectivamente. Los microorganismos que se encuentran en solución oxidan al ion ferroso a férrico en presencia de oxígeno y protones, por medio de la siguiente reacción:





El Fe^{3+} oxida los minerales sulfurados de acuerdo a la siguiente reacción: $\text{MS} + \text{Fe}^{3+} \rightarrow$



De esta forma, los microorganismos permiten la regeneración de ion férrico, a partir del ion ferroso, de tal manera que el Fe^{3+} está siempre disponible para la lixiviación de los minerales sulfurados. Sin embargo, como esta reacción consume protones, el pH puede aumentar ocurriendo la precipitación de ion férrico, formando barreras difusionales que impiden el contacto directo entre éste y el sólido, lo que afecta negativamente la disolución biológica del mineral.

III. Mecanismo cooperativo

Tributsch [26] introduce el concepto de mecanismo cooperativo, en el que los microorganismos adheridos al mineral y los libres en solución cooperan entre sí.

Las bacterias adheridas al sulfuro liberan especies metálicas oxidables como el ion ferroso, éste es oxidado por las bacterias en solución regenerando así el agente oxidante Fe^{3+} , el que ataca al mineral dando lugar a la lixiviación química.

- Mecanismo vía tiosulfato

Se presenta en disulfuros como la pirita (FeS_2), molibdenita (MoS_2) y wolframita (WS_2), los cuales son insolubles en ácido y por ello sólo son atacables por agentes oxidantes como el hierro férrico (Fe^{3+}). Los productos de oxidación de la pirita por este medio son iones de hierro ferroso hexahidratados y tiosulfato. Los primeros son oxidados posteriormente al estado férrico y el tiosulfato es oxidado a sulfato vía compuesto



3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. REACTIVOS, MATERIAL Y EQUIPOS

Se utilizó un concentrado de magnetita Fe_3O_4 , que proviene del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada, tomada de la descarga de la concentración magnética (figura 12). El análisis químico del principal componente dio una ley de cabeza de 65.87 % Fe, con un tamaño de partícula de $45\mu\text{m}$.



Figura 12. Concentrado de magnetita Fe_3O_4 . Proveniente del Consorcio Minero Benito Juárez Peña Colorada tomada de la descarga de la concentración magnética.

3.1.1 REACTIVOS

H_2SO_4 (ácido sulfúrico).

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (sulfato de amonio).

K_2HPO_4 (fosfato de potasio dibásico).

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (sulfato de magnesio heptahidratado).

KCl (cloruro de potasio).

$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (nitrato de calcio).

CH_3COOH (ácido acético glacial).

$\text{H}_9\text{CIN}_2\cdot\text{HCl}\cdot\text{H}_2\text{O}$ (clorhidrato de ortofenantrolina monohidratado)

NH_2OHCl (clorhidrato de hidroxilamina).

NaF (floruro de sodio).

Fe_3O_4 (magnetita).

Cepas mesófilas disponibles en el laboratorio mantenidas en refrigeración a -4°C .



3.1.2 Material

Matraces Erlenmeyer de 250ml

Electrodo combinado para medir potencial redox con referencia interna de Ag/AgCl

Electrodo combinado para medir pH con referencia interna de Ag/AgCl

Celda conductimétrica Tacussel TE100

Cámara Neubauer

Material común de laboratorio.

Picetas

Espátulas.

3.1.3 Equipos

Incubador con agitación orbital marca Banstead Lab-line.

Microscopio óptico de Contraste de Fase marca OLYMPUS CX3r.

Espectrofotómetro UV-Visible marca GBC, modelo Cintra 5.

Balanza analítica. Mettler Toledo modelo A. 240

Balanza de precisión.



3.2 METODOLOGIA

-Caracterización granulométrica del concentrado de magnetita

La muestra utilizada en este trabajo fue un concentrado de magnetita, obtenido de la concentración magnética de la compañía Peña Colorada, con un tamaño de partícula de 45 μm , determinado por cribado.

-Caracterización por microscopía electrónica de barrido (MEB).

Se uso está técnica para la caracterización del concentrado de magnetita puesto que permite determinar la composición elemental del concentrado de magnetita (microanálisis MEB-EDS) y la morfología del mineral.

- Análisis elemental por fluorescencia de rayos X (FXR).

Mediante esta técnica analítica se realiza análisis elemental en cualquier tipo de muestras, líquidos, sólidos o polvos. FXR combina una exactitud y una precisión superiores con una preparación de muestras rápida y sencilla para el análisis de elementos, que incluyen desde el berilio (Be) hasta el uranio (U).



-Difracción de rayos X (DRX).

Esta técnica permite identificar compuestos cristalinos. Determina la estructura detallada de un material, es decir, permite conocer la posición que ocupan los átomos, iones o moléculas que lo forman. Debido a este ordenamiento podemos determinar propiedades tanto físicas como químicas de los materiales e identificar especies cristalinas.

-Análisis químico

El análisis químico por vía húmeda de los principales componentes metálicos se realizó por espectrometría de adsorción atómica, previa digestión ácida de la muestra del mineral.

-Selección del medio de cultivo

El medio de cultivo utilizado es el conocido como medio salino basal 10-fold-9K, comúnmente llamado sólo medio 9K, que contiene los requerimientos nutricionales para el desarrollo y reproducción de los microorganismos.



-Sistemas de biooxidación

Se prepararon siete cultivos con un concentrado de magnetita en un medio nutriente 9k, conteniendo 5% en sólidos e inoculados al 1%. Los sistemas se colocaron en un incubador a una temperatura de 35°C y 150 rpm con cepas bacterianas mesófilas, denominadas P11, provenientes de la compañía minera Mexicana de Cobre. S.A. de C.V., cepas bacterianas mesófilas de Noche Buena, proporcionadas por el Centro Experimental del Noroeste del CRM, Chihuahua), y cepas de bacterias autóctonas del concentrado de magnetita (tabla 7).

-Monitoreo de parámetros.

Se realizó el monitoreo de los parámetros: pH, E(mv), K(μ s), Bacterias/ml, y concentración de hierro en solución, cada 48 horas. El conteo de bacterias por campo se hace por conteo directo en una cámara Neubauer. La disolución de los metales se cuantificó tomando una alícuota para su análisis por espectrometría de absorción atómica. El Fe se determinó mediante análisis UV visible en la misma solución.

- Determinación de Fe^{2+} , Fe^{3+} por medio de Espectrofotometría ultravioleta-visible



La determinación del hierro se realizó por espectrofotometría UV-visible. El ferroso se cuantificó por el método de curva de calibración midiendo la absorbancia a 510 nm complejo formado con o-fenantrolina en medio buffer de ácido acético/acetato de sodio. El análisis del hierro total se hizo de la misma manera, reduciendo previamente el ion férrico con clorhidrato de hidroxilamina.

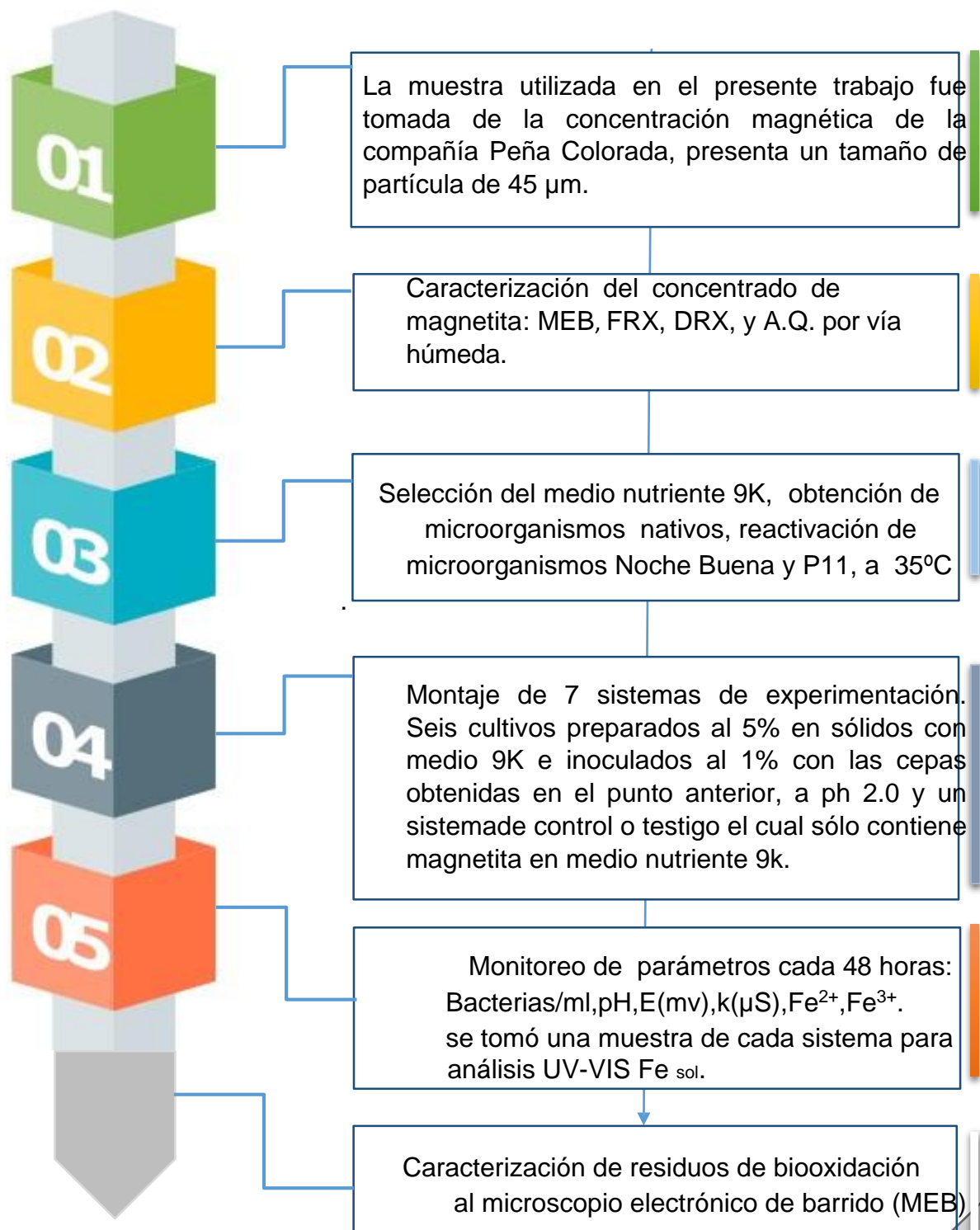
En la tabla 6 se observa la nomenclatura utilizada para cada sistema de biooxidación, el tipo de bacteria utilizada y su procedencia.

Tabla 6. Sistemas de experimentación.

Cultivo/Nomenclatura	Tipo de Bacteria	PROCEDENCIA	Observaciones
M1	<i>Atf</i>	Autóctona	Concentrado de magnetita+ 9K+ Bacterias
M2	<i>Att</i>	Autóctona	Concentrado de magnetita+ 9K+ Bacterias
M3	<i>Atf</i>	Noche Buena	Concentrado de magnetita+ 9K+ Bacterias
M4	<i>Att</i>	P11	Concentrado de magnetita+ 9K+ Bacterias
M5	<i>Atf</i>	Noche Buena	Concentrado de magnetita+ 9K sin MgSO ₄ + Bacterias
M6	<i>Att</i>	P11	Concentrado de magnetita+ 9K sin MgSO ₄ + Bacterias
M7	Testigo	---	Concentrado de magnetita + 9K sin Bacterias



3.3 DIAGRAMA DE FLUJO





4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CONCENTRADO DE MAGNETITA

Resultados obtenidos antes de someter al concentrado de magnetita al proceso de biooxidación.

El análisis químico del principal componente del concentrado de magnetita (el Fe), realizado en el laboratorio de análisis químico, dio una ley de cabeza del 65.87 % de Fe.

4.1.1. ANÁLISIS MORFOLÓGICO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

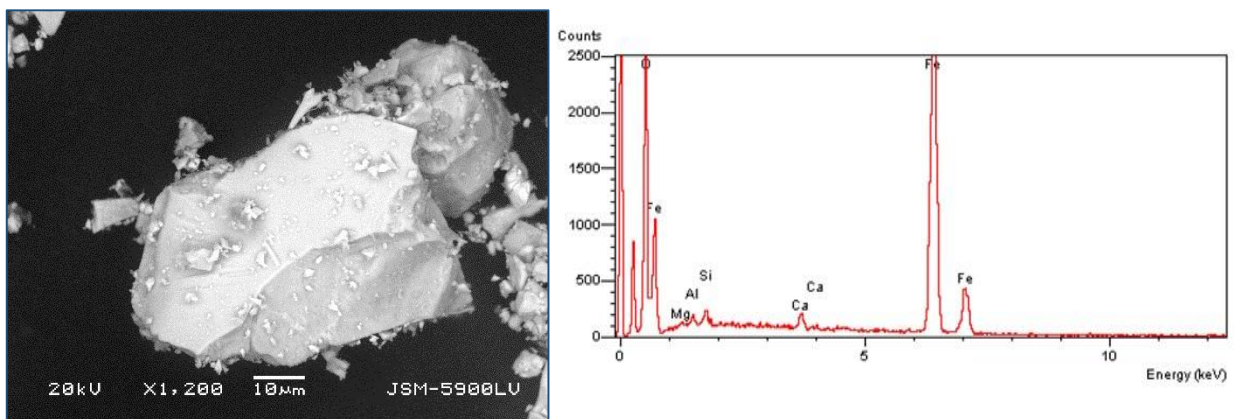


Figura 13. Micrografía electrónica y microanálisis EDS de una partícula de concentrado de magnetita. Superficie inicial, antes de someterla al proceso de biooxidación. Imagen vista a 1200x.



En la figura 13 se observa la morfología de una partícula del concentrado de magnetita antes de someterla al proceso de biooxidación. Los resultados de este análisis cualitativo muestran el patrón característico de la magnetita Fe y O, y la presencia de algunos elementos, impurezas al estado de trazas, como el Si, Al, Ca, Mg. Dado que el análisis EDS al microscopio electrónico de barrido es puntual, la ausencia de azufre y otros elementos en éste análisis se debe a las limitaciones de la técnica.

4.1.2 FLUORECENCIA DE RAYOS X (FRX)

El método de Fluorescencia de rayos X (FRX) da la composición porcentual de los elementos presentes en el concentrado de magnetita. Los resultados de la composición química de la magnetita antes de biolixiviar se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de fluorescencia de rayos X (FRX)

Elemento	Fe	Si	Al	Ca	S	K	P
%composición	69.57	1.80	0.84	0.36	0.13	0.08	0.04
Oxido	Fe ₂ O ₃	SiO	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	TiO
%compisición	92	4.38	1.67	0.837	0.481	0.153	0.429

4.1.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

La difracción de rayos X es un método de análisis estructural, que permite identificar los minerales por su estructura cristalina. No es un método analítico químico, pero permite indirectamente estimar la composición de la muestra analizada con una buena aproximación del contenido en elementos mayoritarios.

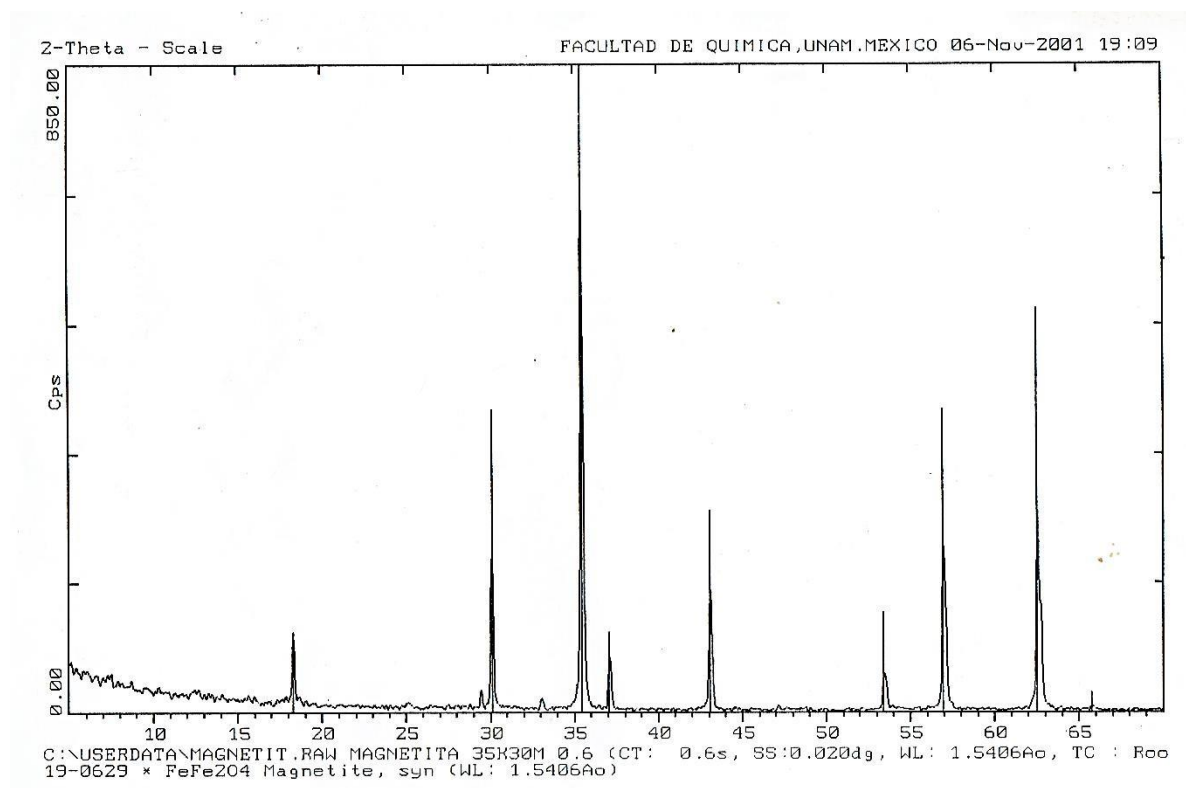


figura 14. Difractograma del concentrado de magnetita-

Debido a las limitaciones de la técnica, las impurezas presentes no fueron detectadas. Las señales registradas comprenden al patron de magnetita.

4.2. ESTUDIO DE BIOOXIDACIÓN DE UN CONCENTRADO DE MAGNETITA

4.2.1 PARÁMETROS DE BIOXIDACIÓN

Durante el estudio de biooxidación del concentrado de magnetita, se monitorearon los parámetros físicoquímicos: Bacterias/ml, pH, E (mV) y K (μS), así como la concentración de hierro en solución. Se realizaron mediciones cada 48 horas, durante los 50 días de experimentación.

4.2.1.1 CRECIMIENTO BACTERIAL (Bacterias/ml)

En la Figura 15, se representa el crecimiento bacterial con respecto al tiempo de los seis sistemas que contienen microorganismos *Acidithiobacillus Tiooxidans* y *Acidithiobacillus Ferroxidans*, y del sistema control, durante 50 días de biooxidación del concentrado de magnetita.

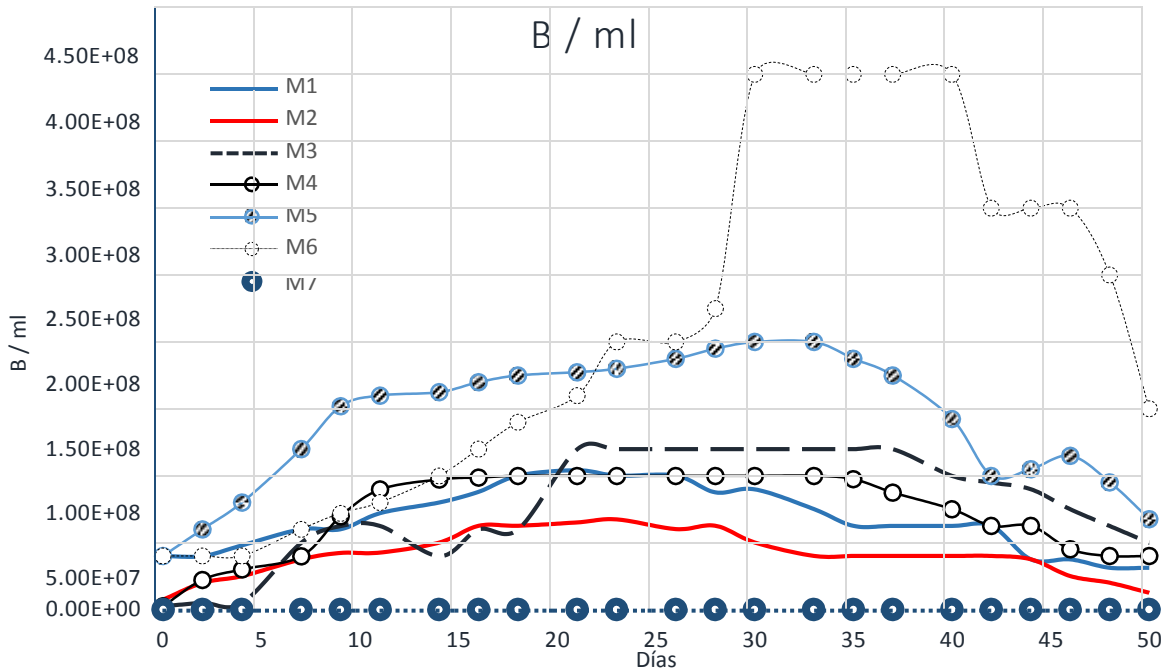


Figura 15. Crecimiento bacterial (Bacterias/ml) en los 7 sistemas de estudio

En las curvas de crecimiento bacterial de los sistemas M1 a M6 representadas en la figura 15, se pueden diferenciar las cuatro fases típicas en la evolución de los parámetros que miden el crecimiento microbiano.

1.- *Fase de adaptación* durante esta fase los microorganismos adaptan su metabolismo a las nuevas condiciones ambientales (abundancia de nutrientes y condiciones de cultivo). Los seis sistemas de estudio presentan la fase de adaptación durante los primeros 4 días de experimentación, en el sistema M6 se observa

que esta fase se extiende hasta los 25 días siendo mucho más prolongada que en el resto de los sistemas. En esta fase no hay incremento importante en el número de células, pero hay gran actividad metabólica, aumento en el tamaño individual de las células, en el contenido proteico, ADN y peso seco de las células

2.- *Fase exponencial o logarítmica*, en ella la velocidad de crecimiento es máxima y el tiempo de generación es mínimo. Durante esta fase las bacterias consumen a velocidad máxima los nutrientes del medio. Los Sistemas M1, M2, M3, M4 desarrollan esta fase a partir del día 5 hasta el día 17. M5 inicia esta fase desde el día 4 hasta el día 9 y M6 del día 25 al día 30 de experimentación, siendo estos sistemas los más cortos en esta fase.

3.- *Fase estacionaria*: en ella no se incrementa el número de bacterias (ni la masa u otros parámetros del cultivo). En el sistema M6 observamos que es el de mayor crecimiento de $4.00E08$ bacterias/ml presentando el doble de la población que el sistema M5 y aproximadamente el triple con el resto de los sistemas, M1, M2, M3 y M4, donde observamos que estos sistemas inician la fase estacionaria a partir de los 17 días, mientras que M5 y M6 a partir de los 12 y 30 días, respectivamente. Las células en fase estacionaria desarrollan un metabolismo diferente al de la fase exponencial, durante la fase estacionaria se produce una acumulación y liberación de metabolitos secundarios.

Los microorganismos entran en esta fase porque se agota algún nutriente esencial del medio o porque los productos de desecho que han liberado durante la fase exponencial hacen que el medio sea inhóspito para el crecimiento microbiano. La fase estacionaria tiene gran importancia porque probablemente represente con mayor fidelidad el estado metabólico real de los microorganismos en los ambientes naturales.

4.- *Fase de muerte*, después de que una población microbiana alcanza la fase estacionaria, las células pueden seguir vivas y continuar metabolizando, pero va a comenzar una disminución progresiva en el número de bacterias y cuando esto ocurre se dice que la población ha entrado en fase de muerte

En los sistemas M1 y M2, se observa que las bacterias tienden a disminuir el día 28, para M3, M4 y M5 la curva de crecimiento bacterial cae el día 35. El sistema M6 entra en la fase de muerte en el día 41, siendo este el que presenta la mayor población bacterial, indicando que las condiciones fueron propicias para el crecimiento bacterial. Los sistemas M5 y M6, son comparables con los M3 y M4, que contienen a las bacterias de Noche Buena y P11, respectivamente, pero en M5 y M6 el medio 9K no contiene micronutriente $MgSO_4$.



4.2.1.2. pH

Es un parámetro crítico en el cultivo de microorganismos ya que estos sólo pueden crecer en un rango estrecho de pH fuera del cual mueren rápidamente. El pH intracelular es ligeramente superior al del medio que rodea las células ya que, en muchos casos, la obtención de energía metabólica depende de la existencia de una diferencia en la concentración de protones a ambos lados de la membrana citoplásmica. Cada tipo de microorganismo tiene un rango de pH en el que puede vivir adecuadamente, fuera de este rango muere.

Los rangos de pH tolerables por diferentes tipos de microorganismos son, también, distintos. Los microorganismos biolixivantes son acidófilos y extremófilos por lo que pueden vivir en un rango de pH mayor que otros microorganismos. Hay que considerar que, como consecuencia del metabolismo bacterial, el pH del medio de cultivo suele tender a bajar durante el tiempo de la biooxidación debido a la formación de ácido sulfúrico como consecuencia de la oxidación del S^{2-} .

Por otra parte, la disminución del pH del medio que producen ciertos microorganismos les confiere una ventaja selectiva frente a otros microorganismos competidores. Así, por ejemplo, las bacterias lácticas que producen grandes cantidades de ácido láctico como consecuencia de su metabolismo primario reducen el pH del medio de cultivo a valores inferiores a los soportables por otras bacterias competidoras (llegan a bajar el pH del medio hasta 4.5). De esta forma, las bacterias competidoras mueren y las lácticas se convierten en la población dominante. La disminución del pH se puede deber a varios factores, uno de los cuales es la liberación de ácidos orgánicos de cadena corta (fórmico, acético, láctico) por ciertas bacterias. En este sentido, estos ácidos orgánicos de cadena corta presentan una potente acción bactericida. Esto es, los ácidos orgánicos de cadena corta son tóxicos para algunas bacterias más por sí mismos, que por el cambio de pH producido.

En este caso los microorganismos generan ácido sulfúrico, desarrollándose en un rango de temperatura de alrededor de 3.0 hasta 1.0 ó menor.

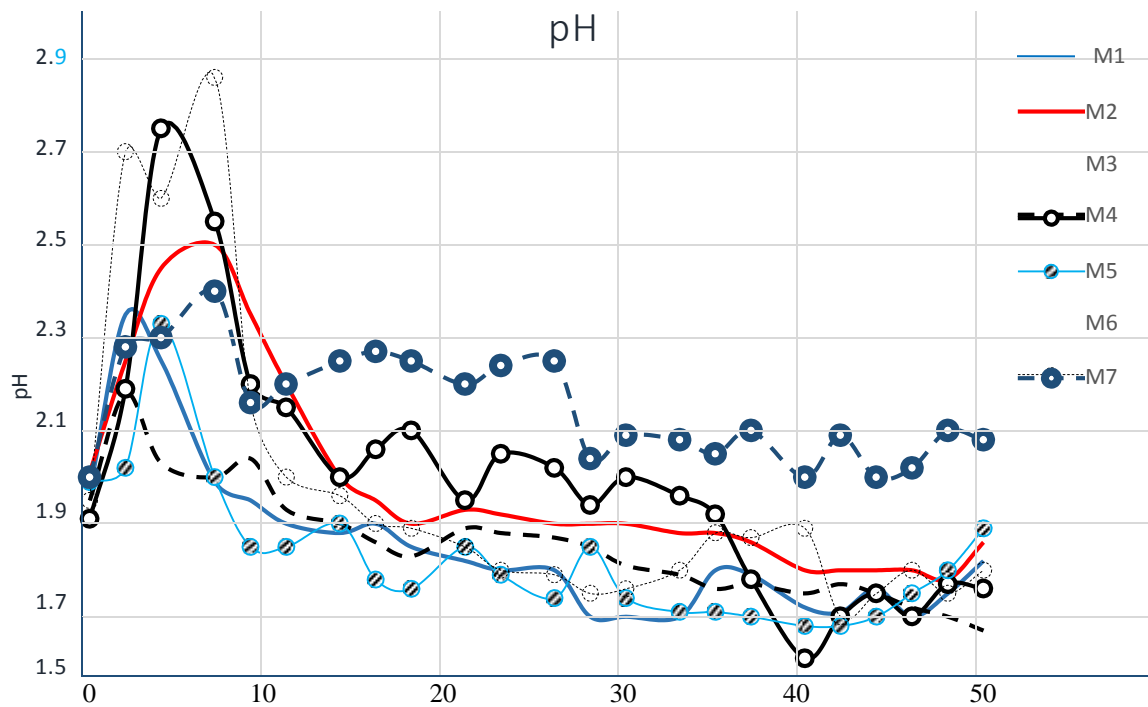


Figura 16. pH en los 7 sistemas de estudio.

En la figura 16, se observa la evolución del pH para los sistemas que contienen los microorganismos clasificados como *Acidithiobacillus Thiooxidans* y *Acidithiobacillus Ferrooxidans*.

Los siete sistemas de estudio inician en un rango de pH menor a dos, para que los microorganismos se desarrollen plenamente, el pH óptimo es de 2.0, en este caso las bacterias utilizadas tienen la capacidad de desarrollarse en ambientes más ácidos. Al inicio del experimento, los sistemas tienen valores de pH de: 1.97 (M1), 2.01 (M2), 1.95 (M3), 1.91 (M4), 1.67 (M5), 1.62 (M6), y 1.86 (M7) sistema testigo que sólo contiene el medio 9k y el concentrado.

En los 7 sistemas el pH tiende a incrementarse en las etapas de adaptación de los microorganismos, elevándose por arriba de 2.0, debido al equilibrio de hidrólisis del mineral en medio acuoso.



En los primeros cuatro días, observamos que los sistemas que tienden a tener un medio más ácido, son los que tienen una mayor población bacteriana (figura 15), como son los sistemas M5 y M6. En los sistemas que contienen bacterias, inoculados, tiende a disminuir el pH debido a que los microorganismos han entrado en la etapa de crecimiento poblacional, los microorganismos liberan los elementos contenidos en el concentrado de magnetita, como son azufre y hierro, logrando la acidificación del medio y obteniendo energía para su sobrevivencia. Esto se ve reflejado en los sistemas donde existen los microorganismos *Acidithiobacillus Ferrooxidans* (M1, M3 y M5) que son los sistemas que en un menor tiempo logran la disminución del pH debido a que este microorganismo es oxidante del hierro y azufre. En los sistemas donde hay bacterias *Acidithiobacillus Thiooxidans*, se observó un incremento de pH sistemas M2, M4 y M6, este microorganismo es sólo oxidante del azufre por lo que es más prolongado el tiempo para lograr disminuir el pH. Cuando los seis sistemas que contienen bacterias logran una estabilidad en el pH se debe a que las bacterias están en la fase estacionaria como se muestra en la figura 15. A partir de ahí el pH de los 6 sistemas que contienen bacterias, tienden a tener una disminución durante un periodo de 11 días hasta los 48 días (figura 15), observándose al final en los seis sistemas que contienen bacterias que el pH tiende a incrementarse. El sistema testigo se mantuvo en un pH mayor a 2.

4.2.1.3. POTENCIAL ÓXIDO-REDUCCIÓN

Este es otro factor determinante del crecimiento y del metabolismo bacteriano. El potencial oxido-reducción del medio de cultivo nos indica su capacidad para aceptar o donar electrones, esto es: sus características oxidantes o reductoras. Hay microorganismos que requieren ambientes oxidantes para crecer, mientras que otros necesitan ambientes reductores. El metabolismo de ambos tipos de microorganismos presenta diferencias notables.

Hay microorganismos que viven en ambientes carentes de oxígeno (anaerobios) que, sin embargo, llevan a cabo un metabolismo oxidativo porque usan otro aceptor final de electrones que actúa como oxidante ambiental.



Por ejemplo, las bacterias que "respiran" nitratos (NO_3^-); orgánicos oxidados, en el curso de ciertas reacciones metabólicas oxido-reducción forman compuestos altamente reactivos (radicales libres, formas superóxido) que pueden dañar las proteínas, membranas y ácidos nucleicos produciendo la muerte de las bacterias.

El potencial es una medida de la relación de oxidación y reducción de las especies involucradas en un sistema electroquímico.

En los sistemas electroquímicos, indica la cantidad de energía libre del sistema donde hay equilibrio químico y potencial eléctrico relacionado con la ecuación 5:

$$\Delta G = -nFE^0 \quad (5)$$

El potencial redox es aplicado en sistemas donde existe actividad bacteriana, debido a que los microorganismos catalizan las reacciones de oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} , durante su metabolismo de acuerdo con la ecuación de Nernst.

$$E = E^0 + \frac{2.303RT}{nF} \text{Log} \left[\frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \right] \quad (6)$$

Donde:

E, es el potencial del sistema.

E^0 , es el potencial estándar del par $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$.

n, es el número de electrones intercambiados durante la reducción.

F, es la constante de Faraday.

R, constante universal de los gases.

T, es la temperatura absoluta del sistema.

$[\text{Fe}^{3+}]$ y $[\text{Fe}^{2+}]$, son las concentraciones de los iones férrico y ferroso respectivamente.



Sustituyendo los valores correspondientes obtenemos la ecuación 7:

$$E = 0.77 + 0.059 \text{Log} \left[\frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{Fe}^{2+}]} \right] \quad (7)$$

Con lo que podemos observar claramente que el potencial del sistema es directamente proporcional a la razón $[\text{Fe}^{3+}] / [\text{Fe}^{2+}]$, por lo que al disminuir el valor de la concentración de Fe^{2+} y aumentar el valor del ion Fe^{3+} , aumentará el potencial del sistema.

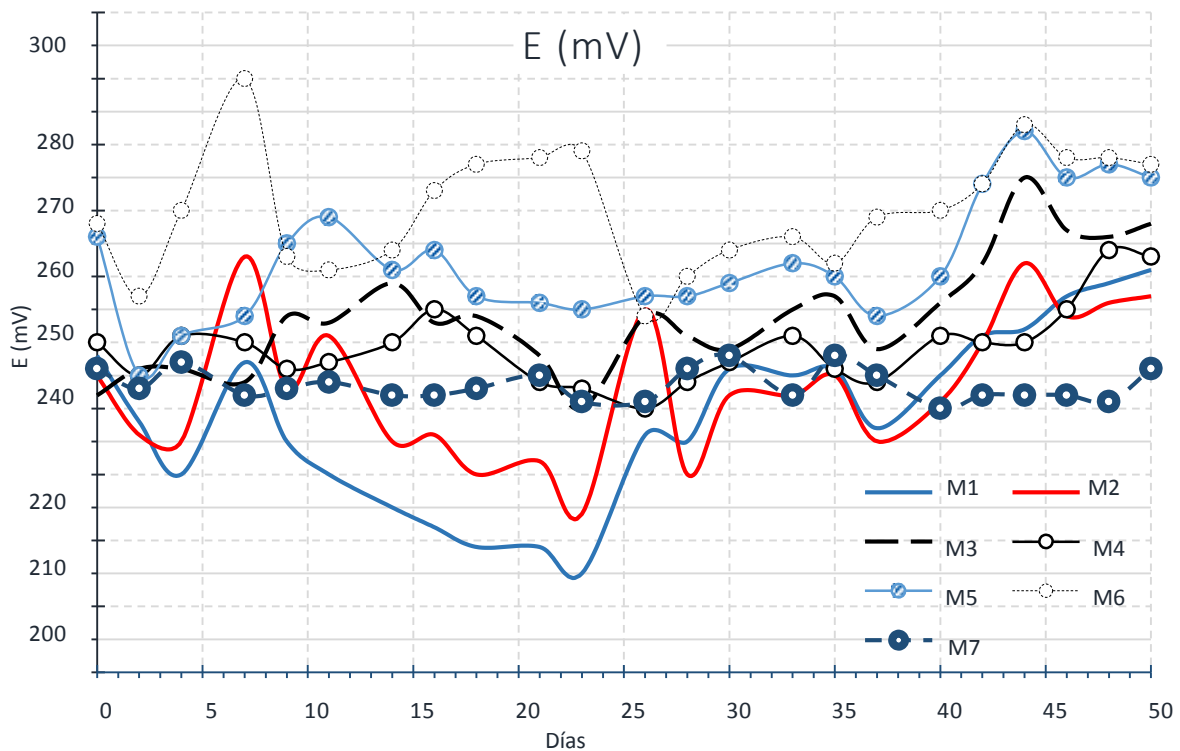


Figura 17. Potencial oxido-reducción, E (mV), en los 7 sistemas de estudio.

En figura 17, observamos que el potencial inicia en un rango de 242 - 268 mV, con respecto al electrodo de referencia $\text{Ag}^{\circ}/\text{AgCl}$.



Cuando el potencial se incrementa es indicativo de el consumo de hierro II, determinado por la ecuación 7, $[Fe^{3+}]/[Fe^{2+}]$, cuando hay mayor concentración de ferroso el potencial tiende a disminuir, y cuando hay más férrico el potencial aumenta, al mismo tiempo esto se ve relacionado con el crecimiento bacterial en los sistemas (M1 a M6), debido a el consumo de los elementos requeridos para realizar las reacciones químicas de oxidación, como medio de energía para su crecimiento poblacional.

En los primeros 4 días se observa que el potencial tiende a disminuir en los seis sistemas que contienen bacterias, indicando que la concentración en la solución del ion Fe^{2+} es mayor que la concentración de Fe^{3+} , debido a la etapa de adaptación de las bacterias al medio. En la fase de crecimiento se observa que el potencial tiende a aumentar, como lo muestra el sistema M6 que tiene un potencial de 290 mV a los 23 días. Después de nueve días el potencial en los sistemas M1 y M2, disminuye, debido a que estos sistemas presentan muy poca liberación del hierro debido a una baja actividad bacteriana y por tanto menor crecimiento de microorganismos, como se observa en la gráfica 6, en comparación del resto de los sistemas los cuales muestran el doble de bacterias/ml, como el sistema M6. Cuando los 6 sistemas se encuentran en la fase estacionaria, a partir de los 23 días logran subir el potencial. Se observa el incremento en el potencial, hasta un periodo de 44 días. Los sistemas que presentan potenciales altos con respecto a los demás sistemas son los M5 y M6. El potencial del sistema testigo se mantuvo prácticamente constante en el periodo de tiempo que duró la experimentación, presentando un E de 246 mV desde el inicio de la experimentación



4.2.1.4. CONDUCTIVIDAD K (μS)

La conductividad es un parámetro rutinario en muchas aplicaciones industriales y del medio ambiente debido a que es un método rápido, barato y fiable para poder medir el contenido iónico de las soluciones.

En la figura 18 se observa la evolución de la conductividad K (μS) en los 50 días que dura el experimento. Todos los sistemas incluyendo el sistema testigo presentan tendencia a disminuir la conductividad.

Los sistemas que contienen una menor población bacteriana, M1, M2, M3 y M4, muestran tendencia a una conductividad más baja, que los sistemas M5 y M6, que presentan mayor población bacteriana y una conductividad más alta.

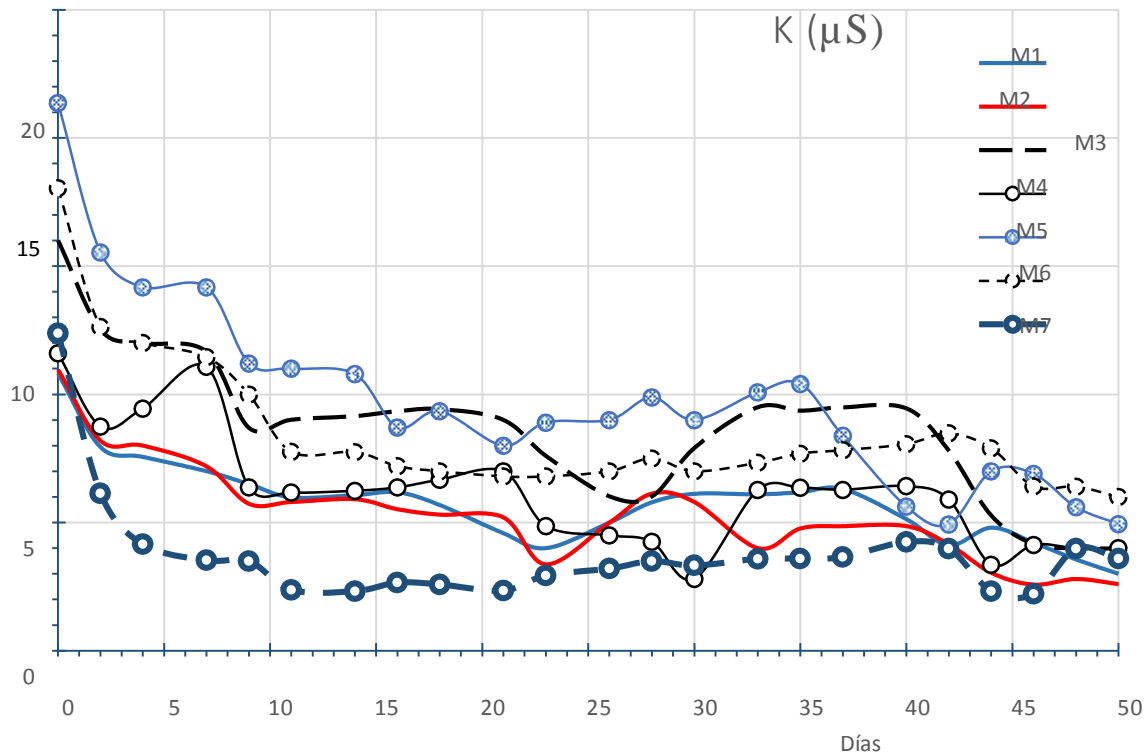


Figura 18. Conductividad K (μS) en los 7 sistemas de estudio.

Durante los primeros 10 días la disminución de la conductividad es muy marcada, debido a que el mineral está en equilibrio con el medio acuoso consume H^+ y la conductividad disminuye fuertemente. Estos días corresponden también a la fase de adaptación de los microorganismos en la solución. Del día 10 hasta el día 40 se observa que la conductividad se mantiene aproximadamente constante. Alrededor el día 40 hasta al término del experimento disminuye de nuevo la conductividad como por ejemplo se observa en el cultivo M6.

El sistema testigo M7 es el que presenta menor conductividad, debido a que este sistema sólo contiene al concentrado de magnetita en el medio 9K, en el cual solo se presentan las reacciones de hidrólisis de el mineral.



4.2.1.5. % DISOLUCIÓN DE HIERRO

Se monitorearon las concentraciones de Fe total, Fe²⁺ y Fe³⁺ en los siete sistemas de estudio, cada 48 horas.

4.2.1.5.1 % Fe²⁺ EN SOLUCIÓN

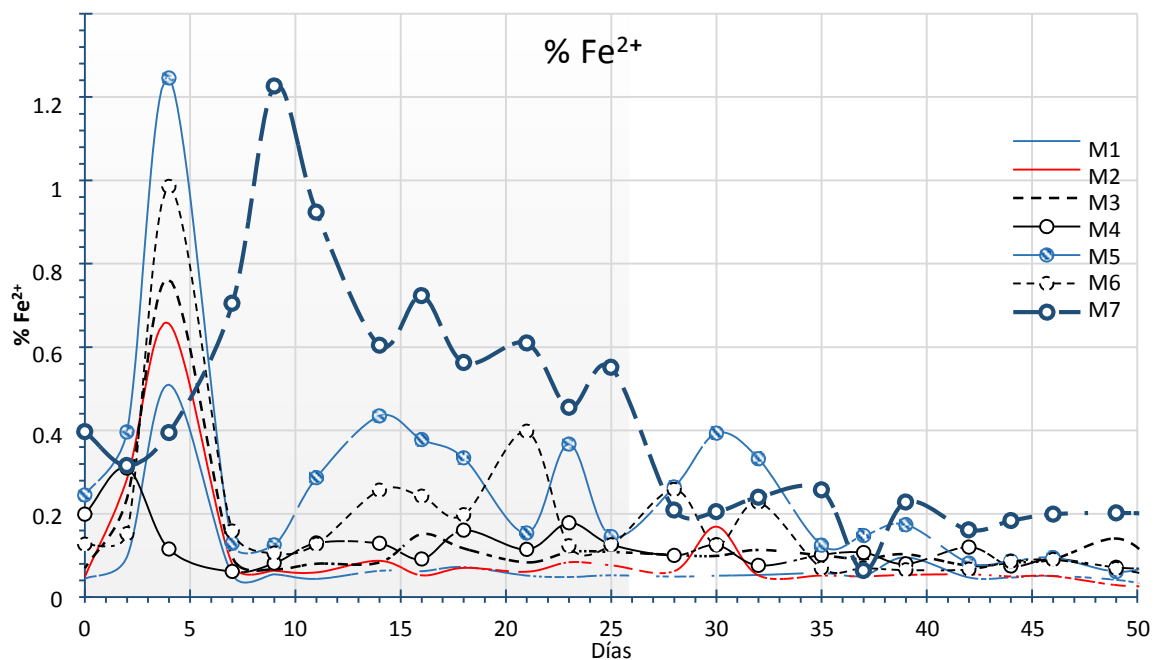


Figura 19. % de Fe²⁺ en solución en los 7 sistemas de estudio.

En la figura 19 observamos la evolución del %Fe²⁺ de los seis cultivos que *Acidithibacillus Ferroxidans* (M1, M3 y M5) y *Acidithiobacillus Thiooxidans* (M2, M4 y a testigo M7 que no contiene bacterias. En el día cero los sistemas M1, M2, M3, M4 con un cantidad menor a 0.2 %Fe²⁺, los sistemas M5 0.24 %Fe²⁺ y M7 0.4%Fe²⁺. En de los el %Fe²⁺ alcanza un máximo en 4 días en los sistemas M1, M2, M3, M4, M5 y un 1.2 % en el sistema M5 sistema que contiene a



Acidithiobacillus ferrooxidans, oxidante de hierro y azufre, observamos que en la fase estacionaria este sistema mantiene el %Fe²⁺ en 0.4% con tendencia a disminuir y a incrementarse cuando llega a la fase muerte bacteriana, donde la tendencia disminuye manteniéndose por debajo de 0.2%Fe²⁺, en el sistema M6 el máximo es de 1%Fe²⁺.

Se observa que los sistemas M5 y M6 que contienen mayor %Fe²⁺ son los sistemas con mayor crecimiento bacteriano. El sistema testigo M7 presenta disolución de ferroso similar a M5 pero en un mayor tiempo.

4.2.1.5.2 % Fe³⁺ EN SOLUCIÓN

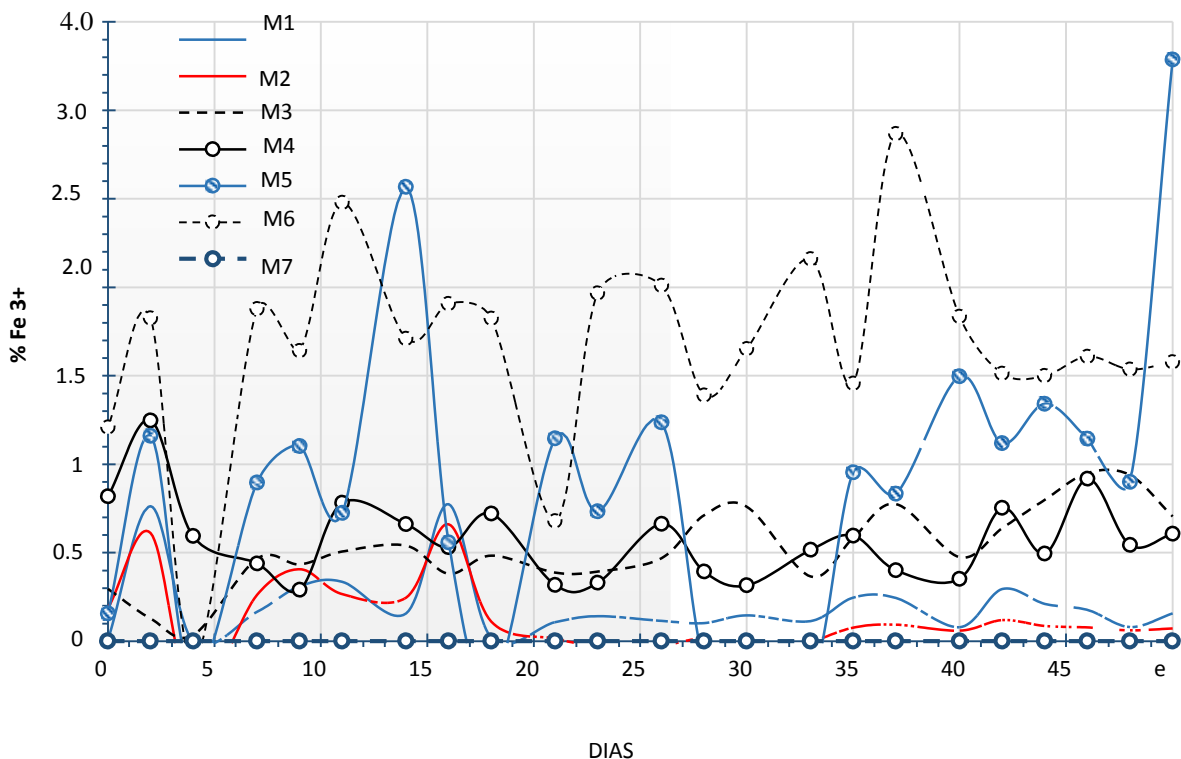
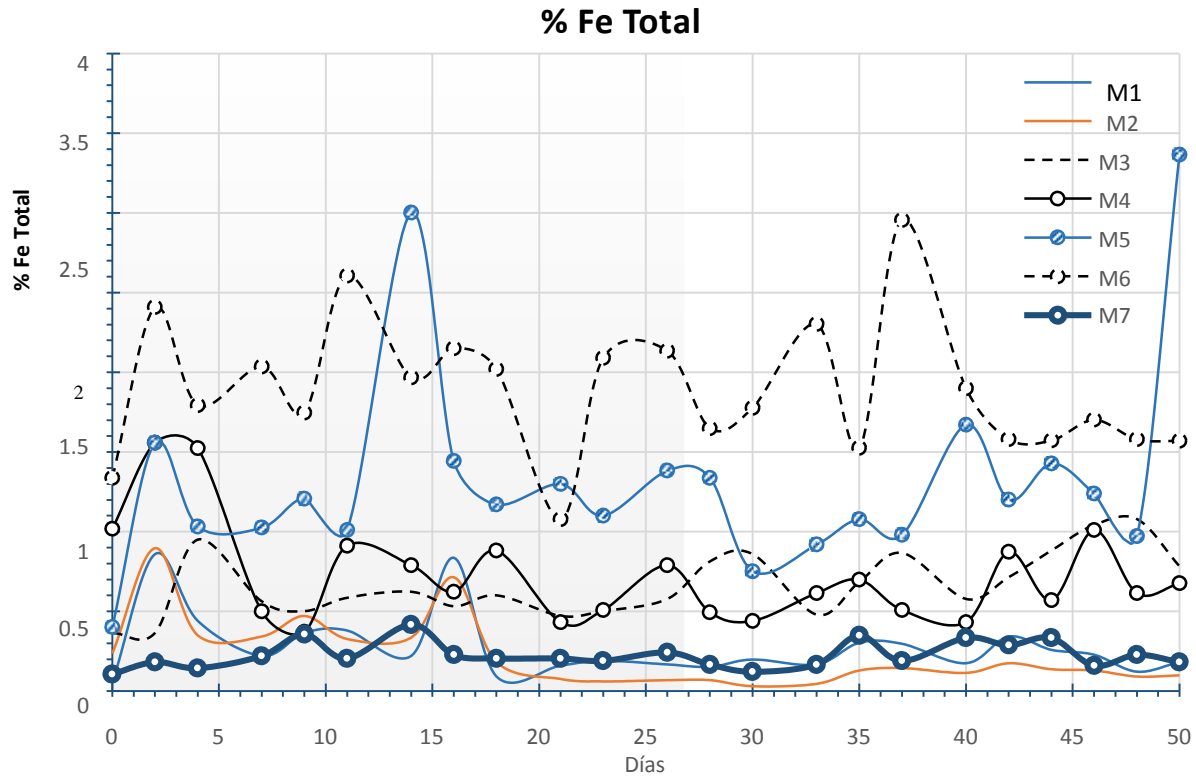


FIGURA 20 % de Fe en solución de los sistemas en estudio

En la figura 20, tenemos las curvas de los 6 cultivos que contiene a los microorganismos *Acidithiobacillus Thiooxidans* y *Acidithiobacillus Ferrooxidans*, y la curva del sistema testigo M7 que no contiene bacterias. La obtención del Fe^{3+} es debido a la oxidación del ion Fe^{2+} al ion Fe^{3+} , debido a los microorganismos que catalizan la oxidación del ion Fe^{2+} a ion Fe^{3+} . Los sistemas donde se observa un mayor % Fe^{3+} son los cultivos de mayor población bacteriana, M5 y M6. En la figura 21 (% Fe^{2+}) se observa que estos cultivos son los que presentan el mayor % de liberación del ion ferroso, en comparación con el resto de los sistemas, se explica que a mayor población bacteriana mayor liberación del ion Fe^{2+} , por lo tanto la oxidación de este elemento da como resultado mayor concentración de ion férrico en solución. En el sistema M6 el % Fe^{3+} es de 1.2% al día cero, 2.87% al día 37, disminuyendo al final a un 1.51% en el día 42 y hasta el término de la biooxidación. El sistema M5 muestra el mayor % Fe^{3+} con respecto a los sistemas de estudio M1, M2, M3 y M4 que van de un 0.5 % Fe^{3+} a 0 % Fe^{3+} . En el sistema testigo M7 no existe % Fe^{3+} debido a que el ion Fe^{2+} liberado en el sistema no fue oxidado por microorganismos.

4.2.1.5.3 % Fe TOTAL EN SOLUCIÓN

El % Fe total es un indicativo del Hierro que se encuentra en la solución de biooxidación, el Fe es el elemento en mayor proporción en el concentrado de magnetita, pero no es el objeto de estudio en esta investigación lograr su disolución, sino la de los sulfuros presentes en el concentrado. Este elemento es básico para la reproducción bacteriana debido a que es la fuente de energía de las bacterias *Acidithiobacillus Thiooxidans* y *Acidithiobacillus Ferrooxidans* utilizadas, responsables de la baja oxidación que se lleva a cabo en los sistemas M1, M2, M3, M4, M5 y M6.



1Figura 21. % de Fe Total en solución en los 7 sistemas de estudio.

En la figura 21 podemos observar que los sistemas que presenta una mayor disolución de hierro, son los que contienen un crecimiento poblacional grande de bacterias, como M5 y M6. El sistema M5 presenta una mayor disolución que el resto de los sistemas con un % de Fe en solución de 3%, en un periodo de 14 días correspondiente a la fase estacionaria de las bacterias, este sistema contiene a los microorganismos *Acidithiobacillus Ferrooxidans* que liberan al hierro, debido a que el Fe se encuentra combinado con el azufre. El sistema M6, presenta este mismo comportamiento, a los 40 días se observa su máxima liberación del Fe con aproximadamente un 3% en la solución. En los demás sistemas observamos que la liberación del hierro es menor y ésta depende del crecimiento de los microorganismos en los sistemas. Se observa que entre menor sea la población bacteriana, como lo muestran los sistemas M1 y M2, el %Fe total es mucho menor a 1% disminuyendo a cero, en M3 y M4 el rango es de 0,5 y 1%. El sistema testigo M7 no supera el 0.5% de Fe total en la solución



4.3. CARACTERIZACION DEL RESIDUO DE MAGNETITA.

4.3.1 ANÁLISIS MORFOLÓGICO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB) DEL RESIDUO DE BIOOXIDACIÓN.

El análisis morfológico mediante el microscopio electrónico de barrido (MEB) del residuo de biooxidación muestra los siguientes resultados (figura 22).

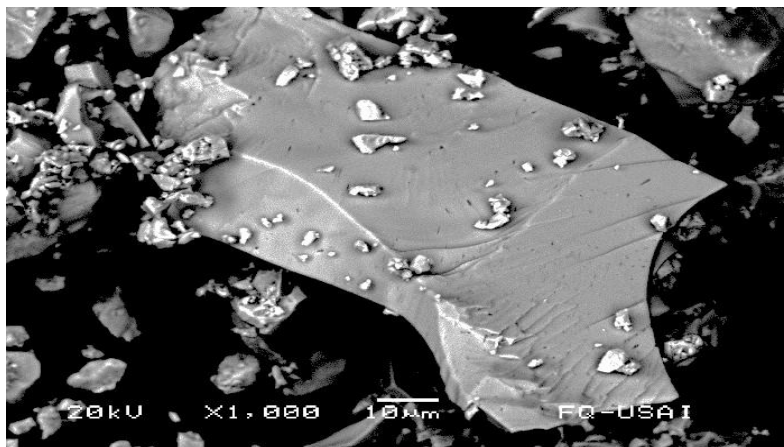


Imagen 22. Imagen de una partícula del concentrado de magnetita después de someterla a la biooxidación bacteriana. Imagen vista a 1000X.

La figura 22 corresponde a una partícula del concentrado de magnetita del residuo de biooxidación, la cual fue sometida al pretratamiento durante 50 días. En su superficie se observan algunas huellas características de ataque bacteriano, algunas picaduras e indicios de poros o canales, debido a la disolución, impurezas presentes de sulfuros metálicos tales como piritita, en comparación con la figura 13, correspondiente a la micrografía de una partícula de magnetita antes de ser sometida al proceso de biooxidación, en la que se observa que la superficie está totalmente limpia.

5. CONCLUSIONES

La biooxidación parcial del concentrado de magnetita como pretratamiento fue satisfactoria, alcanzando una disolución máxima de Fe total del 3.4%, (figura 23) en presencia de bacterias y del 0.5% en ausencia de éstas.

Los sistemas con bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, biooxidaron los sulfuros en un menor tiempo que las bacterias *Acidithiobacillus Thiooxidans*.

Las bacterias autóctonas del concentrado de magnetita presentaron el menor crecimiento bacterial y por tanto la menor disolución de hierro (sistemas M1 y M2).

Las bacterias *Acidithiobacillus Thiooxidans* del sistema M1 disminuyen el pH más rápido que las bacterias *Acidithiobacillus Ferrooxidans* del sistema M2.

Los microorganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans* Noche Buena y los *Acidithiobacillus thiooxidans* P11, sistemas M3 y M4, tuvieron un mejor adaptación al mineral, presentando un mayor crecimiento bacterial en comparación con los microorganismos autóctonos o nativos.

Los microorganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans* Noche Buena y *Acidithiobacillus thiooxidans* P11, con medio 9K sin MgSO₄, sistemas M5 y M6, presentaron el mayor crecimiento bacterial, mayor disolución de hierro, y menor pH.

La biooxidación resultó ser una técnica viable para eliminación de sulfuros presentes en el concentrado de magnetita. Debido a que los microorganismos tuvieron un comportamiento característico de un biolixiviación.

Las bacterias presentaron un comportamiento típico, alta acidez del medio y alta población bacteriana, el potencial oxido-reducción y la disolución de fierro, fueron muy bajos, debido a una biooxidación mínima consecuencia del bajo contenido de sulfuros metálicos presentes en el concentrado.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1]. TARBUCK, E. J. & LUTGENS, F. K. (2005). CIENCIAS DE LA TIERRA, 8ª EDICIÓN. PEARSON EDUCACIÓN S. A., MADRID. ISBN 84-205-4400-0.

[2] APRAIZ BARREIRO, JOSE (1978). FABRICACIÓN DE HIERRO ACERO FUNDICION, PÁGS. 17-50. TOMO 1.1ED. ESPAÑA.

[3]. PROPIEDADES FÍSICAS DEL HIERRO. LIBRO DE LA WEB DE QUÍMICA. NIST, NACIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY CONSULTADO MAYO 20 DE 2015.

[4] ANTONIO BALLESTER, JOSÉ SANCHO, LUIS FELIPE VERDEJA (1995). METALURGIA EXTRACTIVA PROCESOS DE OBTENCIÓN, PÁGS. 18-50. VOL 1 y 2, ED. SINTESIS, ESPAÑA

[5] SCHWUITMAN. U. AND CORNELL.R. M. (1996). THE IRON OXIDES. WENHAM. VCH. 57.

[6] HABUSHI, F.(1970) PRINCIPLES OF EXTRACTIVE METALURGY ED. GARDE. VOLII PÁG,7-23

[7] JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ CORREA (1997). ESTUDIOS DE XANTATO RESIDUAL EN LA FLOTACIÓN DE SULFUROS PRESENTES EN UN CONCENTRADO DE MAGNETITA. UNAM, FACULTAD DE QUIMICA PAGS. 1-8.

[8] BIANCHI, ANA ELISA (2012). ÓXIDOS BINARIOS ANTI-FERROMAGNÉTICOS DE METALES DE TRANSICIÓN: RELACIÓN ESTRUCTURA PROPIEDAD EN NANO ESTRUCTURAS. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA, 1A ED. LA PLATA ARGENTINA, ISBN 978-950-34-0862-9.*

[9]. EN: DIRECCIÓN DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS PÚBLICAS MERCADO INTERNACIONAL DEL HIERRO Y EL ACERO (AÑO). VÍCTOR GARAY L.

[10]. EN:INFORME DE WORLD STEEL ASSOCIATION 2013.

[11]. EN:INFORME DE WORLD STEEL ASSOCIATION 2014.

[12] EN: MERCADO INTERNACIONAL DEL HIERRO Y ACERO. MACQUARIE RESEARCH, COMMODITIES, SEPTIEMBRE 2014.

[13] EN: COORDINACION GENERAL DE MINERIA, PERFIL DEL MERCADO DE HIERRO – ACERO DIC. 2014, PÁG. 123.

[14] MITCHEL ABRAHAM RUIZ ROBLES, (2013) NANOPARTICULAS NUCLEO-CORAZA DE MAGNETITA PARA LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE ADN UNAM., POSGRADO DE CIENCIAS Y MATERIALES. 12-13.

[15]. BURKLE, L.H. & DELANEY, J. (1999): TERRESTRIAL MICROFOSSILS IN ANTARTIC ORDINARY CHONDRITES. *METEORIT. PLANET. SCI.*, 34, 475-478-

[16]. SERGIO RODRÍGUEZ CEJA (2005) ESTUDIO DE DEULFURIZACIÓN EN MINERALES DE PEÑA COLORADA, UNIVERSIDAD DE COLIMA, FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS PÁGS 2-37.

[17] CHAING, C. L.SOUNG AND CHEN.C-Y. (2006) APLICATION OF SILICE-. MAGNTITE NANOCOMPOSITES TO THE ISOLATION OF ULTRAPUR PLASMID DNA FROM BACTERIAL CELL. *JOURNAL OF MAGNETIC MATERIAL* 305, 483-490.

[18] M. FARAJI, Y. YAMINI Y M. REZAEI (2010) MAGNETIC NANOPARTICLES: SYNTHESIS, ESTABILITATION, FUNOTONALIZACION, CHARACTERISTIZACION AND APLICATIONS, *JOURNAL OF THE IRANIAN CHEMICAL SOCIETY*, VOL. 7 1-37

[19] KELLY, D.P., Y WOOD, A.P. (2000) "RECLASIFICACIÓN DE ALGUNAS ESPECIES DE THIOBACILLUS AL NUEVO GÉNERO DESIGNADO ACIDITHIOBACILLUS GEN. NOV., HALOTHIOBACILLUS GEN. NOV. Y THERMITHIOBACILLUS GEN. NOV." *INT. J. SYST. EVOL. MICROBIOL.* 50: 489-500.

[20]. BRIELEY (1997), MINING BIOTECHTONOLOGY RESEARCH TO COMERCIAL DEVLOPMEN AND BEYOND IN BIOMINING D.E. RAWLING (EDITOR) GERMANY.

[21]. TORTORA, G., FUNKE, B & CASE, C. (2007). INTRODUCCIÓN A LA MICROBIOLOGÍA (9 ED). BUENOS AIRES: MÉDICA PANAMERICANA.

[22]. A.R. COLMER, M.E. HINKLE, THE ROLE OF MICROORGANISMS IN ACID MINE DRAINAGE: A PRELIMINARY REPORT. *SCIENCE. PP. 253-256. AÑO?*



[23]. OLSON, G. J.; KELLY, R. M., (1986). *MICROBIOLOGICAL METAL TRANSFORMATIONS: BIOTECHNOLOGICAL APPLICATIONS AND POTENTIAL. BIOTECHNOL. PROGRESS. 2(1): PP. 1-15.*

[24] ESTEBAN M. DOMIC (2001). HIDROMETALURGIA FUNDAMENTOS PROCESOS Y APLICACIÓN 1ER. ED. CHILE. PÁGS. 315-332.

[25]. BROCK, T. & M. MADIGAN. (1993). MICROBIOLOGÍA. 6TA EDICIÓN. PRENTICE HALL HISPANOAMÉRICA S. A. MÉXICO PÁGS. 27.

[26]. TRIBUTSCH H. (2001). DIRECT VERSUS INDIRECT BIOLEACHING. *HYDROMETALLURGY 59, 177–185.*

PÁGINAS WEB CONSULTADAS:

[27]. WWW.ECONOMIA.GOB.MX. CONSULTADO EL 27 DE MAYO 2015.

[28]. WWW.SGM.GOB.MX/PDFS/COLIMA/PDF. CONSULTADO EL 30 DE MAYO 2015.

[29]. WWW.WOLDSTEEL.COM. CONSULTADO EL 2 DE JUNIO 2015

[30]. WWW.BIOLOGIA.EDU.AR/BACTERIAS/ARQUEOBACTERIAS.HTM.
CONSULTADO EL 6 D JUNIO DL 20015

[31]. WWW.BIOTECH.BIOETICA.ORG. CONSULTADO EL 10 DE JUNIO 2015.

[32]. WWW.INNOVACIONMINERA.MX. CONSULTADO EL 16 DE JUNIO 2015.

