



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E  
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES

“BIOLIXIVIACIÓN DE COBRE A  
PARTIR DE CHATARRA  
ELECTRÓNICA”

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO EN METALURGIA Y MATERIALES

PRESENTA:

BRENELY GONZÁLEZ PENGUELLY

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. ÁNGEL DE JESÚS MORALES RAMÍREZ



MAYO 2010

## Índice

Resumen	2
Introducción	3
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Hipótesis	4
Capítulo 1	
Antecedentes	5
1.1 El cobre	5
1.2 Usos del cobre	6
1.3 Proceso de producción de cobre	7
1.3.1 Extracción de cobre a partir de menas de óxido: Hidrometalurgia	7
1.3.1.1 Extracción por solventes	11
1.3.1.2 Separación por electrólisis	11
1.3.1.3 Fundición y colada del cobre	11
1.3.2 Extracción de cobre a partir de menas sulfuradas	12
1.3.2.1 Concentración por flotación de espuma	14
1.3.2.2 Tostación	14
1.3.2.3 Fundición de matas	14
1.3.2.4 Refinación térmica y electrorrefinación del cobre blister	15
1.4 Biolixiviación	16
1.4.1 Tipos de agentes biolixiviantes	20
1.5 Ejemplos de procesos de biolixiviación	21
1.6 Hongo <i>Aspergillus Niger</i>	24
Capítulo 2	
Desarrollo experimental	26
2.1 Materiales y equipo	27
2.2 Preparación de la chatarra	28
2.3 Preparación del medio de cultivo	29
2.4 Cultivo del hongo <i>Aspergillus Niger</i>	31
2.5 Biolixiviación	34
2.6 Filtrado	36
2.7 Espectrofotometría de absorción atómica Cu, Ag, Fe	37

Capítulo 3	
Resultados y discusión	38
3.1 Determinación de tipo de hongo eficiente	38
3.1.1 Medición del pH	39
3.1.2 Medición de la cantidad de azúcar	41
3.1.3 Cantidad de Cu lixiviado	44
3.1.4 Cantidad de hierro recuperado	46
3.1.5 Cantidad de plata lixiviada	48
3.2 Efecto de la temperatura y agitación	49
3.2.1 Medición del pH	50
3.2.2 Medición de la cantidad de azúcar	51
3.2.3 Cantidad de cobre lixiviado	52
3.2.4 Cantidad de hierro lixiviado	54
Capítulo 4	
Conclusiones	56
5. Bibliografía	58

## Índice de figuras

Fig.	Pág.
I. Usos del cobre.	7
II. Procesos principales para la extracción de cobre a partir de menas de óxido.	10
III. Procesos principales para la extracción de cobre a partir de menas de sulfuro.	13
IV. Celdas de refinación de cobre.	15
V. Mecanismos del papel microbial en la biolixiviación.	19
VI. Micrografías de <i>Aspergillus Níger</i> .	25
VII. Diagrama del desarrollo experimental.	26
VIII. Limpieza manual de la chatarra.	28
IX. Chatarra triturada.	29
X. Medio biológico.	30
XI. Autoclave.	31
XII. Zona segura para la inoculación.	31
XIII. Asa bacteriológica o de inoculación.	32
XIV. Proceso de inoculación.	33
XV. Incubadora.	34
XVI. Diferentes hongos de la familia <i>Aspergillus Níger</i> utilizados en la experimentación.	35
XVII. Potenciómetro.	36
XVIII. Difractómetro.	36
XIX. a) Filtro al vacío y b) Filtros del No. 1822024 marca Whatman.	37
XX. Equipo de absorción atómica.	37
XXI. Medición de pH para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	39
XXII. Medición de pH para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	39
XXIII. Medición de pH para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	40
XXIV. Medición de azúcar para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	42

XXV.	Medición de azúcar para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	42
XXVI.	Medición de azúcar para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	43
XXVII.	Medición del % de Cu para el Hongo 1 a temperatura ambiente sin agitación.	44
XXVIII.	Medición del % de Cu para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	44
XXIX.	Medición del % de Cu para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	45
XXX.	Medición del % de Fe para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	47
XXXI.	Medición del % de Fe para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	47
XXXII.	Medición del % de Fe para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	48
XXXIII.	Medición del pH para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	50
XXXIV.	Medición del pH para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	50
XXXV.	Medición del azúcar para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	51
XXXVI.	Medición del azúcar para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	52
XXXVII.	Medición del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	52
XXXVIII.	Medición del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	53
XXXIX.	Medición del % de Fe para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	54
XL.	Medición del % de Fe para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	54

## Índice de tablas

Tabla	Pág.
I. Principales propiedades físicas químicas del cobre .	6
II. Ejemplos de procesos de biolixiviación.	22
III. Reactivos utilizados.	27
IV. Equipo utilizado.	27
V. Composición del medio de cultivo.	29
VI. Valores de pH para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	61
VII. Valores de pH para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	61
VIII. Valores de pH para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	62
IX. Valores de azúcar para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	62
X. Valores de azúcar para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	62
XI. Valores de azúcar para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	63
XII. Valores del % de Cu para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	63
XIII. Valores del % de Cu para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	63
XIV. Valores del % de Cu para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	64
XV. Valores del % de Fe para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	64
XVI. Valores del % de Fe para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	64
XVII. Valores del % de Fe para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	65
XVIII. Valores del % de Ag para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.	65
XIX. Valores del % de Ag para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.	65
XX. Valores del % de Ag para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.	66

XXI.	Valores del pH para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	66
XXII.	Valores del pH para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm.	67
XXIII.	Valores del azúcar para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm	67
XXIV.	Valores del azúcar para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm	68
XXV.	Valores del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm	68
XXVI.	Valores del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm	69
XXVII.	Valores del % de Fe para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm	69
XXVIII.	Valores del % de Fe para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 ° C y 100 rpm	70

## **Agradecimientos**

A mi mamá, porque gracias a ti soy quien soy y porque siempre serás además de mi madre eres mi amiga.  
Te quiero.

A mi tía Angelica por brindarme todo su apoyo incondicional y porque sin ella esta tesis no hubiese sido posible.

A mis abuelitos porque toda mi vida han estado conmigo y han hecho mucho por mi.

A mi familia porque son únicos e importantes para mi de muchas maneras.

A mi novio Alberto por ser la alegría de mi vida, por toda su ayuda y su fe depositada en mi. Te amo.

A mis mejores amigos Karen, Ivan, Diana, Miguel y Alfredo que han compartido tantos momentos y me han dado el regalo de su amistad.

A mis amigos que siempre están dispuestos a hacerme sonreír.

Indudablemente al Dr. Ángel por ser uno de los profesores que más me han brindado conocimiento.

Al profesor Odín por el apoyo  
brindado para mi tesis.

A mis sinodales, la Dra. Elia y el  
Ing. Francisco por sus críticas  
constructivas hechas a esta tesis.

Al IPN por ser mi segundo hogar,  
porque las enseñanzas más  
valiosas de mi vida ocurrieron en  
él.

A la ESIQIE por ser la casa de  
estudios que me dio la carrera  
que deseaba.

Y finalmente y no por eso menos  
importante a la vida por ser  
bondadosa conmigo y darme  
tanto.

## Resumen

Los procesos hidrometalúrgicos actuales presentan limitantes cuando se desea procesar minerales de baja ley, sistemas con alta toxicidad o materiales provenientes del reciclado. Para ello, una alternativa es la biolixiviación, que es la interacción entre metales y microorganismos, lo que provoca que los primeros puedan ser disueltos en un medio adecuado. De hecho, es sabido que diversos hongos y microorganismos pueden no solo ayudar a la disolución metálica selectiva, sino también pueden contrarrestar en gran parte el efecto tóxico, como en el caso del presente trabajo, donde se recicla chatarra electrónica mediante el uso del hongo *Aspergillus Niger*, el cual es un hongo muy adaptable y común, por lo que la presente investigación tiene por objeto encontrar las condiciones ideales para llevar a cabo la lixiviación de cobre mediante el hongo *Aspergillus Niger* para el reciclaje de chatarra electrónica.

Las condiciones investigadas fueron: cantidad de la chatarra (0-15 g), temperatura (ambiente y 35 °C), velocidad de agitación (0 y 100 rpm) y tipo de hongo; en un tiempo de 21 días.

Se obtuvo que el hongo 1 favorecía la lixiviación y que las cantidades ideales de chatarra fueron 10 y 15 g a temperatura ambiente, el tiempo de vida del hongo fueron 12 días.

Al aumentar la temperatura a 35 °C y agitar a 100 rpm se redujo el pH y por ende la cantidad de cobre lixiviado aumentó mientras que la vida útil del hongo fueron 21 días.

## **Introducción**

Es bien sabido que los procesos hidrometalúrgicos son ideales para el tratamiento de materiales susceptibles a ser reciclados, debido a que la cantidad de energía para su tratamiento es menor a la necesaria en los procesos convencionales de fusión a altas temperaturas.

Por otro lado, la hidrometalurgia es una opción para la obtención de cobre; sin embargo, su uso se ve limitado para el procesamiento de minerales de baja ley o bien para aquellos que tienen una alta toxicidad, por lo que se requieren nuevos procesamientos para otro tipo de materiales, tales como los de reciclado.

Una alternativa viable es la biolixiviación, ya que al introducir microorganismos que favorezcan la lixiviación se pueden recuperar metales a partir de minerales de baja ley, además de que la interacción entre los microorganismos y el mineral puede contrarrestar el efecto tóxico, por lo que además se convierten en procesos susceptibles de ser usados en el reciclaje.

Otra ventaja apreciable de estos procesos es que la cantidad de metal recuperado aumenta con la ayuda de los hongos o bacterias respecto a los procesos de lixiviación convencionales [1]. Así, y debido a que la cantidad de chatarra electrónica ha crecido exponencialmente en los últimos años, se han buscado procesos que permitan su reciclaje de manera efectiva y a un bajo costo económico y ambiental, emergiendo los procesos de biolixiviación como una alternativa favorable. En el

caso del presente trabajo, se utilizó como agente biológico el hongo *Aspergillus Niger* debido a que es un hongo común, con gran adaptabilidad y resistencia a la toxicidad desprendida de la chatarra electrónica.

De esta manera, el objetivo general es recuperar cobre por medio del reciclaje de chatarra electrónica mediante un proceso de biolixiviación con hongos de la familia *Aspergillus Niger*.

El primero de los objetivos particulares es determinar 2 parámetros esenciales: la cantidad de chatarra que se puede utilizar sin que los iones en la solución la vuelvan tóxica para el hongo y por consiguiente ocasionen la muerte del mismo y segundo, el hongo que resulte ser un mejor lixivante del cobre.

El segundo es analizar el efecto de la temperatura y la agitación en los microorganismos y en la cantidad de cobre y hierro lixiviado.

El trabajo se encuentra basado en la hipótesis de que es posible recuperar Cu a partir de chatarra electrónica utilizando un proceso de biolixiviación.

---

## Capítulo 1

### Antecedentes

En la presente tesis se llevará a cabo una biolixiviación por medio de hongos a partir de chatarra electrónica para lo cual se requiere conocer los siguientes temas para el mejor entendimiento de la misma: el cobre, usos del cobre, proceso de producción de cobre, la biolixiviación, tipos de agentes biolixivantes, ejemplos de biolixiviación y finalmente el hongo *Aspergillus Niger* los cuales se encuentran explicados detalladamente en el presente capítulo.

#### 1.1 El cobre [2]

Elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos.

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de sulfuros minerales como la calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ). Existen minerales oxidados que son la cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), malaquita ( $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$ ), azurita ( $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{CuCO}_3$ ) y crisocola ( $(\text{Cu},\text{Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). La cantidad del mineral primario empleado en la obtención de cobre ha ido disminuyendo regularmente, debido a que se han agotado los minerales de mayor ley y la demanda del cobre ha seguido creciendo.

La tabla I contiene las principales propiedades físicas y químicas del cobre [2].

Tabla I Principales propiedades físicas y químicas del cobre.

<b>Propiedad</b>	<b>Cobre</b>	<b>Unidades</b>
Conductividad eléctrica	58x10 <sup>6</sup>	Sm <sup>-1</sup>
Resistencia eléctrica	0.0172	Ωmm <sup>2</sup> m <sup>-1</sup>
Conductividad térmica	397	W(mK) <sup>-1</sup>
Coefficiente de expansión	17x10 <sup>-6</sup>	cm°C <sup>-1</sup>
Esfuerzo de tensión	200-250	Nmm <sup>-2</sup>
Módulo elástico	116-130	Nmm <sup>-2</sup>
Fuerza de fatiga	62	Nmm <sup>-2</sup>
Densidad	8.96	gcm <sup>-3</sup>
Punto de fusión	1083.4	°C
Calor específico	0.385	J(g °C) <sup>-1</sup>

### 1.2 Usos del cobre [3]

Por sus características de conductibilidad eléctrica y térmica, resistencia mecánica, flexibilidad, resistencia a la corrosión y relación costo-beneficio, el cobre es el metal más utilizado en equipamientos de sistemas eléctricos. El cobre es utilizado en generadores, transformadores, hilos y terminales conductores, astas, placas, terminales y conectores de tierra, motores y equipos eléctricos.

El cobre juega un rol clave en las industrias del transporte, la electrónica, la construcción, la agricultura, la energía, la salud y las nuevas tecnologías, y es un actor fundamental en la explotación minera, la producción de aleaciones, la fabricación de utensilios de

## Capitulo 1 Antecedentes

cocina, equipos químicos y farmacéuticos, monedas y dispositivos anticonceptivos intrauterinos, entre muchas otras aplicaciones.

En la figura I se muestran algunas de los principales usos del cobre.



Fig. I Usos del cobre [3].

### 1.3 Proceso de producción de cobre

#### 1.3.1 Extracción de cobre a partir de menas de óxido

Los minerales oxidados de cobre pueden ser reducidos pirometalúrgicamente a cobre impuro en el alto horno. Sin embargo, las menas de óxido que se explotan en la actualidad tienen una concentración muy baja de cobre para que se utilice la reducción pirometalúrgica directa o para ser concentrados por flotación en

espuma y se tratan por lixiviación mediante  $H_2SO_4$  seguida por la precipitación o electrólisis del cobre de la solución [1].

Más del 20 % del cobre es producido por técnicas hidrometalúrgicas, mientras que la producción mundial de cobre se ha incrementado en el periodo de 1984- 2005. Un indicador indirecto del incremento de la producción de cobre hidrometalúrgico en los años recientes es la mayor producción debida a la introducción de la técnica de extracción por solventes [4].

La mena se prepara para la lixiviación quebrándola (por trituración y molienda si es necesario) para exponer una superficie amplia que permita la extracción eficiente. Después se pone en contacto con un disolvente, casi siempre ácido sulfúrico, ya sea por gravedad en terrenos grandes, por pilas de mena de bajo grado o por agitación mecánica en tinas o tanques para menas de alto grado o concentrados. Existen diversos procesos de lixiviación:

**Lixiviación en terrenos:** Se aplica a los desechos con bajo contenido de cobre provenientes de los métodos comunes de explotación, generalmente operaciones a cielo abierto. La roca se amontona en grandes depósitos (millones de toneladas) y el lixivante se distribuye periódicamente sobre la superficie para que escurra a través del depósito.

**Lixiviación en pilas:** Es exactamente lo mismo que la lixiviación en terrenos sólo que los depósitos de mineral oxidado superficialmente, a diferencia de los desechos de mina, se parten y apilan en montones de 100,000 a 500,000 toneladas. Los materiales sólidos

en los montones son algo más pequeño que los de los depósitos (es decir, menor de 10 cm) y la lixiviación es continua y considerablemente más rápida.

Lixiviación in situ: Implica el rompimiento de la mena in situ con explosivos sin que la mena sea extraída por los métodos más usados en las minas. Esto puede hacerse en depósitos superficiales de baja ley o minas subterráneas ya trabajadas.

Las soluciones resultantes de la lixiviación son tratadas para recuperar el cobre ya sea por precipitación, cementación con hierro o, en caso de soluciones de lixiviación concentradas ( $40 \text{ kg/m}^3 \text{ Cu}^{2+}$ ), por electrólisis. El cobre obtenido por cementación está contaminado con hierro y se vuelve a tratar normalmente en el horno de fundición o convertidor de una fundidora de sulfuros común. El cobre obtenido por electrólisis se funde, se cuela, y se envía normalmente al mercado para usos no eléctricos.

En la figura II se muestran los procesos principales para la extracción de cobre a partir de menas de óxido [1].

## Capítulo 1 Antecedentes

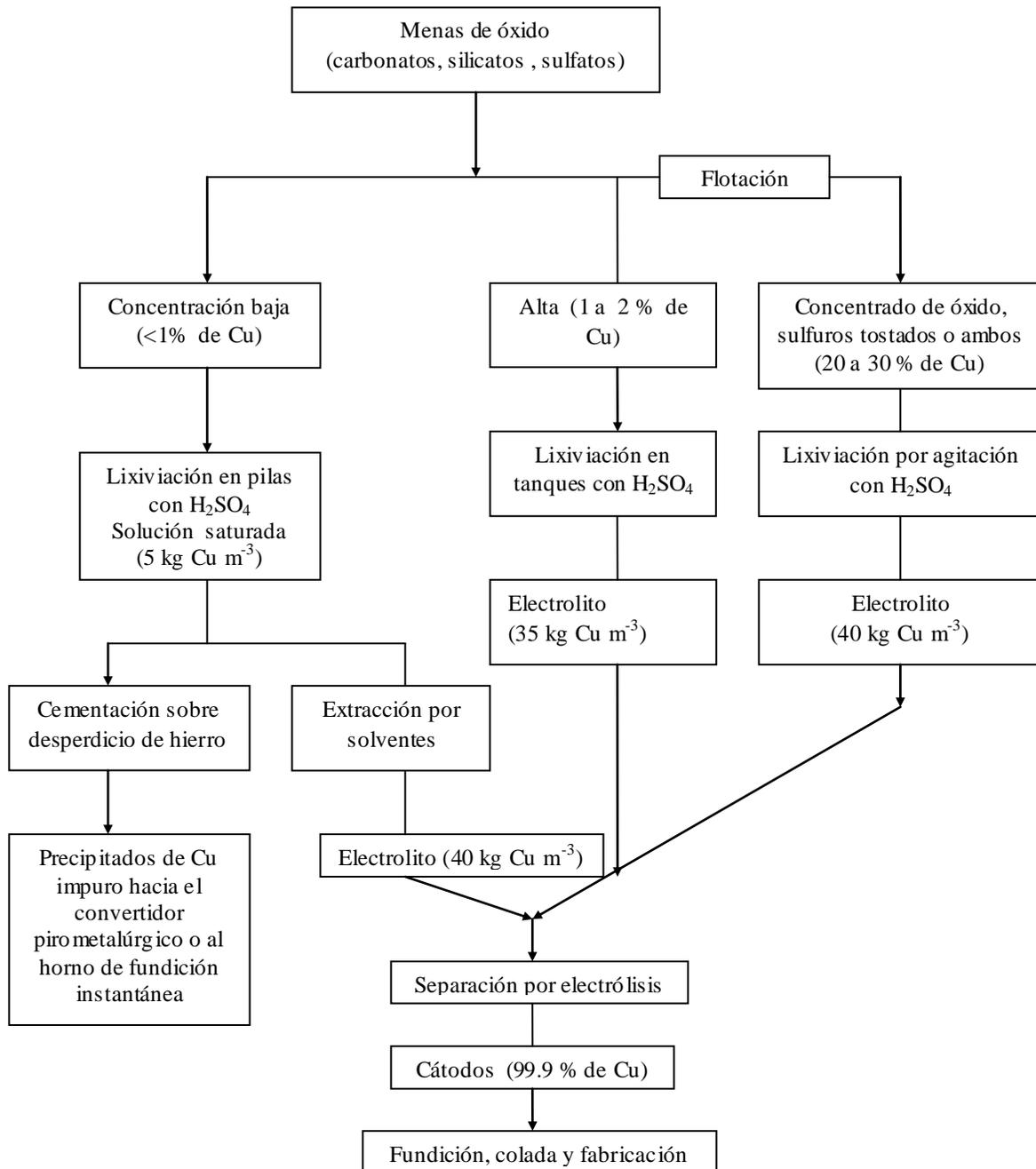


Fig. II Procesos principales para la extracción de cobre a partir de menas de óxido [1].

### **1.3.1.1 Extracción por solventes [1]**

Las soluciones ricas ( $<5 \text{ kg/m}^3$  de Cu) provenientes de la lixiviación en pilas de menas de bajo grado presentan una gran cantidad de cobre disuelto el cual se recuperaba normalmente por cementación con hierro. Para su tratamiento, se han elaborado solventes orgánicos que extraen selectivamente los iones de cobre de dichas soluciones. Posteriormente el cobre se recupera de los disolventes orgánicos con soluciones acuosas muy ácidas (esta etapa es llamada despojo) apropiadas para la separación por electrólisis.

### **1.3.1.2 Separación por electrólisis [1]**

El cobre puede ser recuperado en forma comercial mediante electrólisis de soluciones de lixiviación concentradas o de los electrolitos producidos por las técnicas de extracción por solventes. Esta separación es similar a la electrorrefinación, con la excepción de que en la primera el ánodo se compone de un material inerte, normalmente plomo-antimonio o plomo-calcio.

El cobre se produce en el cátodo, que se forma sobre una base de cobre; el oxígeno se desprende en el ánodo y el ácido sulfúrico se regenera para volver a usarse como lixivante.

### **1.3.1.3 Fundición y colada del cobre [1]**

Los cátodos obtenidos por electrorrefinación y separación electrolítica se funden en una atmósfera reductora controlada para colada en moldes comerciales. La fundición normalmente se lleva a cabo en un horno de tiro vertical.

El producto más común de los cátodos electrorrefinados es el cobre dúctil refinado electrolíticamente; este cobre se cuele constantemente en sistemas integrados de colado y laminación de alambre continuos, o en barras para estirado en moldes horizontales abiertos, ambos para la fabricación de alambres.

### **1.3.2 Extracción de cobre a partir de menas sulfuradas [1]**

Casi el 90 % del cobre que se produce en el mundo proviene de los minerales sulfurados; éstos no se tratan fácilmente con los métodos hidrometalúrgicos (no se lixivian con facilidad) de manera que la mayor parte de la extracción es mediante técnicas pirometalúrgicas. Los primeros en tratarse son los concentrados de cobre. La extracción consiste en las 4 etapas siguientes:

- a) Concentración por flotación de espuma.
- b) Tostación (etapa óptima).
- c) Fundición de matas (En altos hornos, hornos de reverbero, eléctricos o de fundición).
- d) Conversión de cobre *blister*.

Una innovación reciente ha sido combinar b), c) y d) en un proceso continuo; varias combinaciones han alcanzado la etapa comercial.

En la figura III se muestran los procesos principales para la extracción de cobre a partir de menas de sulfuro.

## Capítulo 1 Antecedentes

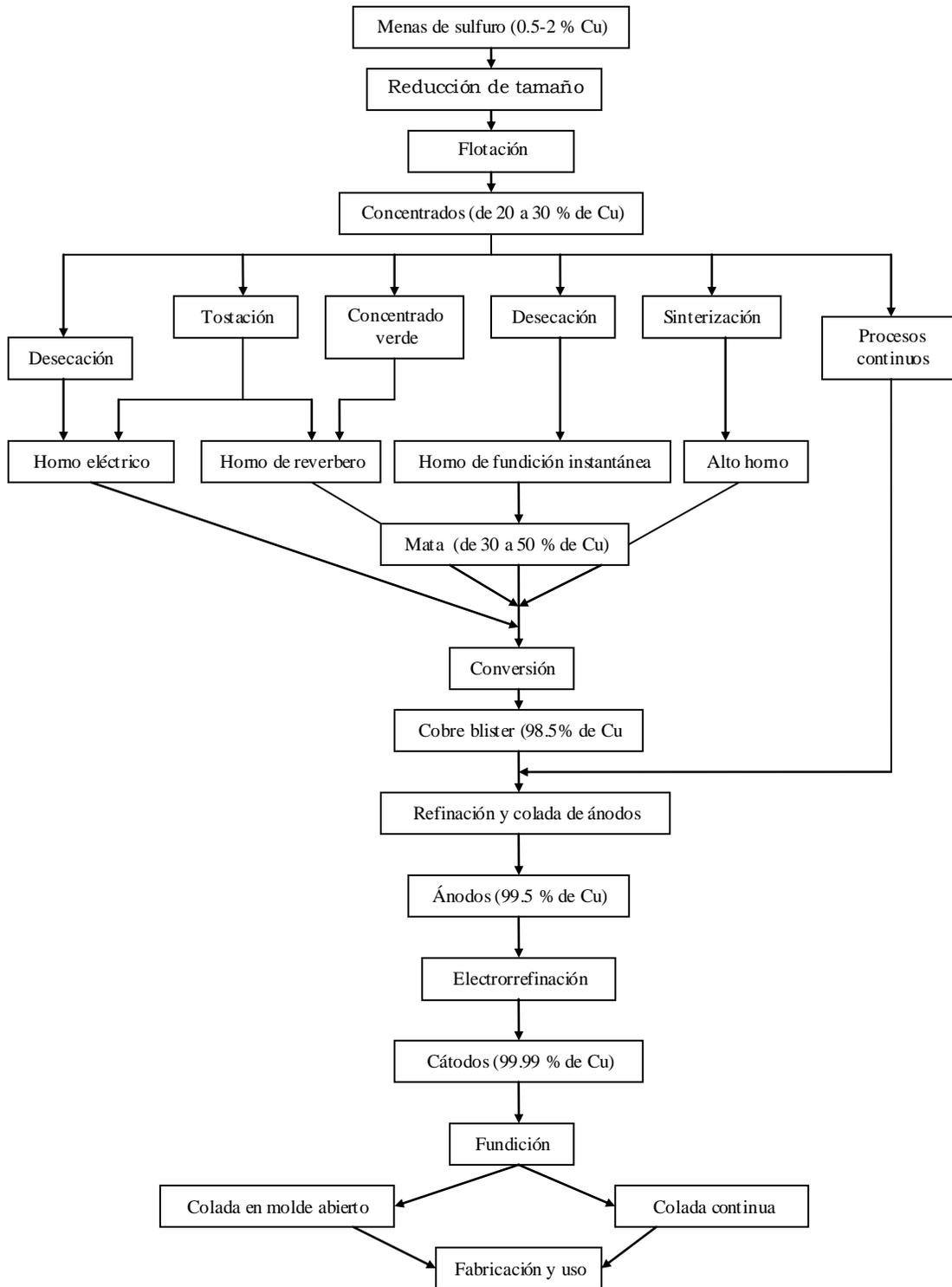


Fig. III Procesos principales para la extracción de cobre a partir de menas de sulfuro [1].

### **1.3.2.1 Concentración por flotación de espuma [1]**

Es un método mediante el cual los minerales de cobre se adhieren selectivamente a las burbujas de aire elevándose a través de la pulpa espumosa. Los minerales “flotados” se mantienen en una espuma estable encima de la celda de flotación, de donde son retirados mecánicamente para formar el concentrado. A la flotación le precede la molienda y pulverización de la mena para obtener partículas finas.

### **1.3.2.2 Tostación [1]**

La tostación consiste en la oxidación parcial de los sulfuros concentrados por flotación y en la eliminación parcial del sulfuro en  $\text{SO}_2$ . Se lleva a cabo cuando los concentrados reaccionan con el aire a temperaturas entre 500 y 700 °C, dentro de tostadores bajo condiciones bien controladas. La tostación tiene como propósito principal la reducción del mineral sulfurado así como secar y calentar la carga del horno, usando el calor de las reacciones exotérmicas de la tostación.

### **1.3.2.3 Fundición de matas [1]**

El objetivo de la fundición de matas es formar una fase líquida de sulfuro (mata) conteniendo todo el cobre de la carga, además de una fase líquida de escoria sin cobre. La mata posteriormente es oxidada para formar cobre *blister* impuro (cobre ampollado) y la escoria fundida se deshecha directamente o después de una etapa de recuperación de cobre. La fusión de matas se lleva a cabo al fundir

la carga total del horno a una temperatura aproximada de 1200 °C normalmente con fundente de sílice.

#### **1.3.2.4 Refinación térmica y electrorrefinación del cobre**

##### ***blister*** [1]

Todo el cobre blister producido mediante los procesos mencionados antes, se refina electrolíticamente para obtener cobre catódico de alta pureza (>99 % de cobre) el cual es apropiado para diversos usos, entre ellos, el eléctrico.

La electrorrefinación requiere ánodos fuertes, planos y delgados que se intercalan con los cátodos en la celda de refinación (figura IV).



. Fig. IV Celdas de refinación de cobre.

La electrorrefinación de cobre consiste en la disolución electroquímica a partir de ánodos impuros y el depósito de cobre puro (es decir, sin las impurezas del ánodo) sobre los cátodos de

cobre. El electrolito es una solución acuosa de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $200 \text{ kgm}^{-3}$ ) y  $\text{CuSO}_4$  ( $50 \text{ kgm}^{-3}$ ) normalmente con una cantidad pequeña de cloro.

### **1.4 Biolixiviación**

La biolixiviación se puede definir como la interacción entre metales y microorganismos, los cuales causan la solubilidad de los primeros, y se basa en la capacidad que presentan diversos microorganismos para transformar componentes sólidos, produciendo elementos solubles y extraíbles que pueden ser recuperados posteriormente por diversos procesos (cementación, electrólisis, etc) [5].

Diversos microorganismos se han empleado para recuperar minerales de menas de bajo grado o baja concentración de manera satisfactoria, dando inicio a la incorporación de los procesos biotecnológicos al procesamiento de metales. De los procesos investigados, la biolixiviación basada en sulfuros metálicos presenta grandes avances respecto al costo comparado con los procesos convencionales de oxidación [4].

La habilidad de diversos microorganismos para lixiviar metales desde materiales sólidos esta basado en 3 procesos: (I) la transformación de ácidos orgánicos e inorgánicos, (II) las reacciones de oxidación y reducción y (III) la excreción de agentes complejos (enzimas) que tienden a catalizar los procesos I y II. [5]

Una de las formas más comunes de la biolixiviación aplicada a nivel industrial es por medio de pilas o montones y es económicamente aprovechada para la explotación de menas de bajo grado. Existen principalmente dos tipos de microorganismos: mesofilicos, que son

aquellos que crecen a una temperatura entre 16 y 40 °C, y los termofilicos, que se desarrollan a temperaturas mayores (hasta 80 °C). La oxidación es asistida microbiológicamente, involucrando una serie de microorganismos que juntos expanden el intervalo de temperatura entre mesofílica y termofílica, es decir, lo expanden de 25-80 °C [6].

La biolixiviación en pilas es aplicada comercialmente para pretratar menas de oro de bajo grado, menas sulfuradas y para lixiviar cobre de menas secundarias. En estos procesos, la descomposición del mineral tiene lugar a diferentes temperaturas, por lo que no existe un mínimo de temperatura establecido para la biolixiviación en pilas y la lixiviación ocurre en los intervalos de temperatura mesofílico y moderadamente termofílico. Esto depende de la generación de calor metabólico y del contenido de ácido sulfúrico de la mena. La flora microbiana es parte de lo que determinará la temperatura ideal del proceso. Por otro lado, el conocimiento de la interacción microbio-mineral ha sido ampliamente estudiado, pero se sabe poco de la interacción microbio- microbio y la progresión debida al calor [7].

La biolixiviación de los minerales de sulfuro ha sido investigada ampliamente por la comunidad que estudia la actividad microbiana (es decir, principalmente por biólogos y biotecnólogos), especialmente en lo relacionado a la formación de enlaces metal-microorganismos y a la creación de biopelículas (colonias de microorganismos adheridos fuertemente a la superficie), ya que el conocimiento de la genética involucrada en estos procesos lleva a beneficios económicos, al poder determinar las condiciones

específicas de crecimiento microbiano así como la cinética del proceso [6].

Al estudiar la biolixiviación de minerales sulfurosos se encontró que generalmente se cataliza con la presencia de un medio ácido que a veces contiene una concentración considerable de hierro (III), el cual proviene usualmente como una impureza del mineral tratado. Así, el contenido de Fe (III) en cualquier sistema de biolixiviación es una medición directa de la actividad microbiana. Por otro lado, la suma de la lixiviación ácida y las interacciones electroquímicas entre minerales sulfurosos y hierro III también contribuyen sobre la eficiencia del proceso.

Los depósitos de menas sulfuradas tienen composiciones mineralógicas variadas y diferentes condiciones climáticas, por lo que representan un hábitat microbial extremadamente complejo y por consiguiente solo una mínima parte de las bacterias oxidantes de hierro y de sulfuros pueden ser aisladas para utilizarse en las menas de mineral sulfurado. Una vez seleccionadas, son caracterizadas fisiológicamente (basándose en las funciones de la bacteria) y filogenéticamente (estudiando su desarrollo evolutivo) y depositadas en bancos de datos. De diversos estudios, se sabe que estos microorganismos son extremadamente acidófilos y crecen óptimamente a un  $\text{pH} < 3$ , por lo que es necesario lograr un control de pH adecuado para conocer la actividad microbiana, al ser determinante en el ciclo de vida del organismo, así como por la relación directa evidente entre acidez y disolución.

El papel microbioal en la biolixiviación de minerales sulfurados presenta dos mecanismos en los minerales sulfurados: El mecanismo indirecto (A): en este la bacteria oxida al hierro II soluble a hierro III y el sulfuro a sulfato. Los iones férricos oxidan los minerales sulfurados en un medio ácido. En el mecanismo de contacto directo (B), los iones férricos oxidan los minerales sulfurados, mediante reacciones químicas entre las bacterias y la superficie mineral y a través de su contacto directo (enzimático), contribuyendo a la disolución del sulfuro. Lo anteriormente explicado se muestra en la figura V.

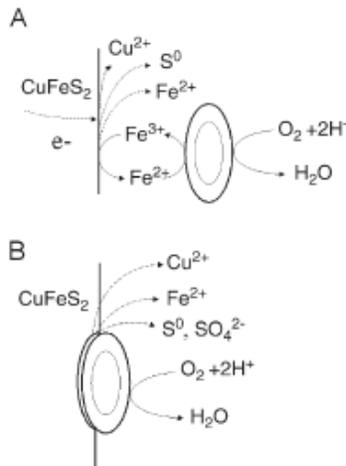


Fig. V Mecanismos del papel microbioal en la biolixiviación.

Una mejor aclimatación de la bacteria a diferentes condiciones, así como su incremento en la tolerancia a metales de alto nivel tóxico, son simplemente mejoras genéticas que dependen solamente de un pequeño número de errores en la secuencia de ADN que se dan durante el ciclo de vida del microorganismo y que son replicados en las siguientes generaciones. De hecho, cuando se realizan cambios de manera selectiva a la población, la bacteria que adquiere una mutación ventajosa podrá modificar y dominar al resto de la misma, beneficiando de manera general al proceso.

La mayoría de los estudios de investigación de biolixiviación de sulfuros persiguen estimar y comparar la capacidad de la bacteria para oxidar diferentes minerales. Esta parte implica la cuantificación bacteriana en un medio particular de lixiviación y la habilidad de la bacteria para cambiar de condiciones. En este caso, la tolerancia del incremento bacteriano para grandes concentraciones de metales pesados es un tema que también debe revisarse con mucha atención.

Existen casos donde la biolixiviación es una operación secundaria con el propósito de procesar las colas, menas de bajo grado o materiales insuficientes para su concentración por metodologías convencionales, para después llevarlos a las condiciones necesarias para su procesamiento.

Industrialmente la biolixiviación se aplica en la recuperación de oro, cobre, uranio y zinc para las menas de baja ley o para recursos minerales de bajo grado [4].

Por ejemplo, el proceso de biolixiviación en pilas se lleva a cabo en la mina de cobre de Zijinshan que es la mina con mayor cantidad de reservas de calcocita en China. Debido a la baja ley y a la cantidad de arsénico presente en las menas, no se puede proceder por los métodos convencionales de flotación seguida por concentración ya que no es costeable, por lo que se ha preferido el uso de un proceso biotecnológico [8].

### **1.4.1 Tipos de agentes biolixiviantes [5]**

Existen tres tipos de microorganismos que se pueden utilizar para la biolixiviación: bacterias, bacterias heterótrofas y hongos. Las bacterias heterótrofas requieren de carbono orgánico (hidratos de carbono y ácidos grasos) para su nutrición, mientras que las no heterótrofas por ejemplo *Thiobacilli autotropica* utilizan una superficie de carbono no orgánico para su crecimiento, lo cual es una ventaja. Por otro lado, la bacteria heterótrofa y el hongo pueden ser utilizados para pH altos.

Las bacterias más comunes y efectivas para la solubilización de Cu pertenecen a las familias: *Thiobacillus ferrooxidans* y *T. thiooxidans*. Sin embargo estos microorganismos son muy sensibles a medios tóxicos.

La tolerancia de los hongos a los metales pesados presenta una ventaja sobre el uso de bacterias. El *Aspergillus* y *Penicillium* son los hongos mejor estudiados y usados en los estudios biotecnológicos.. Industrialmente diversos investigadores han adoptado este método para la extracción de menas de baja ley. La densidad de pulpa óptima para la extracción de metales es solo del 1% para el *Aspergillus Níger*.

### **1.5 Ejemplos de procesos de biolixiviación**

En la tabla II se encuentran una serie de ejemplos de procesos de biolixiviación donde se muestra el elemento que es recuperado, el compuesto a partir del cual se extrae y una breve descripción de los resultados obtenidos.

## Capitulo 1 Antecedentes

Tabla II Ejemplos de procesos de biolixiviación.

Elemento	Compuesto	Descripción
Cr	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$	Se utilizaron los hongos <i>Aspergillus Niger</i> y <i>Aspergillus Fumigatus</i> y una mezcla de la bacteria <i>Acidithiobacillus Ferrooxidans</i> . La temperatura ideal es 45 °C, además la densidad de pulpa alta reduce el porcentaje de recuperación. La máxima solubilización con la bacteria <i>Acidithiobacillus Ferrooxidans</i> fue 40 % con una densidad de pulpa del 2 %, a 30 °C, 150 rpm y 28 días lixiviando. El <i>Aspergillus Niger</i> presentó un 34 % de recuperación de cromita tostada a una densidad de pulpa del 2 % y 32% por <i>Aspergillus Fumigatus</i> a las mismas condiciones [9].
Cu	$\text{Cu}_2\text{S}$	Se usaron las bacterias <i>Mesophiles and Moderate Thermophiles (MT)</i> para determinar cual de las es la mejor lixiante. A una $T_0 = 15$ °C las <i>MT</i> murieron mientras que las <i>Mesophiles</i> proliferaron y posteriormente produjeron calor. La población total de <i>MT</i> es alta sin embargo no lo suficiente para producir una cantidad suficiente de iones férricos para lixiviar. Al aumentar $T_0 = 35$ °C se logró que las <i>MT</i> sobrevivieran y produjeran más calor con lo cual se obtuvieron optimas condiciones para la lixiviación de cobre [10].
Cu	$\text{CuFeS}_2$	Se lixivió la calcopirita con <i>Sulfolobus Metallicus</i> a 70 °C y un pH de 1.7 utilizando una novedosa técnica electroquímica basada en la disolución de calcopirita del electrodo. Este experimento sirvió para analizar la oxidación y reducción de componentes de azufre y calcular la influencia sobre la cinética de disolución del cobre. Los resultados experimentales muestran que se lleva a cabo una oxidación eficiente de los componentes de azufre residual, contribuyendo a un gran incremento de la disolución de cobre. Los resultados revelan que la presencia de microorganismos hace eficiente el proceso de oxidación y remueve las capas pasivas superficiales [11].
Cu	$\text{Cu}_2\text{S}$	Se utilizo la bacteria <i>Leptospirillum ferriphilum</i> , la temperatura óptima para el crecimiento fue 41.3 °C y el intervalo de pH fue de 1.1 a 1.5. Se utilizó una especie de <i>Archaea</i> la especie " <i>Ferroplasma cupricumulans</i> ", el crecimiento ocurre desde 22 °C a 63 °, con una temperatura óptima de 53.6 °C y el pH óptimo fue de 1-1.2 [12].
Cu	$\text{CuS}$	La experimentación columnar se llevó a cabo para comparar la biolixiviación a temperatura ambiente mesofílica (20–23 °C) usando especies de <i>Acidithiobacillus/Leptospirillum/Sulfobacillus</i> y a temperatura hemofílica (60–65 °C) con archaea <i>Acidianus</i> y <i>Metallosphaera</i> . Después de 346 días la biolixiviación de cobre para la bacteria mesofílica fue del 12 al 20 % y la termofílica del 62 al 65 % [13].

## Capitulo 1 Antecedentes

Ni	$\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$	Se utilizó <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , el tiempo de biolixiviación puede ser reducido de 16 a 10 días a un pH de 2, 30 °C, densidad de pulpa del 5 %, cantidad de transferencia de células 10% y una agitación de 180 min <sup>-1</sup> , lixiviación de Ni fue 88 %, Co 78 %, Cu 45 % y Mn ~ 50 %. Se obtuvieron mejores resultados que al lixiviar la mena [14].
Mo	$\text{MoS}_2$	Se utilizó la bacteria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , la extracción fue baja. La extracción de renio fue del 7.3 % mientras que la extracción de molibdeno fue 0.54 %. La cepa nativa de bacteria <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> puede crecer a una media que contiene 250 mgL <sup>-1</sup> de molibdeno por la adición de piritita como una fuente de energía, aproximadamente 3 veces molibdeno que lo que reportó la bacteria inicialmente [15].
Mo	$\text{MoS}_2$	El grado de pureza de la molibdenita aumenta al disminuir el tamaño de partícula, en promedio 3.22 mg Mo m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> a 24 °C. La biolixiviación de molibdenita incrementa con la temperatura por un factor de 2.5 por cada 10 °C hasta llegar a 40 °. La energía de activación fue de 61.2 a 73.4 kJmol <sup>-1</sup> para la lixiviación. Después de un mes se lixivió el 50 % de molibdeno y a los 6 meses un 85 %. La concentración de Mo llegó hasta el 4.4 g/L [16].
Zn	$\text{ZnS}$	Se emplearon bacterias mesofílicas oxidantes de hierro, <i>A. ferrooxidans</i> y termofílicas oxidantes de hierro, <i>S. Termosulfido-oxidans</i> . El mejor pH para ambos microorganismos fue alrededor de 1.5, la temperatura fue determinada como 33 °C para la bacteria mesofílica y 60 °C para la termofílica. Las mayores recuperaciones fueron 75% y 87% respectivamente bajo condiciones óptimas [17].
Zn	$\text{ZnS}$	Se llevó a cabo mediante biolixiviación columnar, la mena contenía principalmente minerales de sulfuro y galena y calcopirita en menor cantidad. Se inoculó con bacterias oxidantes de hierro mesofílicas ( <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> ) y termofílicas ( <i>Sulfobacillus</i> ). En la columna inoculada se formó jarosita y azufre elemental. El grado de lixiviación de la esfalerita se incrementa con la concentración de ion férrico disuelto. La máxima recuperación de Zn se alcanza con la bacteria termofílica y aumenta al reducir el pH. Con la bacteria mesofílica se recupera el 72 % y la termofílica el 85 % después de 120 días y un intervalo de temperatura entre 28 y 42 °C [18].

La revisión bibliográfica mostrada anteriormente, a pesar de ser una muestra relativamente pequeña, muestra la tendencia en los estudios de biolixiviación en diversos metales, y en el caso específico del Cu, que los grupos de investigación se han enfocado a la recuperación de cobre a partir de minerales de baja ley por medio de bacterias. En las diversas fuentes consultadas, no se encontró ningún trabajo enfocado al reciclado de chatarra electrónica; así mismo el hongo *Aspergillus Níger* tampoco ha sido utilizado en la biolixiviación de cobre.

### **1.6 Hongo *Aspergillus Níger* [19]**

El hongo *Aspergillus Níger* pertenece al reino hongo, clase *Eurotiomycetes*, orden *Eurotiales* y familia *Trichocomaceae*. El género es *Aspergillus* y la especie es *Aspergillus Níger*.

Es un hongo filamentoso con la siguiente etimología: *Aspergillus* – Formado por esporas y *Níger* – refiriéndose al color negro de las mismas. De lo anterior, podemos definirlo como un hongo filamentoso formado por esporas negras.

Considerando su distribución con respecto al clima, la vegetación y el suelo, se presenta la siguiente lista representativa de los hábitat en los que se ha reportado: Suelos glaciares en Alaska, pastizales, suelos secos con vegetación de estepa, bosques de coníferas, suelo de trufas, suelos desérticos, dunas de arena, salinas, estuarios, manglares, ambientes acuáticos marinos y de agua dulce, aguas contaminadas y lechos de ríos. De acuerdo con numerosos reportes, esta especie se distribuye en suelos con pH de 4 a 8 y su abundancia relativa aumenta luego de las actividades de labranza y

## Capítulo 1 Antecedentes

---

fertilización del suelo, tolerando altas concentraciones de herbicidas. Se encuentran también sobre una variedad de sustratos, incluyendo granos, forraje, frutos, vegetales, semillas y en la rizósfera (parte del suelo inmediata a las raíces) de una gran variedad de plantas tales como banano, trigo, arroz, algodón, café, caña de azúcar, cebada, avena, maíz y guisantes, entre otros.

Es considerado un microorganismo saprobio común del suelo, dado que obtiene su energía de la materia orgánica en disolución de los tejidos muertos o en descomposición de los cadáveres de plantas y animales.

Se emplea en varios procesos industriales debido a la variedad de enzimas que produce. Los ácidos cítrico y glucónico (regulador de pH presente en las frutas, miel y vino) son obtenidos comercialmente por el uso de este microorganismo. Así mismo se producen preparaciones enzimáticas y algunos antibióticos. En la figura VI se muestran algunas de las formas del hongo observadas a nivel microscópico.

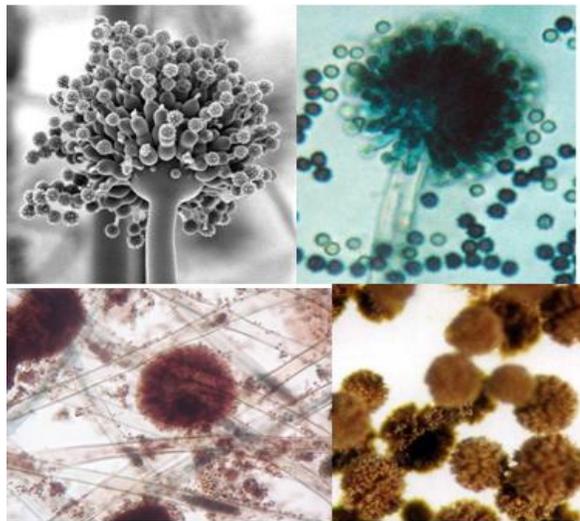


Fig. VI Micrografías de *Aspergillus Niger* [20].

---

## Capítulo 2

### Desarrollo experimental

En este capítulo se describe la metodología experimental utilizada para la biolixiviación de cobre, el equipo y el material requerido para la misma, así como las especificaciones básicas de cada material y equipo utilizado.

La experimentación que se llevó a cabo se puede resumir en la figura VII.

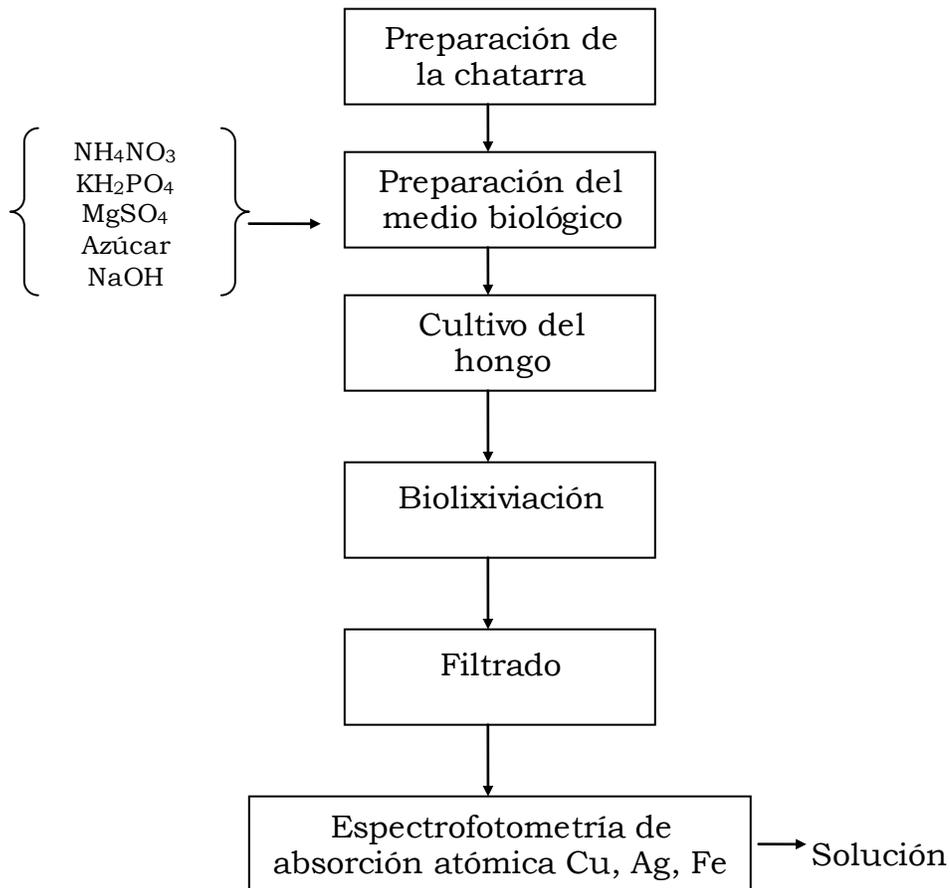


Fig. VII Diagrama del desarrollo experimental.

## 2.1 Materiales y equipo

Los hongos utilizados para la experimentación fueron obtenidos de la reserva de cepas de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (ENCB) del IPN. Por otro lado, un análisis de Cu realizado en el equipo de absorción atómica a chatarra (disuelta en agua regia) como la usada en la presente experimentación muestran contenido de 14.03 % peso.

En las tablas III y IV se muestran respectivamente los reactivos y equipos utilizados en la experimentación.

Tabla III Reactivos utilizados.

<b>Reactivo</b>	<b>Fórmula</b>	<b>Pureza</b>	<b>Marca</b>
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	93.98 - 95.48 %	Productos Químicos Monterrey
Fosfato de potasio monobásico	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	99 %	J.T. Baker
Sulfato de magnesio	MgSO <sub>4</sub>	99.9 %	Química Meyer
Hidróxido de sodio	NaOH	95 %	Fermont
Ácido clorhídrico	HCl	37.2 %	Fermont

Tabla IV Equipo utilizado.

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
Absorción atómica	Perkin Elmer	A Analyst 300
Refractómetro	Milton Roy Company	AMJ110
Potenciómetro	Conductronic	pH 20
Incubadora	Biotech JMC	5302

## 2.2 Preparación de la chatarra

La chatarra electrónica contiene diversos dispositivos como transistores, chips electrónicos, condensadores, etc. Sin embargo, para la biolixiviación se utilizan únicamente las placas por lo que se requiere su limpieza.

Esta etapa se hace manualmente (figura VIII); por medio de unas pinzas de punta se quitan los dispositivos electrónicos que están soldados a la placa.



Fig. VIII Limpieza manual de la chatarra.

Las placas se trituran con un martillo ya que no se puede hacer en un molino debido a que las placas contienen material plástico que se puede adherir al equipo dañando permanentemente su funcionamiento. Las placas se trituran hasta pasar por malla del No. 10. La razón principal para la trituración de las placas es aumentar el área de contacto entre la chatarra y la solución dando lugar a que la reacción se lleve a cabo con mayor efectividad. En la figura IX se muestra la chatarra electrónica después de haber sido limpiada y triturada.



Fig. IX Chatarra triturada.

Finalmente se hace un muestreo de cono cuarteo para tener una chatarra uniforme. Esto se hace poniendo la chatarra en forma de cono en un plástico y levantando las contraesquinas 20 veces para mezclarla; y el cono se divide en 4 y se repite la operación hasta obtener una muestra pequeña y representativa.

### 2.3 Preparación del medio de cultivo

Todo microorganismo requiere de un medio de cultivo apropiado para su desarrollo. En el caso de la presente investigación, se preparó el medio con la composición mostrada en la tabla V.

Tabla V Composición del medio de cultivo [21]

<b>Fórmula</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	3	gL <sup>-1</sup>
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1	gL <sup>-1</sup>
MgSO <sub>4</sub>	0.5	gL <sup>-1</sup>
C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	100	gL <sup>-1</sup>
H <sub>2</sub> O	1	L

Una vez que se tiene la solución se mide el pH y se modifica hasta 6.5, agregando solución de NaOH al 5% con micropipeta. Posteriormente se afora a un litro. El medio obtenido se muestra en la figura X. La solución debe esterilizarse inmediatamente o poner en refrigeración.



Fig. X Medio biológico.

En la primera etapa de la experimentación, se analizó de manera cualitativa el efecto que tiene la concentración de la chatarra en el proceso de biolixiviación, además de utilizar 3 diferentes tipos de hongo de la familia *Aspergillus Níger*. La esterilización se lleva a cabo en matraces sellados con algodón y cubiertos con papel aluminio con los siguientes contenidos de chatarra: 0, 1, 3, 5, 10 y 15 g en 300 mL del medio para cada tipo de hongo, obteniéndose en total 18 matraces.

Después se colocan los matraces en una autoclave (figura XI) expuesta a calor hasta alcanzar una temperatura de 120 °C y una presión de 14 psi; se deja en estas condiciones durante 17 minutos.



Fig. XI Autoclave.

#### **2.4 Cultivo del hongo *Aspergillus Niger***

Una vez esterilizado el medio para el crecimiento de microorganismos se procede a hacer la inoculación. En primer lugar se retiran los matraces de la autoclave y se limpia la mesa con un algodón impregnado de alcohol para esterilizarla.

Ya que la mesa está esterilizada se enciende el mechero con una flama a su máxima intensidad, asegurando una zona libre de contaminantes de 30 cm alrededor del mechero (figura XII), dentro de la cual se debe trabajar durante la inoculación.



Fig. XII Zona segura para la inoculación.

Los matraces de las muestras y el que contiene el hongo, así como el asa bacteriológica (figura XIII) deben acercarse a la zona segura para proceder con la inoculación siguiendo el procedimiento descrito a continuación.



Fig. XIII Asa bacteriológica o de inoculación.

1. Se pasa rápidamente la mano por el fuego para eliminar cualquier tipo de microorganismo.
2. Se destapa el cultivo del hongo cuidando que el algodón no toque ninguna superficie para no contaminarlo con otros microorganismos.
3. Se destapa la muestra que se quiere inocular cuidando igualmente el algodón.
4. Se pasa la boquilla del matraz con la muestra por el fuego para eliminar cualquier residuo de algodón.
5. Se pasa la boquilla del matraz con el hongo por el fuego.
6. Se pasa rápidamente el mango del asa por el fuego y posteriormente el asa se calienta al rojo vivo.
7. El asa se introduce en el matraz en donde se encuentra el hongo e inmediatamente después se introduce en la muestra.
8. Se vuelve a pasar el asa por el fuego.

9. Se pasa la boquilla del matraz recién inoculado por el fuego.
10. Se tapa y se agita.
11. El matraz inoculado se pone en una incubadora a 35 °C y se revisa el crecimiento del hongo cada 3 días.
12. Una vez terminadas las muestras, se cierra de nuevo el matraz que contiene al hongo; cuando ya no sea útil se esteriliza y se desecha.

Los pasos principales se muestran en la figura XIV.



Fig. XIV Proceso de inoculación.

Es importante tener precauciones al hacer este procedimiento tales como usar cubrebocas y bata, ya que las esporas producidas por el hongo son muy volátiles y patógenas [21].

Al hacer la primera inoculación a partir de la cepa, que tiene como único objetivo procrear al hongo, se requiere colocar el matraz en la

incubadora (figura XV) a 35 °C para que el hongo comience a crecer.



Fig. XV Incubadora.

## **2.5 Biolixiviación**

Para la etapa de biolixiviación se requiere preparar muestras a diferentes condiciones y las pruebas duran 21 días.

La primera etapa de la experimentación es la prueba de 3 tipos de hongos de la familia *Aspergillus Níger* para determinar cual permite realizar una mejor lixiviación de cobre y la cantidad más favorable de chatarra requerida; se realiza a temperatura ambiente. La cantidad de chatarra es importante debido a que en gran cantidad puede resultar tóxica para el hongo. Los matraces con los tres hongos utilizados se muestran en la figura XVI.



Fig. XVI Diferentes hongos de la familia *Aspergillus Níger* utilizados en la experimentación.

Una vez que se cumple el tercer día posterior a la inoculación se procede a sacar una muestra de 6 mL de cada matraz sin olvidar etiquetarla; es indispensable utilizar puntas de micropipeta previamente esterilizadas para evitar la contaminación del matraz con otros microorganismos, siguiendo el procedimiento utilizado en la inoculación.

Se mide el pH de las 18 muestras por medio de un potenciómetro (figura XVII) calibrado a pH=4, el mismo día que se sacan las muestras. Una vez registrado el pH, se toma una lectura de la cantidad de azúcar presente en cada muestra mediante el refractómetro (figura XVIII) calibrado a 1.333 con una gota de agua destilada; es necesario limpiar con acetona las superficies que entran en contacto con la muestra cada vez que se hace una lectura. Finalmente las muestras se refrigeran para evitar el crecimiento del hongo.

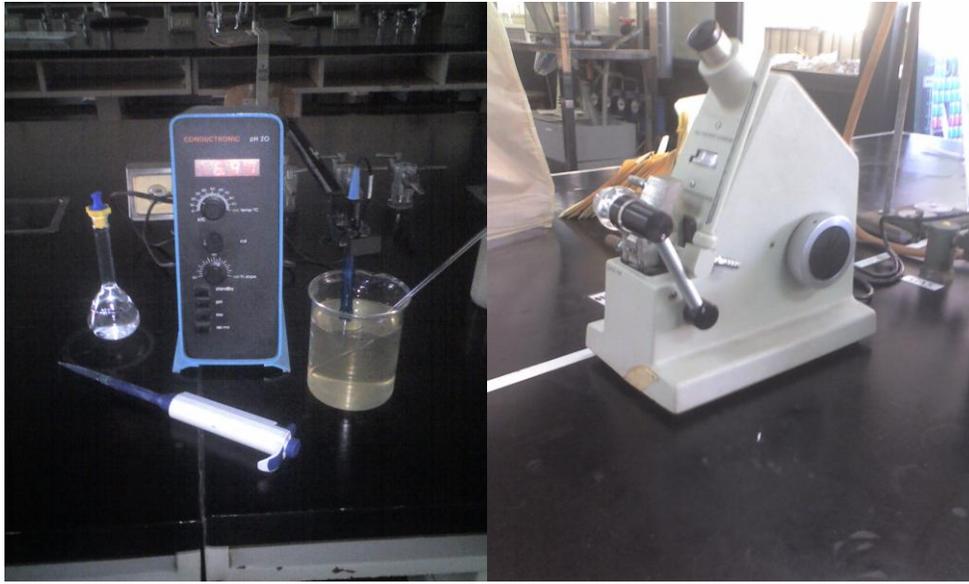


Fig. XVII Potenciómetro.

Fig. XVIII Refractómetro.

Una vez determinados cual es el hongo más eficiente y la cantidad de chatarra adecuada, se procede a analizar el efecto de la agitación a 35 °C.

## 2.6 Filtrado

El filtrado se lleva a cabo por medio de un filtro al vacío, se toman 5 mL de muestra y se coloca un filtro nuevo del No. 1822024 marca Whatman, se pone a funcionar la compresora y se vierte la muestra y se le agrega un poco de agua destilada para evitar que se quede en las paredes la muestra, una vez que en el papel filtro quede solamente el hongo, se desconecta la manguera que va de la compresora al filtro y se apaga.

Se vacía el contenido del matraz kitazato en un matraz volumétrico de 25 mL agregando 1 mL de HCl para la medición en absorción atómica. En la figura XIX a) y b) se muestran el filtro al vacío y los filtros utilizados en la experimentación.

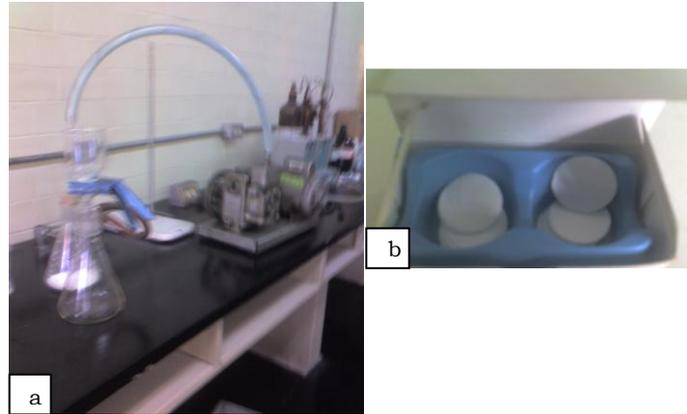


Fig. XIX a) Filtro al vacío y b) Filtros del No. 1822024 marca Whatman.

### **2.7 Espectrofotometría de absorción atómica Cu, Ag, Fe**

Una vez que las muestras han sido filtradas se requiere establecer los parámetros necesarios en el equipo para la medición del elemento deseado, en este caso se requiere la lectura de las ppm presentes de Cu, Ag y Fe, analizando los estándares establecidos para cada elemento. Los estándares manejados son: para Cu 1, 3 y 5 ppm, para Fe 1, 5, 10 ppm y finalmente para Ag 2, 3 y 4 ppm. En la figura XX se muestra el espectrofotómetro de absorción atómica utilizado para analizar la composición de las mismas.



Fig. XX Equipo de absorción atómica.

---

## Capítulo 3

### Resultados y discusión

#### 3.1 Determinación de tipo de hongo más eficiente

El objetivo de la primera experimentación es determinar de manera cualitativa la cantidad de chatarra que se puede reciclar sin que los iones en la solución vuelvan tóxico al sistema para el hongo y por consiguiente ocasionar la muerte del mismo, determinando adicionalmente cual de los tres hongos propuestos es un mejor lixiviante del Cu.

Para lo anterior, se dará seguimiento a los siguientes parámetros que nos darán un panorama de cómo se va llevando a cabo la biolixiviación: el pH, la cantidad de azúcar, la cantidad de cobre, hierro y plata lixiviados. De manera general, a valores menores de pH se favorece la lixiviación, además, es un parámetro que nos permite conocer el comportamiento del hongo en el medio debido a que su disminución nos indica que el hongo sigue creciendo, mientras que si aumenta o se mantiene constante es una prueba de que el hongo ha muerto. Se espera que el pH disminuya con el tiempo debido a que entre mayor hongo haya los productos de su metabolismo aumentarán haciendo más ácido el medio y que por tanto se favorezca cada vez más la lixiviación.

### 3.1.1 Medición del pH

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras de la XXI a la XIII.

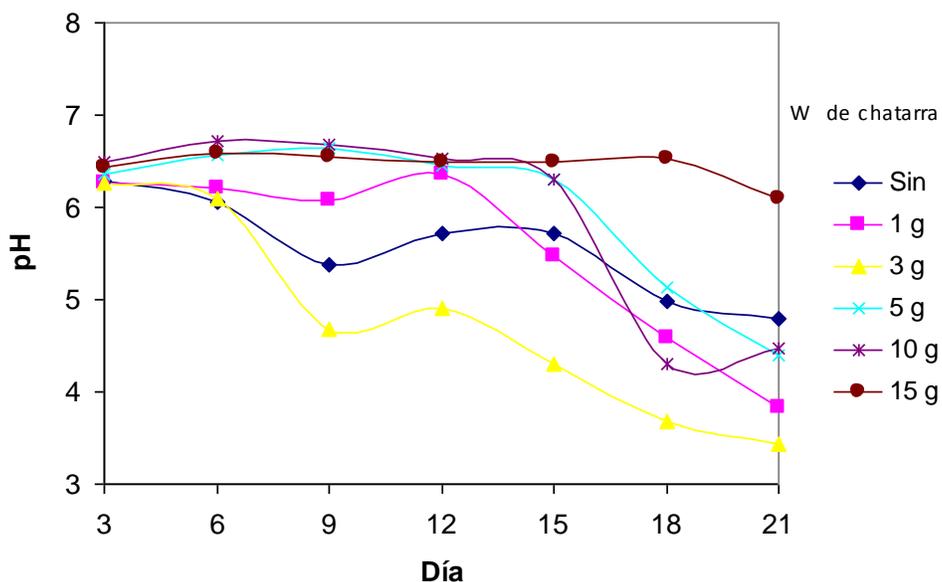


Fig. XXI Medición de pH para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

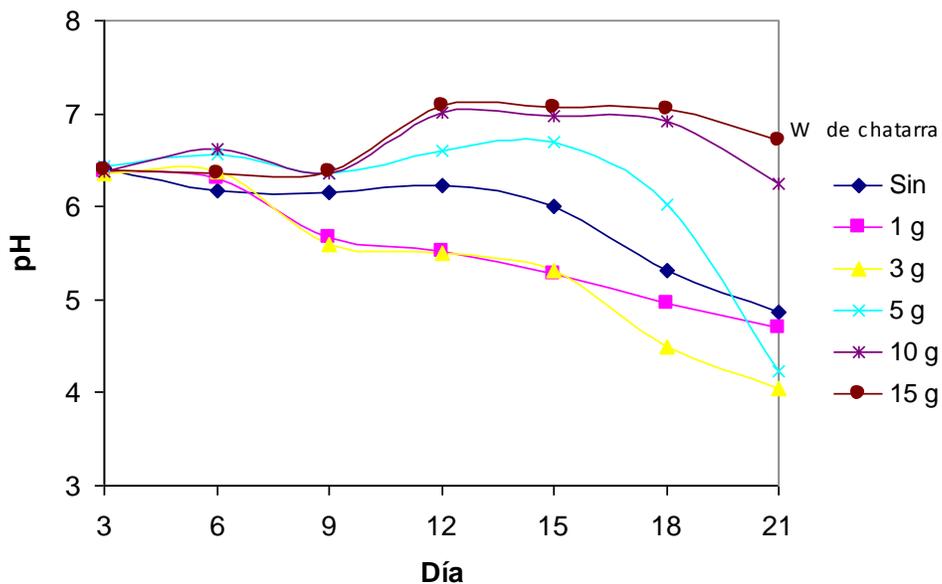


Fig. XXII Medición de pH para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

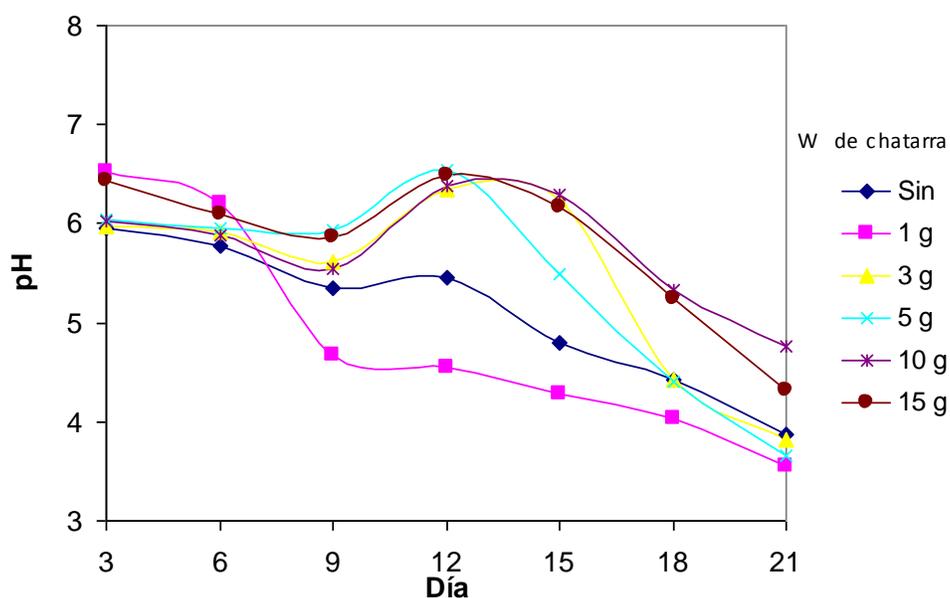


Fig. XXIII Medición de pH para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

Destaca al analizar las figuras que la diferencia entre los valores finales de pH y el comportamiento en general son muy similares para las diferentes cantidades de chatarra. Además, cualquier análisis debe de considerar el hecho de que la chatarra en sí misma acidifica el medio. En algunos casos para contenidos de chatarra menores, el pH es menor que en los casos sin chatarra, esto puede ser puede explicar por el hecho de que el hongo con contenidos mayores de chatarra, crece en menor cantidad por lo que en realidad dentro de su ciclo de vida, aun no inicia de manera formal la etapa de acidogénesis (formación de ácido) de manera consistente. Se destaca el hecho de que para los tres sistemas, los valores menores de pH se observan para las muestras de entre 1 y 5 g de chatarra, lo que ya es una muestra que contenidos mayores de esta provocan la muerte prematura del hongo, o que la disolución de algunos componentes de la chatarra tienden a

aumentar el pH. Sin embargo, desde el punto de vista de proceso, se preferirá siempre las muestras con mayores contenidos de chatarra ya que de esta manera se lograrán soluciones con mayor contenido de Cu. Además hay que considerar que en esta etapa las mediciones son más cualitativas, es decir, es más importante el comportamiento global del hongo en el medio y su supervivencia en el mismo. Desde el punto de vista del pH los mejores lixiviantes son los hongos 1 y 3, ya que los valores disminuyen alcanzando valores cercanos a un intervalo entre 3-4, por lo que debiera verse favorecida la lixiviación de Cu.

### **3.1.2 Medición del % de azúcar**

Es importante tener un control de la cantidad de azúcar presente en el medio biológico debido a que los hongos se alimentan de esta y por consiguiente la disminución en su cantidad nos indica un crecimiento en la cantidad de hongo de manera más precisa que la medición del pH.

Cabe mencionar que la cantidad de azúcar no disminuye súbitamente pero se puede encontrar un cambio conforme pasan los días, se espera que al igual que el pH la cantidad de azúcar disminuya con el tiempo. Al medir el porcentaje de azúcar se obtuvo lo siguiente:

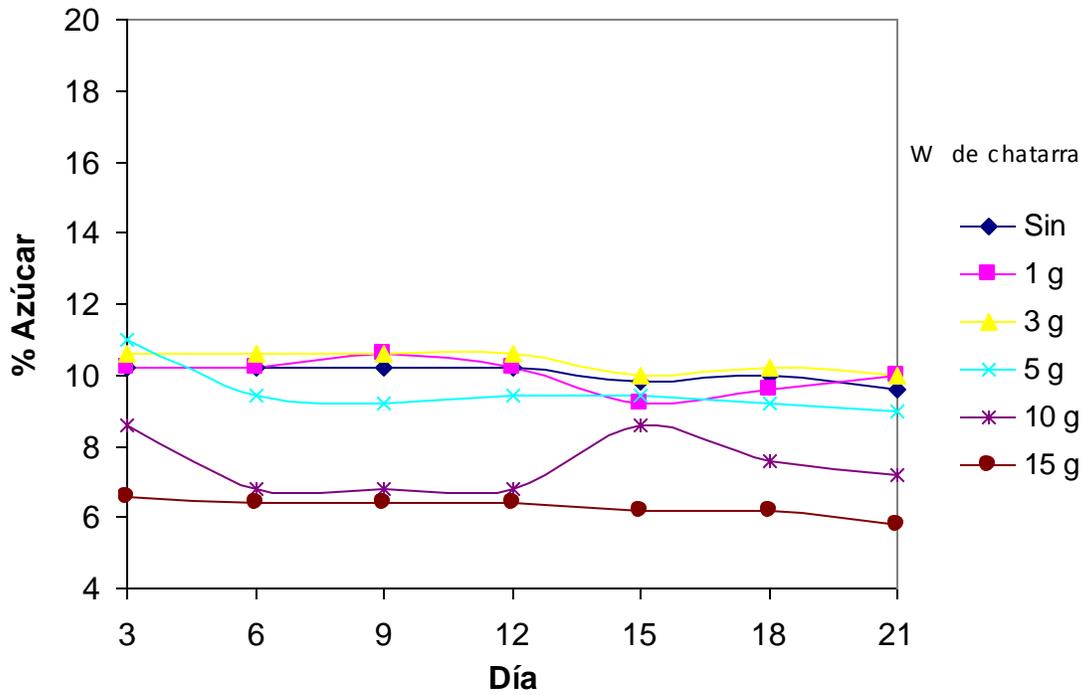


Fig. XXIV Medición de azúcar para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

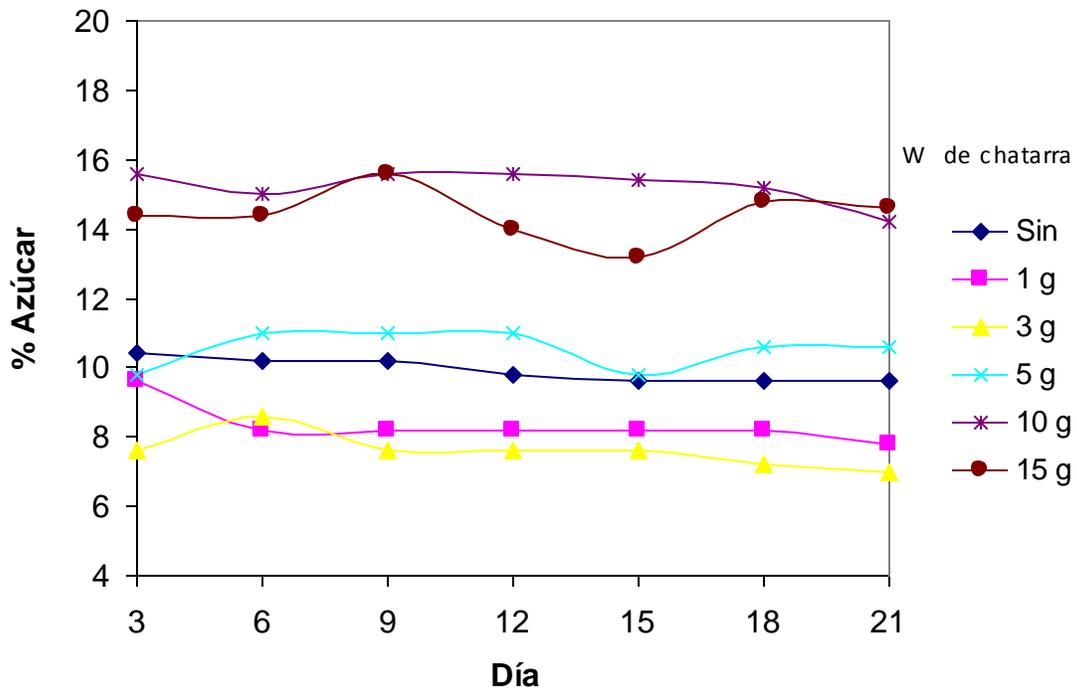


Fig. XXV Medición de azúcar para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

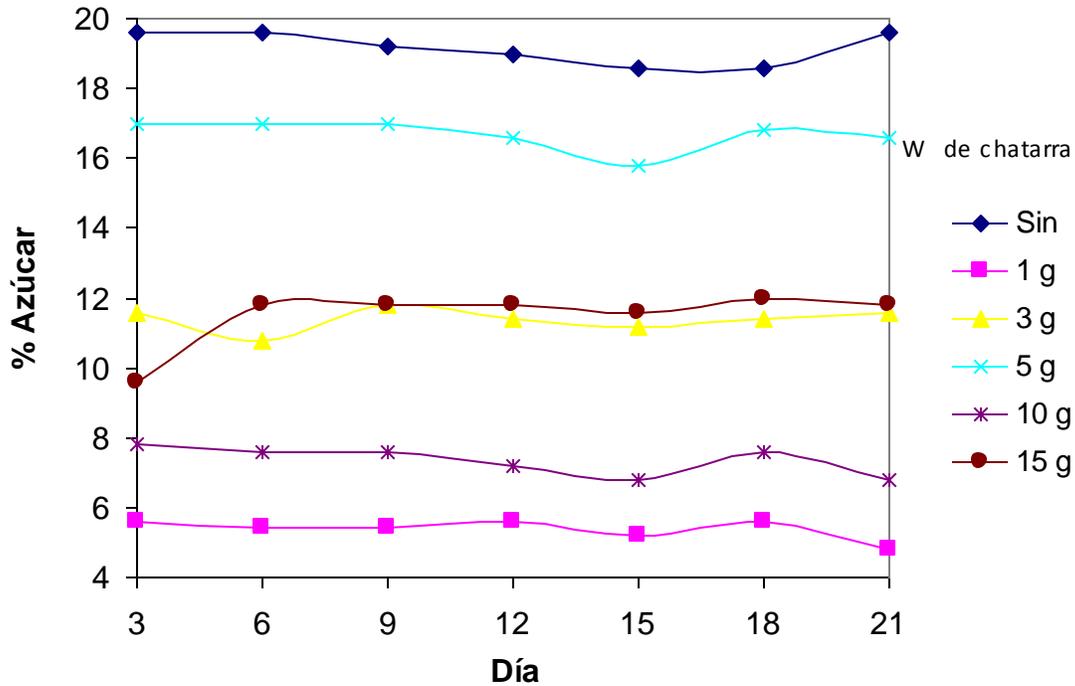


Fig. XXVI Medición de azúcar para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

El cambio en la cantidad de azúcar no es muy apreciable, sin embargo su aumento resulta más representativo, en el hongo 1 no existe dicho aumento, lo cual nos permite afirmar que tiene un mayor crecimiento y por tanto es el que mejor se adapta. Cabe mencionar que el aumento del contenido de azúcar con el tiempo puede deberse a dos factores: a que los hongos de hecho solo tienen una etapa inicial de crecimiento y posteriormente empiezan a morir, secretando azúcares durante este proceso, o a que durante la toma de muestra para la medición, una cantidad de hongo pudo ser analizado.

**3.1.3 Cantidad de Cu lixiviado**

Al medir el % de Cu en absorción atómica se obtuvieron los siguientes resultados en  $\text{mg L}^{-1}$ :

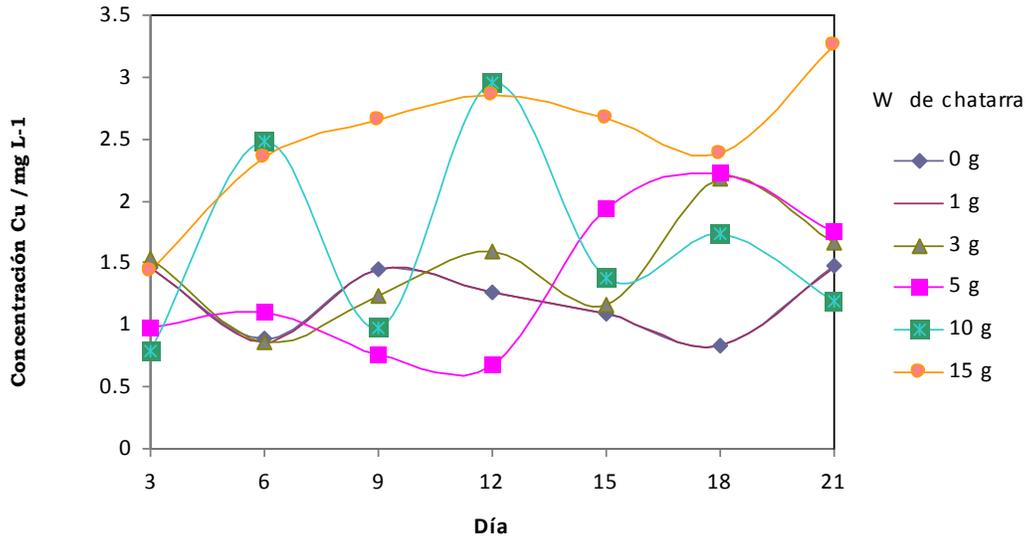


Fig. XXVII Medición del % de Cu para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

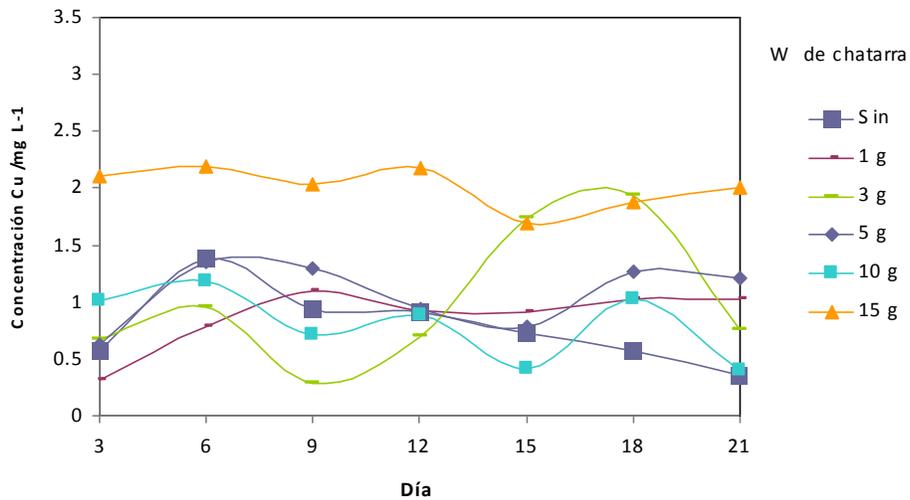


Fig. XXVIII Medición del % de Cu para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

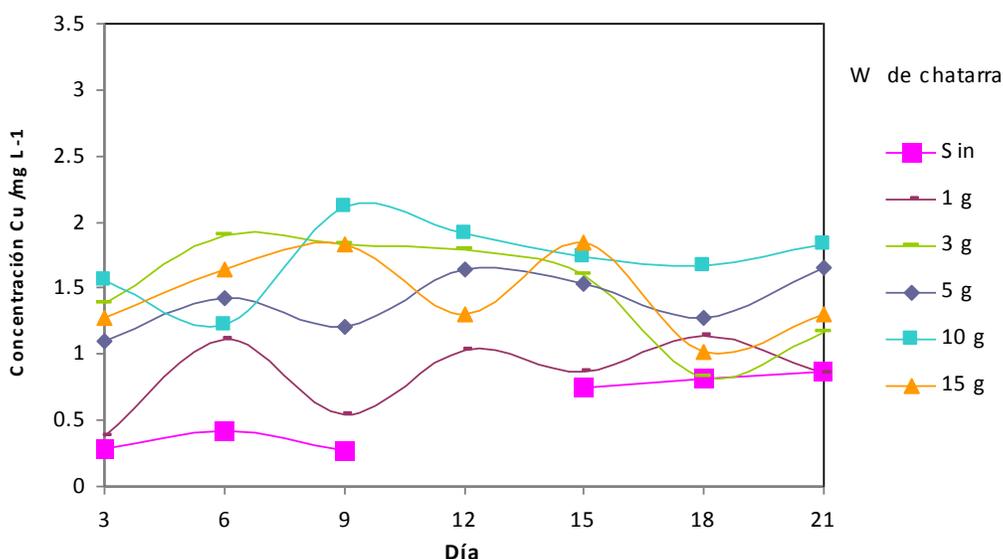


Fig. XXIX Medición del % de Cu para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

Como puede observarse en primer lugar, los resultados obtenidos se encuentran cerca de los límites de cuantificación del equipo (aproximadamente  $0.3 \text{ mg L}^{-1}$ ) y muy cercanos entre sí, por lo que no es posible analizar con detalle los resultados de manera cuantitativa, sin embargo, si es posible observar tendencias muy interesantes que nos servirán para comprobar que el hongo 1 es el mejor adaptado al medio de crecimiento con chatarra, lo que es consecuencia del hecho de que este es el que más puede crecer, y por lo tanto puede acidificar más el medio utilizado. Los hongos 2 y 3 no tienen la misma tolerancia y por lo tanto crecen menos y acidifican menos el medio. Respecto al contenido de chatarra, es claro que prácticamente es posible obtener soluciones con contenidos de cobre muy parecidos y en los mismos intervalos de concentración. Por ejemplo, en la figura XXVII se observa que la diferencia entre el menor y el mayor contenido de Cu biolixiviado se encuentra en el intervalo entre  $1\text{-}3 \text{ mg L}^{-1}$ . Estos valores muy

cercanos pueden considerarse parte en sí misma de los errores experimentales por lo que no permiten realizar una evaluación respecto al contenido final biolixiviado. Sin embargo, al observar nuevamente el crecimiento del hongo, mediante la cantidad de azúcar, este no se ve afectado por una gran cantidad de chatarra, y debido a que la mayor recuperación de Cu se obtendrá de los contenidos mayores de chatarra, se preferirán para las pruebas posteriores. Por otro lado, en cualquiera de los casos, el tiempo ideal para el cultivo del hongo es de aproximadamente 12 días, después de dicha fecha se observa, para el pH y para el azúcar, una menor cantidad de cambios, por lo que es de esperar que el proceso de lixiviación, a pesar de que continuará debido a la acidez del sistema, ya no será consecuencia directa de la actividad biológica.

### **3.1.4 Cantidad de hierro lixiviado**

Suponemos que lo que contiene en mayor proporción la chatarra electrónica es cobre, sin embargo, la cantidad de hierro utilizada no es despreciable por lo que se hizo un análisis para determinar la cantidad de hierro que podría ser recuperado de la chatarra, debido a que si se lixivia en grandes cantidades es malo para los procesos electroquímicos de electrorrecuperación, impidiendo que el cobre pueda ser recuperado posteriormente de la solución.

Al medir la cantidad de Fe presente en las muestras se obtuvieron los siguientes resultados en  $\text{mgL}^{-1}$ :

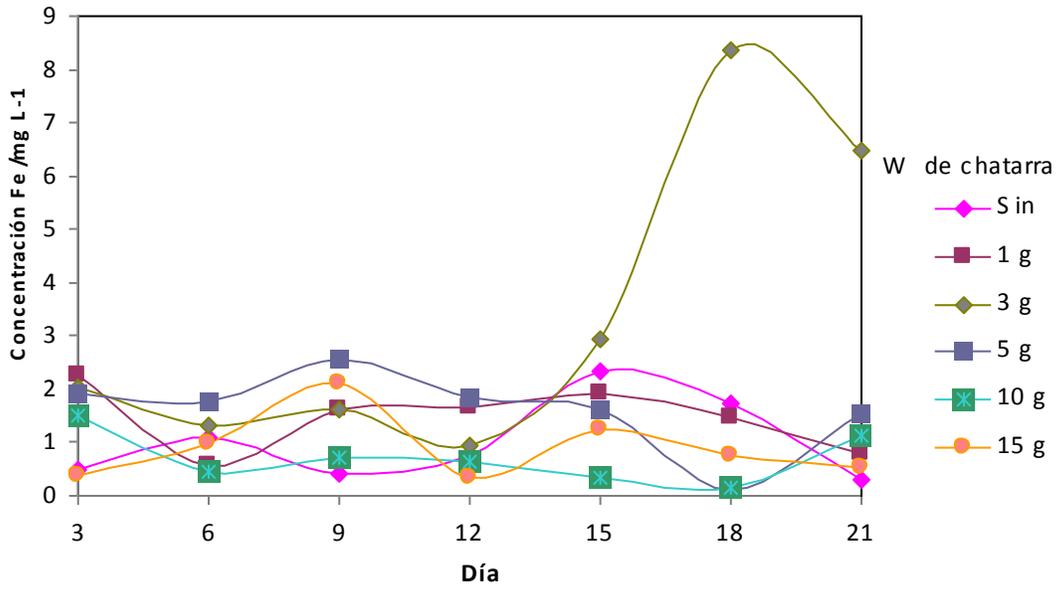


Fig. XXX Medición del % de Fe para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

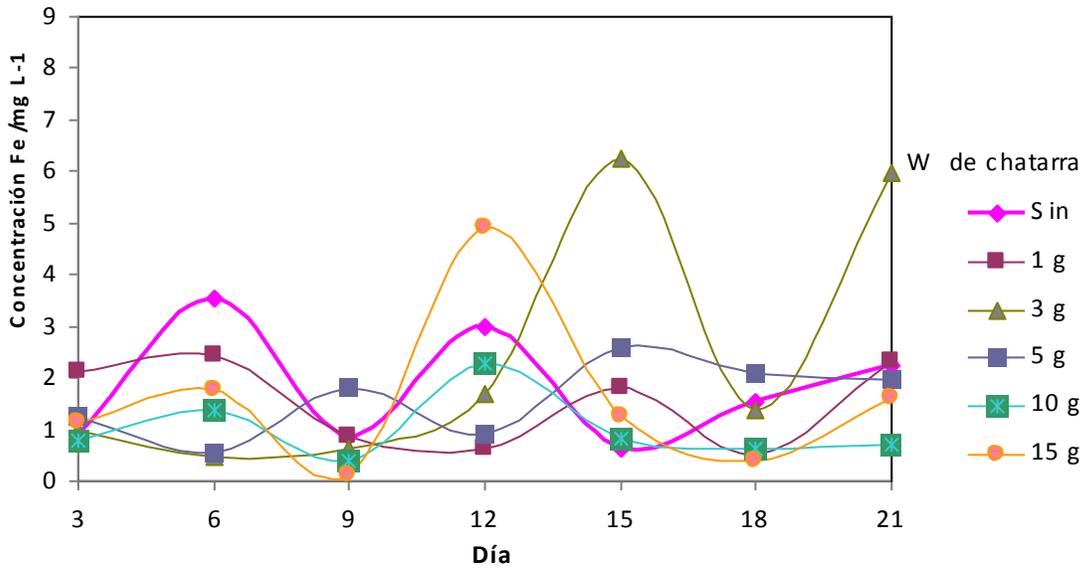


Fig. XXXI Medición del % de Fe para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

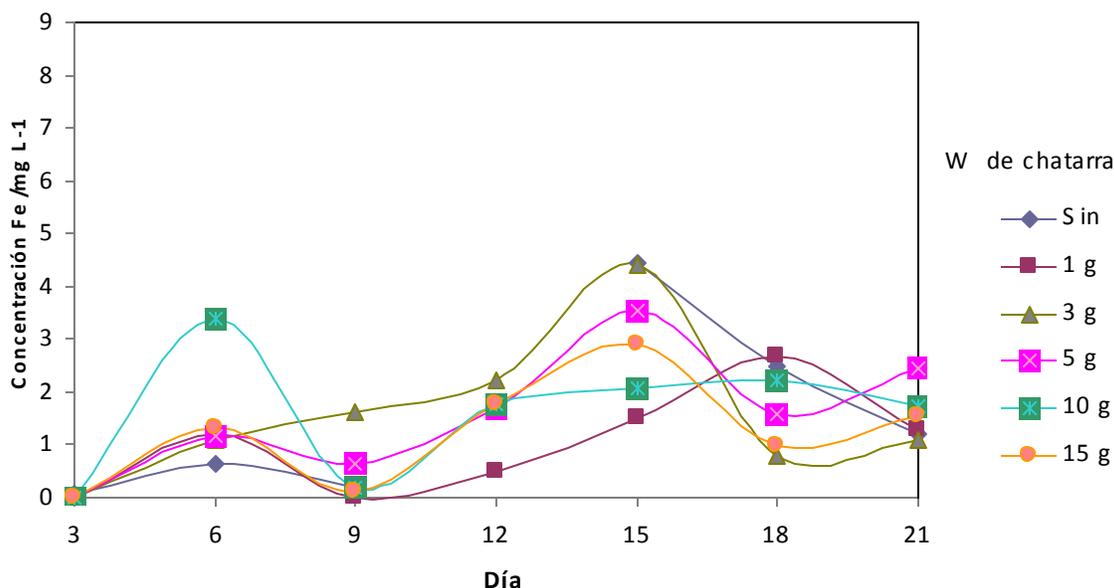


Fig. XXXII Medición del % de Fe para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

Los resultados muestran que en la solución que contiene al hongo 1 se lixivió la menor cantidad de hierro lo cual es favorable para la posterior electrorrecuperación del cobre presente en la solución. Respecto a los demás resultados, se observaron comportamientos similares a los observados para el Cu.

### 3.1.5 Cantidad de plata lixiviada

Se hizo un análisis para determinar si se podía recuperar plata de la chatarra, sin embargo las cantidades de registrados son mínimas por lo que sólo serán mencionadas las de los últimos días. No se va a considerar dentro de los elementos recuperables.

Al medir la cantidad de Ag en mg/L se obtuvieron cantides menores a 0.1.

### 3.2 Efecto de la temperatura y agitación

En esta parte de la experimentación se utilizó el hongo que proporcionó los mejores resultados y con las concentraciones que nos pueden proporcionar la mayor recuperación.

Esta prueba se realizó en la incubadora y su finalidad era mostrar el efecto de la temperatura y la agitación en los microorganismos y en la cantidad de cobre y hierro recuperado.

En esta prueba no se reportó recuperación de plata lo cual probablemente se deba a que en la chatarra utilizada en esta prueba no existiera dicho elemento.

Cabe mencionar que para los experimentos realizados en esta sección, cada prueba fue desarrollada por triplicado, la razón de esto, al analizar los resultados obtenidos en la etapa previa, es que se puede suponer que existe una gran variabilidad en el comportamiento de estos sistemas, misma que es normal para sistemas de crecimiento de hongos. Por lo tanto, mediante la repetición de la muestra se pretende tener una noción más cercana a la incertidumbre del sistema.

### 3.2.1 Medición del pH

Cuando el pH se midió se obtuvieron los siguientes resultados:

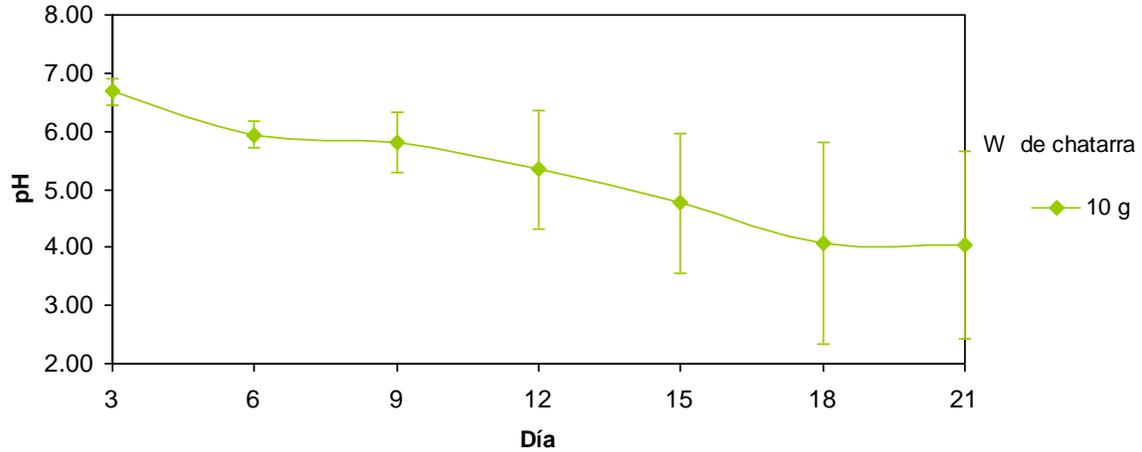


Fig. XXXIII Medición del pH para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

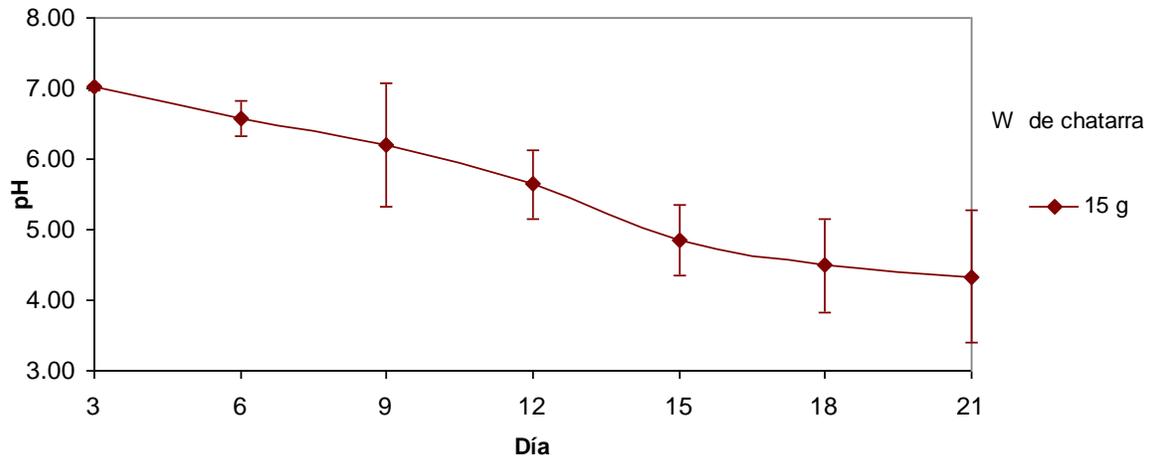


Fig. XXXIV Medición del pH para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

Los resultados de pH muestran un comportamiento diferente al observado en la muestra sin agitación y a temperatura ambiente, ya que los valores finales obtenidos, menores a 4, son menores a los observados para las contrapartes de la primera parte de la experimentación, mismos que solo se lograron con contenidos menores de chatarra. Esto lleva a suponer que la agitación, que puede traducirse como la entrada de aire al sistema y un aumento en el área de contacto debido a que la chatarra se encuentra suspendida, permite la mejor supervivencia del hongo, y por tanto lixiviar mayor cantidad de chatarra, por lo que el proceso se ve beneficiado.

#### 3.2.2 Medición del % de azúcar

Posteriormente se mide el azúcar y obtenemos:

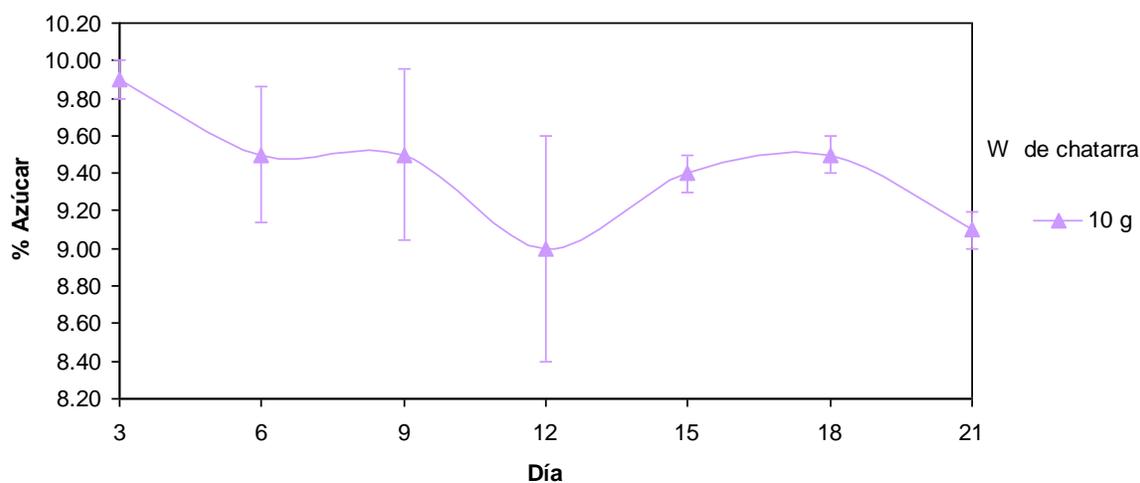


Fig. XXXV Medición del azúcar para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

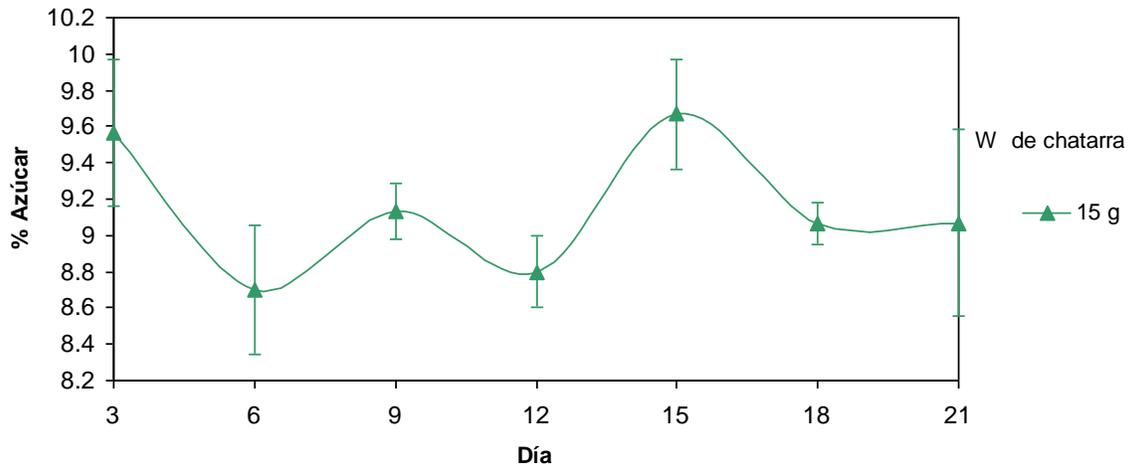


Fig. XXXVI Medición del azúcar para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

El comportamiento del azúcar permite observar que el hongo se mantiene en una cantidad constante, por lo que el efecto de la disminución de pH puede ser atribuido simplemente a la mejor supervivencia del hongo presente inicialmente.

### 3.2.3 Cantidad de cobre lixiviado

Ahora medimos la cantidad de cobre que biolixivió:

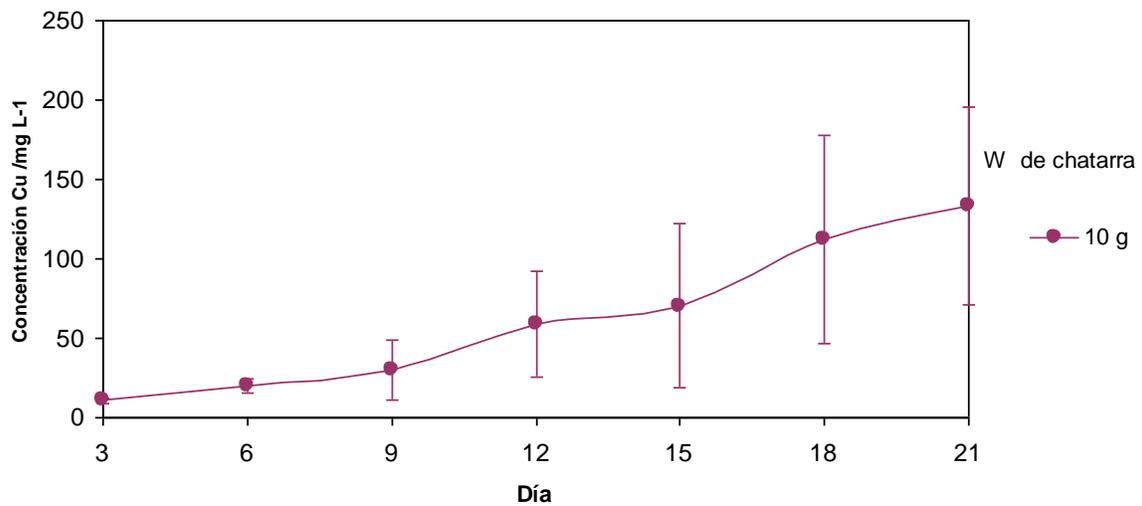


Fig. XXXVII Medición del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

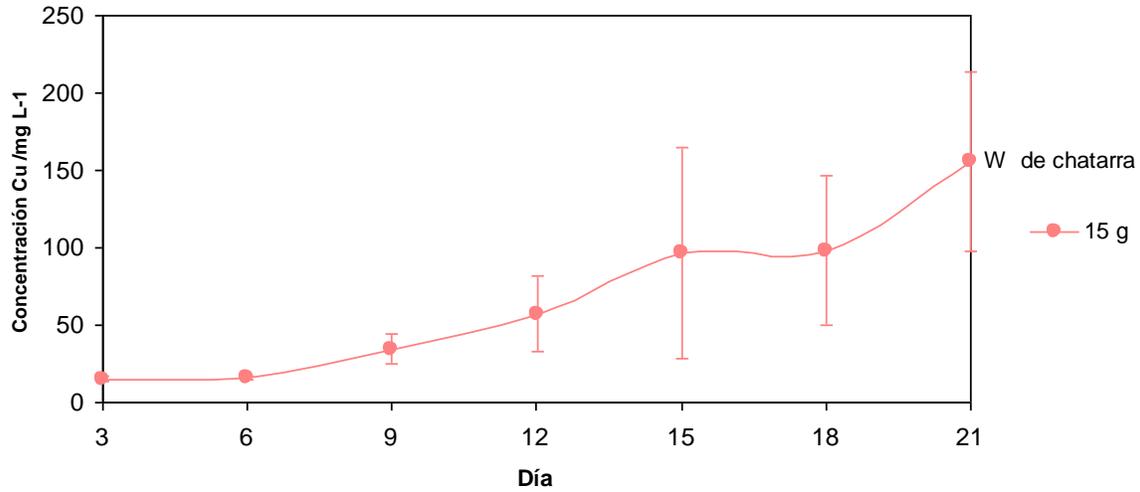


Fig. XXXVIII Medición del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm

Se observa que la recuperación de Cu se incremento considerablemente respecto a las muestras sin agitación y sin temperatura, pasando de 1.83 ppm hasta 133.38 ppm para la muestra de 10 g, mientras que para la de 15 g paso de 1.31ppm hasta 155.73 ppm. Esto nos permite decir que el proceso se ve efectivamente mejorado para estas nuevas condiciones. Así, es posible afirmar que el efecto conjunto de una mayor temperatura en el sistema, una mayor superficie de contacto debida a la agitación, así como el aumento de la cantidad de aire en el sistema, que se traduce en el aumento de la capacidad de crecimiento del hongo, permiten propiciar un mejor sistema de recuperación.

**3.2.4 Cantidad de hierro lixiviado**

Finalmente se miden la cantidad de Fe que se biolixivió:

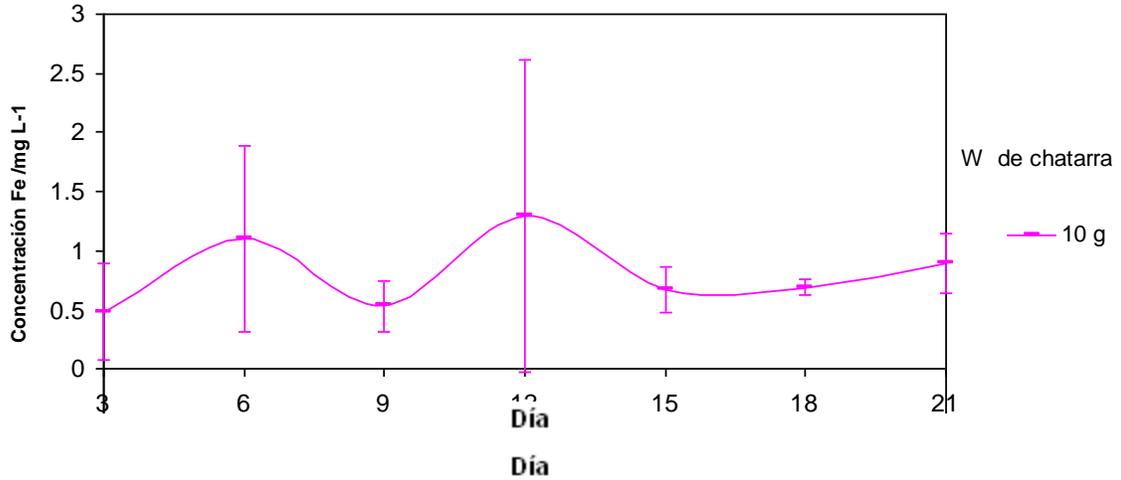


Fig. XXXIX Medición del % de Fe para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm

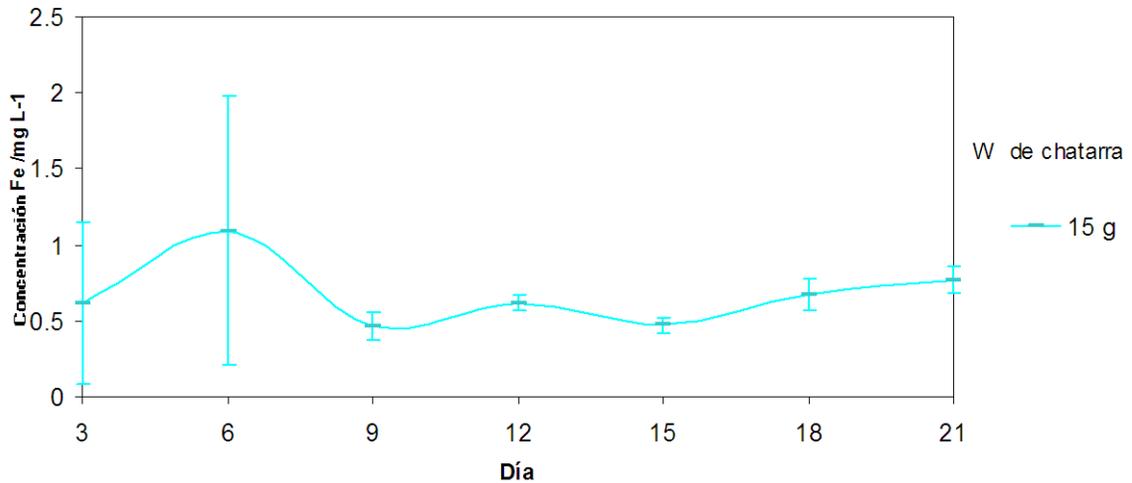


Fig. XL Medición del % de Fe para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm

Respecto al contenido de Fe lixiviado se puede observar una disminución en la cantidad de hierro respecto a las muestras sin agitación y temperatura ambiente, pasando de 1.13 ppm a 0.89 ppm para la muestra de 10 g, mientras que para la de 15 g pasó de 0.52 ppm a 0.77 ppm. Se observa una clara disminución en las cantidades de hierro para 10 g y un aumento mínimo para 15 g lo cual mejora las condiciones de lixiviación de cobre. Cabe mencionar que el comportamiento del Fe en el sistema se debe a dos factores: en primer lugar durante la segunda etapa de experimentación la chatarra presentaba contenidos menores de Fe a los de la etapa inicial. Sin embargo, más importante es el hecho de que se sabe que si se favorece el crecimiento de hongos en ciertos sistemas, como el presente, con el tiempo el hongo, para seguir nutriéndose, tenderá a tomar parte del Fe en el medio como nutriente, lo que explica el hecho de que el contenido de Fe disminuya considerablemente respecto a la etapa inicial de la experimentación.

---

## Capítulo 4

### Conclusiones

Analizando los datos de la experimentación 1 se observa que en todas las gráficas existe un punto crítico en el día 12, es decir, el comportamiento del pH, la cantidad de azúcar y el Fe lixiviado se comportan de una manera decreciente constate, así como el Cu lixiviado aumenta de manera constante y después se observa un cambio. Por lo tanto, este se considera el tiempo ideal de crecimiento para muestras sin agitación y sin temperatura.

Haciendo una comparación de los tres hongos podemos concluir que el hongo 1 presenta un mejor comportamiento debido a varios factores: es el que presenta un mayor crecimiento debido a que es que tiene menor cantidad de azúcar, disminuye más el pH favoreciendo la lixiviación y por tanto se recupera más Cu.

Otro aspecto que podemos concluir es la cantidad de chatarra en que la toxicidad aun no afecta al hongo y el resultado fue favorable para 10 y 15 gramos.

La cantidad de Fe lixiviado es la menor en la solución correspondiente al hongo 1 y no altera la cantidad de Cu que puede se recuperado mediante la electrorrecuperación, por lo que la experimentación resulta factible.

La cantidad de Ag recuperada es mínima por lo que no se tomará en cuenta, sin embargo esto depende en gran parte de la chatarra, ya que algunos aparatos electrónicos requieren mayor conducción

---

en sus componentes y por tanto contienen mayor cantidad de plata.

En las gráficas de la experimentación 2 se observa que se aumentó el tiempo de vida del hongo, esto se debe a las nuevas condiciones por lo que el crecimiento del hongo continúa, sin embargo sólo se analizó hasta el día 21.

También podemos concluir que la agitación y el aumento de temperatura favorece una mayor recuperación del elemento deseado, ya que hay una mayor supervivencia del hongo, a diferencia de la experimentación 1 la cantidad de chatarra que mostró mayor estabilidad y mayor recuperación fueron 15 g de chatarra, es importante mencionar que en esta experimentación no se recuperó Ag probablemente debido a que la chatarra utilizada en esta prueba no la contenía.

Una vez establecido lo anterior la conclusión final es que la máxima recuperación de Cu fue de 155 mg/L a una temperatura de 35 °C y una agitación de 100 rpm, mientras que la cantidad de hierro recuperado bajo las mismas condiciones fue 0.7 mg/L.

---

## 5. Bibliografía

1. Biswas A. K. y Davenport W. G., “**El cobre Metalurgia extractiva**”, pp. 17-35, Editorial Limusa, México 1993.
2. Watter Treatment Solutions LENNTECH  
<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>
3. Procobre  
[http://www.procobre.org/procobre/aplicaciones\\_del\\_cobre/energia\\_sustentable.html](http://www.procobre.org/procobre/aplicaciones_del_cobre/energia_sustentable.html)
4. Watling H.R., “**The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides — A review**”,  
[www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
5. Aung Khin Moh Moh, Ting Yen-Peng, “**Bioleaching of spent fluid catalytic cracking catalyst using *Aspergillus Niger***”,  
[www.elsevier.com/locate/jbiotec](http://www.elsevier.com/locate/jbiotec)
6. Coram-Uliana Nicolette J., van Hille Robert P., Kohr William J., Harrison Susan T.L., “**Development of a method to assay the microbial population in heap bioleaching operations**”, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
7. Leahy Martin J., Schwarz M. Philip, Davidson Malcolm R., “**An air sparging CFD model for heap bioleaching of chalcocite**”, [www.elsevier.com/locate/apm](http://www.elsevier.com/locate/apm)
8. Renman Ruan, Jiankang Wen, Jinghe Chen, “**Bacterial heap-leaching: Practice in Zijinshan copper mine**”,  
[www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
9. Mohapatra S., Bohidar S., Pradhan N., Kar R.N., Sukla L.B., “**Microbial extraction of nickel from Sukinda chromite overburden by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Aspergillus strains***” [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
10. Leahy M.J., Davidson M.R., Schwarz M.P., “**A model for heap bioleaching of chalcocite with heat balance: Mesophiles and moderate thermophiles**”,  
[www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)

- 
11. Jordan H., Sanhueza A., Gautier V., Escobar B., Vargas T., **“Electrochemical study of the catalytic influence of *Sulfolobus metallicus* in the bioleaching of chalcopyrite at 70 °C”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  12. Hawkes Rebecca B., Franzmann Peter D., Plumb Jason J., **“Moderate thermophiles including “*Ferroplasma cupricumulans*” sp. nov. dominate an industrial-scale chalcocite heap bioleaching operation”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  13. Acar Sevket, Brierley James A., Wan Rong Yu, **“Conditions for bioleaching a covellite-bearing ore”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  14. Ke Jiajun y Li Hongmei, **“Bacterial leaching of nickel-bearing pyrrhotite”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  15. Askari Zamani M.A., Hiroyoshi N., Tsunekawa M., Vaghar R., Oliazadeh M., **“Bioleaching of Sarcheshmeh molybdenite concentrate for extraction of rhenium”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  16. Olson, Gregory J., Thomas R. Clark, **“Bioleaching of molybdenite”**, Hydrometallurgy (2008), [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  17. Mousavi S.M., Yaghmaei S., Vossoughi M., Jafari A., Roostaazad R., Turunen I., **“Bacterial leaching of low-grade ZnS concentrate using indigenous mesophilic and thermophilic strains”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  18. Mousavi S.M., Jafari A., Yaghmaei S., Vossoughi M., Roostaazad R., **“Bioleaching of low-grade sphalerite using a column reactor”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
  19. Useche Y., Peña Venegas C., Cardona Vanegas G.. 2007. **“*Aspergillus niger* Tiegh (1867)”**. [http://www.siac.net.co/sib/catalogoespecies/especie.do?idB  
uscar=546&method=displayAAT](http://www.siac.net.co/sib/catalogoespecies/especie.do?idBuscar=546&method=displayAAT)
  20. Imágenes del *Aspergillus Níger*

---

<http://images.google.com.mx>

21. Acharya C., Kar R.N. Sukla L.B. y Misra V.N., 2004, **“Fungal leaching of manganese ore”**, [www.igcar.ernet.in/transiim/2004/TP-1908.pdf](http://www.igcar.ernet.in/transiim/2004/TP-1908.pdf)
22. Shi Shao-yuan, Fang Zhao-heng, Ni Jin-ren, **“Comparative study on the bioleaching of zinc sulphides”**, [www.elsevier.com/locate/procbio](http://www.elsevier.com/locate/procbio)
23. Deveci H., Akcil A., Alp I., **“Bioleaching of complex zinc sulphides using mesophilic and thermophilic bacteria: comparative importance of pH and iron”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
24. Rodríguez Y., Ballester A., Blázquez M.L., González F., Muñoz J.A., **“New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
25. Watling H.R., **“The bioleaching of nickel-copper sulfides”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)
26. Petersen J. y Dixon D.G., **“Modelling zinc heap bioleaching”**, [www.elsevier.com/locate/hydromet](http://www.elsevier.com/locate/hydromet)

---

## Apéndice 1

### Tablas

#### Experimentación 1

#### Medición de pH

Tabla VI Valores de pH para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 1						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	6.28	6.27	6.27	6.35	6.50	6.43
6	6.06	6.20	6.09	6.57	6.71	6.59
9	5.37	6.08	4.67	6.65	6.68	6.55
12	5.72	6.36	4.91	6.46	6.52	6.50
15	5.71	5.47	4.30	6.31	6.30	6.50
18	4.98	4.58	3.67	5.13	4.30	6.53
21	4.79	3.83	3.44	4.40	4.48	6.10

Tabla VII Valores de pH para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 2						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	6.42	6.38	6.36	6.44	6.37	6.40
6	6.18	6.31	6.38	6.56	6.62	6.35
9	6.16	5.67	5.60	6.35	6.36	6.37
12	6.23	5.52	5.50	6.61	7.02	7.09
15	6.01	5.28	5.31	6.69	6.98	7.07
18	5.32	4.96	4.49	6.03	6.91	7.05
21	4.87	4.70	4.05	4.24	6.24	6.72

Tabla VIII Valores de pH para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 3						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	5.95	6.53	5.97	6.05	6.02	6.43
6	5.78	6.21	5.92	5.95	5.88	6.10
9	5.35	4.67	5.62	5.93	5.54	5.87
12	5.46	4.54	6.34	6.54	6.38	6.49
15	4.79	4.28	6.24	5.50	6.29	6.17
18	4.43	4.03	4.42	4.41	5.33	5.25
21	3.88	3.55	3.81	3.66	4.76	4.32

### Medición de la cantidad de azúcar

Tabla IX Valores de azúcar para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 1						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	10.20	10.20	10.60	11.00	8.60	6.60
6	10.20	10.20	10.60	9.40	6.80	6.40
9	10.20	10.60	10.60	9.20	6.80	6.40
12	10.20	10.20	10.60	9.40	6.80	6.40
15	9.80	9.20	10.00	9.40	8.60	6.20
18	10.00	9.60	10.20	9.20	7.60	6.20
21	9.60	10.00	10.00	9.00	7.20	5.80

Tabla X Valores de azúcar para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación

HONGO 2						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	10.40	9.60	7.60	9.80	15.60	14.40
6	10.20	8.20	8.60	11.00	15.00	14.40
9	10.20	8.20	7.60	11.00	15.60	15.60
12	9.80	8.20	7.60	11.00	15.60	14.00
15	9.60	8.20	7.60	9.80	15.40	13.20
18	9.60	8.20	7.20	10.60	15.20	14.80
21	9.60	7.80	7.00	10.60	14.20	14.60

Tabla XI Valores de azúcar para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 3						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	19.60	5.60	11.60	17.00	7.80	9.60
6	19.60	5.40	10.80	17.00	7.60	11.80
9	19.20	5.40	11.80	17.00	7.60	11.80
12	19.00	5.60	11.40	16.60	7.20	11.80
15	18.60	5.20	11.20	15.80	6.80	11.60
18	18.60	5.60	11.40	16.80	7.60	12.00
21	19.60	4.80	11.60	16.60	6.80	11.80

### Medición de la cantidad de cobre lixiviado

Tabla XII Valores del % de Cu para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 1						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	1.46	1.46	1.54	0.98	0.79	1.44
6	0.89	0.86	0.86	1.10	2.49	2.35
9	1.45	1.45	1.23	0.76	0.98	2.65
12	1.26	1.26	1.59	0.68	2.95	2.85
15	1.09	1.09	1.17	1.93	1.38	2.67
18	0.83	0.83	2.18	2.23	1.73	2.38
21	1.47	1.46	1.67	1.74	1.19	3.25

Tabla XIII Valores del % de Cu para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación

HONGO 2						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	0.57	0.31	0.67	0.63	1.01	2.11
6	1.38	0.78	0.96	1.35	1.18	2.19
9	0.93	1.09	0.28	1.30	0.71	2.03
12	0.91	0.93	0.70	0.94	0.89	2.18
15	0.73	0.91	1.73	0.79	0.41	1.69
18	0.56	1.03	1.94	1.26	1.03	1.88
21	0.35	1.03	0.76	1.21	0.39	2.00

Tabla XIV Valores del % de Cu para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 3						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	0.29	0.39	1.39	1.11	1.56	1.28
6	0.42	1.11	1.90	1.43	1.23	1.64
9	0.27	0.54	1.83	1.21	2.12	1.83
12		1.03	1.79	1.64	1.91	1.31
15	0.74	0.87	1.60	1.54	1.73	1.84
18	0.82	1.14	0.83	1.28	1.67	1.02
21	0.87	0.85	1.16	1.65	1.83	1.31

### Medición de la cantidad de hierro lixiviado

Tabla XV Valores del % de Fe para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 1						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	0.51	2.26	2.04	1.91	1.49	0.38
6	1.09	0.55	1.32	1.76	0.46	0.99
9	0.43	1.62	1.61	2.55	0.71	2.11
12	0.76	1.64	0.94	1.83	0.63	0.35
15	2.32	1.92	2.94	1.63	0.33	1.24
18	1.73	1.48	8.36	0.10	0.16	0.76
21	0.29	0.80	6.48	1.56	1.13	0.52

Tabla XVI Valores del % de Fe para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 2						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	0.86	2.12	1.00	1.26	0.78	1.13
6	3.55	2.44	0.47	0.56	1.37	1.77
9	0.88	0.85	0.62	1.81	0.40	0.12
12	2.98	0.62	1.71	0.92	2.28	4.91
15	0.64	1.80	6.26	2.59	0.83	1.24
18	1.52	0.49	1.38	2.08	0.63	0.40
21	2.24	2.34	5.99	1.96	0.70	1.59

Tabla XVII Valores del % de Fe para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

HONGO 3						
Día	Sin	1 g	3 g	5 g	10 g	15 g
3	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.64	1.21	1.08	1.16	3.39	1.32
9	0.20	0.00	1.63	0.63	0.20	0.11
12		0.49	2.23	1.68	1.78	1.78
15	4.43	1.50	4.39	3.55	2.08	2.91
18	2.48	2.66	0.80	2.00	2.21	0.99
21	1.19	1.28	1.09	2.44	1.73	1.54

### Medición de la cantidad de plata lixiviada

Tabla XVIII Valores del % de Ag para el Hongo 1 a temperatura ambiente y sin agitación.

Hongo 1		
Sin	0.04	0.04
1g	0.04	0.03
3g	0.05	0.05
5g	0.04	0.08
10g	0.04	0.06
15g	0.04	0.05
Día	18	21

Tabla XIX Valores del % de Ag para el Hongo 2 a temperatura ambiente y sin agitación.

Hongo 2		
Sin	0.04	0.06
1g	0.04	0.04
3g	0.09	0.04
5g	0.05	0.05
10g	0.04	0.06
15g	0.06	0.10
Día	18	21

Tabla XX Valores del % de Ag para el Hongo 3 a temperatura ambiente y sin agitación.

Hongo 3		
Sin	0.05	0.09
1g	0.09	0.04
3g	0.06	0.05
5g	0.03	0.05
10g	0.09	0.04
15g	0.09	0.04
Día	18	21

### 3.2 Experimentación 2

**35 °C y 100 rpm**

**Medición de pH**

Tabla XXI Valores del pH para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	pH			Promedio	Desviación Estándar
	10 g 1	10 g 2	10 g 3		
3	6.45	6.70	6.90	6.68	0.23
6	6.20	5.90	5.73	5.94	0.24
9	6.37	5.73	5.34	5.81	0.52
12	6.25	5.53	4.23	5.34	1.02
15	6.11	4.38	3.79	4.76	1.21
18	6.05	3.30	2.86	4.07	1.73
21	5.86	3.45	2.80	4.04	1.61

Tabla XXII Valores del pH para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	pH			Promedio	Desviación Estándar
	15 g 1	15 g 2	15 g 3		
3	7.05	7.02	6.98	7.02	0.04
6	6.32	6.61	6.80	6.58	0.24
9	5.65	7.21	5.74	6.20	0.88
12	5.50	6.19	5.25	5.65	0.49
15	4.88	5.32	4.32	4.84	0.50
18	4.21	5.25	4.01	4.49	0.67
21	4.02	5.40	3.59	4.34	0.95

### Medición de la cantidad de azúcar

Tabla XXIII Valores del azúcar para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	Azúcar			Promedio	Desviación Estándar
	10 g 1	10 g 2	10 g 3		
3	10.00	9.90	9.80	9.90	0.10
6	9.90	9.20	9.40	9.50	0.36
9	10.00	9.10	9.40	9.50	0.46
12	9.60	9.00	8.40	9.00	0.60
15	9.50	9.40	9.30	9.40	0.10
18	9.50	9.40	9.60	9.50	0.10
21	9.00	9.10	9.20	9.10	0.10

Tabla XXIV Valores del azúcar para muestras de 15 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	Azúcar			Promedio	Desviación Estándar
	15 g 1	15 g 2	15 g 3		
3	9.10	9.80	9.80	9.57	0.40
6	8.60	8.40	9.10	8.70	0.36
9	9.10	9.30	9.00	9.13	0.15
12	9.00	8.60	8.80	8.80	0.20
15	10.00	9.40	9.60	9.67	0.31
18	9.20	9.00	9.00	9.07	0.12
21	9.20	8.50	9.50	9.07	0.51

### Medición de la cantidad de cobre lixiviado

Tabla XXV Valores del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	% Cu			Promedio	Desviación Estándar
	10 g 1	10 g 2	10 g 3		
3	11.98	8.58	11.90	10.82	1.94
6	24.48	16.15	19.23	19.95	4.21
9	9.55	33.00	47.05	29.87	18.95
12	21.43	69.93	85.03	58.79	33.23
15	14.13	80.88	116.63	70.54	52.03
18	36.33	148.93	151.78	112.34	65.85
21	63.18	155.88	181.08	133.38	62.09

Tabla XXVI Valores del % de Cu para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	% Cu			Promedio	Desviación Estándar
	15 g 1	15 g 2	15 g 3		
3	15.60	13.40	16.43	15.14	1.56
6	15.90	16.90	14.85	15.88	1.03
9	39.63	23.95	40.23	34.60	9.23
12	74.78	29.35	67.48	57.20	24.39
15	135.05	17.98	137.78	96.93	68.39
18	114.85	135.40	43.50	97.92	48.23
21	192.53	88.83	185.85	155.73	58.04

### Medición de la cantidad de hierro lixiviado

Tabla XXVII Valores del % de Fe para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	% Fe			Promedio	Desviación Estándar
	10 g 1	10 g 2	10 g 3		
3	0.96	0.25	0.26	0.49	0.41
6	2.00	0.72	0.58	1.10	0.78
9	0.78	0.45	0.38	0.53	0.22
12	2.82	0.46	0.61	1.29	1.32
15	0.88	0.66	0.48	0.67	0.20
18	0.75	0.73	0.61	0.69	0.07
21	0.82	0.68	1.17	0.89	0.25

Tabla XXVIII Valores del % de Fe para muestras de 10 g con el Hongo 1, a 35 °C y 100 rpm.

HONGO 1					
35 °C 100 rpm					
Día	% Fe			Promedio	Desviación Estándar
	15 g 1	15 g 2	15 g 3		
3	0.29	0.32	1.23	0.61	0.54
6	0.60	0.56	2.12	1.09	0.89
9	0.36	0.49	0.54	0.46	0.09
12	0.64	0.67	0.56	0.62	0.06
15	0.53	0.44	0.44	0.47	0.05
18	0.62	0.61	0.79	0.67	0.10
21	0.81	0.67	0.83	0.77	0.09