



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUÍMICA E
INDUSTRIAS EXTRACTIVAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA

“EVALUACIÓN DE MEDIOS LIXIVIANTES EN EL
TRATAMIENTO DE BATERÍAS DE CELULAR”

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

PRESENTA:
BRENDA JAZMIN DELGADO MIRANDA

DIRECTOR DE TESIS:
M. EN C. JESUS SALVADOR MEZA ESPINOZA



FEBRERO 2015



SECRETARIA
DE
EDUCACION PUBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



T-111-14

México, D. F., 17 de septiembre del 2014.

A la C. Pasante:
BRENDA JAZMIN DELGADO MIRANDA

Boleta:
2010320312

Carrera:
IMM

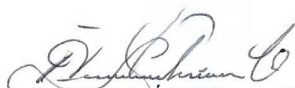
Generación:
2009-2013


Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **C. M. en C. Jesús Salvador Meza Espinoza**, sea orientador en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:


“Evaluación de agentes lixiviantes en el tratamiento de baterías de celular”.


Resumen.
Introducción.
I.- Antecedentes.
II.- Desarrollo experimental.
III.- Resultados y discusión.
Conclusiones.
Referencias.
Anexos.

Se concede un plazo máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el Jurado asignado.


M. en C. Humberto Ángel Concha Pérez
Presidente de la Academia de
Metalurgia Extractiva.


M. en C. Jesús Salvador Meza Espinoza
Director de Tesis
Ced. Prof. 1415024


Lic. Guillermo Alberto de la Torre Arteaga
Jefe del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico


Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado
Subdirector Académico Interino



SECRETARIA
DE
EDUCACION PUBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS
DEPARTAMENTO DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO ACADÉMICO



T-111-14

México, D. F., 16 de enero del 2015.

A la C. Pasante:
BRENDA JAZMIN DELGADO MIRANDA
PRESENTE

Boleta:
2010320312

Carrera:
IMM

Generación:
2009-2013

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

“Evaluación de agentes lixiviantes en el tratamiento de baterías de celular”

encontramos que el citado Trabajo de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para autorizar el Examen Profesional y **PROCEDER A SU IMPRESIÓN** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente

JURADO


M. en C. J. Salvador Meza Espinoza
Presidente


Dr. Elias Rangel Salinas
Secretario


M. en C. Humberto Ángel Concha Pérez
1er. Vocal


Dr. Ricardo Gerardo Sánchez Alvarado
2º Vocal


Dr. Ángel de Jesús Morales Ramírez
3er. Vocal

c.c.p.- Expediente
GATA/rcr

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme todo lo que me has dado, por permitirme llegar hasta donde estoy, por ser siempre mi guía. Te dedico esta tesis.

A mis papis por darme la vida, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, por sus sabios consejos en momentos difíciles, por darme las herramientas para vivir, por luchar conmigo por lo que queríamos y que hoy cumplimos, los amo.

A Sharon, Aaron, Uziel, Beso, Joss, Adán, Eli, Oscar, Eva, Faus, China, por vivir esos momentos inolvidables conmigo, por todas las sonrisas, platicas, lagrimas, gritos compartidos, por enseñarme a disfrutar de todo lo que se vive, por el apoyo que siempre me han brindado y por estar siempre en mi vida, los amo con todo mi corazón y no podría tener mejor familia.

Al Doctor Ángel por compartir su conocimiento conmigo, por su tiempo, por su dedicación, por el apoyo que en todo momento me brindó, y todo esto deja huella en mi vida y se ve reflejado en este trabajo y en mi desarrollo profesional.

A Beso por ser mi cómplice desde la infancia, por esas travesuras, risas, peleas, lagrimas que hemos compartido, sin ti no hubiera podido llegar hasta donde estoy, no sería quien soy, porque eres una pieza clave en este trabajo y una pieza esencial en mi vida, porque te mereces más que este “Gracias”, te amo.

A la Maestra Chelo por la ayuda, el tiempo, conocimiento, recursos y la vasta experiencia que compartió conmigo, sin olvidar esas tardes de trabajo que se volvían amenas con su plática.

Al IPN por ser mi alma mater, por la oportunidad que me brindó, por darme los conocimientos y herramientas que hoy me forman como profesionista, por darme tantos

momentos de felicidad, desesperación, frustración, por permitirme conocer muchas personas que marcaron mi vida.

A mis jurado por el tiempo invertido en mi trabajo, por los conocimientos compartidos conmigo.

A Brenely por tu amistad pero sobre todo por tu ayuda, por tu tiempo, por explicarme, por estar conmigo en momentos de trabajo, por los días que hacías más ligera la carga de trabajo, por esos momentos que hemos vivido juntas.

A Carlos y Ángel por ser mis mejores amigos, por creer en mí, por sus palabras de aliento en momentos de debilidad, por lo que me han enseñado, por lo que hemos vivido juntos y por tantos años de amistad, los amo.

A ti porque me apoyas, me ayudas y porque sé que siempre podre contar contigo, porque cambiaste mi vida.

A mis amigos por sus palabras de aliento, por su apoyo, por su tiempo y por cada una de las cosas que hemos vivido.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPITULO I. ANTECEDENTES.....	4
1.1 Litio.....	4
1.1.1 Obtención del litio	5
1.1.2 Usos.....	8
1.2 Cobre.....	9
1.3 Manganeso.....	10
1.4 Biolixiviación	12
1.4.1 Clasificación física de la biolixiviación	14
1.4.2 Factores que influyen en la disolución de los metales.....	17
1.4.3 Microorganismos	19
1.4.4 Biolixiviación de minerales sulfurados	20
1.4.5 Biolixiviación de minerales oxidados	21
1.4.6 Biolixiviación de menas de cobre	21
1.4.7 Biolixiviación de menas de uranio	21
1.5 Hongo Aspergillus Níger.....	22
1.5.1 Ciclo del crecimiento microbiano	24
1.6 Reciclaje.....	25
1.7 Baterías de celular.....	28
1.7.1 Baterías de Litio (“Li-Ion”).....	29
1.7.2 Disposición de baterías de celular.....	31
1.7.3 Proceso de reciclaje de valores metálicos actuales de baterías	33
1.8 Ácidos.....	34
1.8.1 Ácidos inorgánicos	36

1.8.2 Ácidos orgánicos	37
CAPITULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	39
2.1 Equipo y material	40
2.2 Preparación de baterías de celular	41
2.3 Lixiviación bacteriana.....	43
2.3.1 Preparación del medio de cultivo y esterilización	43
2.3.2 Inoculación del hongo <i>Aspergillus Níger</i>	45
2.3.3 Biolixiviación	47
2.3.4 Filtrado y dilución.....	50
2.4 Lixiviación con ácidos orgánicos e inorgánicos.....	51
2.4.1 Preparación del medio lixivante y ajuste de pH	51
2.4.2 Lixiviación.....	52
2.4.3 Preparación de muestras de lixiviación	55
2.5 Espectrofotetría de absorción atómica Li, Cu, Mn	55
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
3.1 Composición química de las baterías	57
3.2 Medición de pH en la biolixiviación	59
3.3 Medición de azúcar en la biolixiviación	63
3.4 Porcentajes de recuperación en la biolixiviación.....	67
3.4.1 Recuperación de Cu.....	67
3.4.2 Recuperación de Li.....	71
3.4.3 Recuperación de Mn	75
3.5 Porcentaje de recuperación en diversos medios de lixiviación convencional.	78
3.5.1 Ácido Acético.....	79
3.5.2 Ácido Nítrico	85
3.5.3 Ácido Cítrico	92

3.6 Porcentajes de porcentajes más altos obtenidos en cada uno de los medios lixiviantes.	101
CONCLUSIONES.....	105
Propuestas a futuro	107
REFERENCIAS	108
ANEXOS.....	111
A. Medición de pH.....	111
B. Medición de azúcar	114
C. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación.....	117
D. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación	120
E. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación	123
F. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido acético.....	126
G. Porcentajes de recuperación de Li en ácido acético	126
H. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido acético	127
I. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido nítrico	127
J. Porcentajes de recuperación de Li en ácido nítrico	128
K. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido nítrico.....	128
L. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido cítrico	129
M. Porcentajes de recuperación de Li en ácido cítrico	129
N. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido cítrico	130
O. Datos de curvas de calibración	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama extracción/Aplicación del litio	6
Figura 2. Obtención de Li_2CO_3	8
Figura 3. Clasificación física de la biolixiviación	14
Figura 4. Lixiviación en “montones”	16
Figura 5. Micrografías de Hongo <i>Aspergillus niger</i>	24
Figura 6. Reciclaje de celulares.....	32
Figura 7. Diagrama simplificado del proceso de tratamiento de pilas de todo tipo. [21]	34
Figura 8. Diagrama de desarrollo experimental	39
Figura 9. Recolección de pilas de celular	41
Figura 10. Composición interna de una batería de celular.	42
Figura 11. Atricionador moliendo baterías de celular	42
Figura 12. Muestra de 5 g de batería molida	43
Figura 13. Medio de cultivo.....	44
Figura 14. Matraz preparado para esterilizar y autoclave.....	45
Figura 15. Proceso de inoculación	47
Figura 16. Incubadora	49
Figura 17. Potenciometro portátil.....	49
Figura 18. Refractometro portátil	50
Figura 19. Filtrado al vacio	51
Figura 20. Preparación del medio lixivante y ajuste de pH	52
Figura 21. Lixiviación	54
Figura 22. Dilución de muestras	55
Figura 23. Equipo de absorción atómica	56
Figura 24. Medición de pH en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm	60
Figura 25. Medición de pH en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación	60
Figura 26. Medición de pH en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm	61
Figura 27. Medición de pH en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm	61
Figura 28. Medición de pH en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm	62
Figura 29. Medición de pH en la biolixiviación de la muestra 1	63
Figura 30. Medición de azúcar en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm.....	64

Figura 31. Medición de azúcar en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación	64
Figura 32. Medición de azúcar en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm.....	65
Figura 33. Medición de azúcar en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm.....	65
Figura 34. Medición de azúcar en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm.....	66
Figura 35. Medición de azúcar en la biolixiviación de la muestra 1	66
Figura 36. Porcentaje de Cu recuperado a 40 °C y 75 rpm.....	68
Figura 37. Porcentaje de Cu recuperado a temperatura ambiente y sin agitación	68
Figura 38. Porcentaje de Cu recuperado a 40 °C y 100 rpm.....	68
Figura 39. Porcentaje de Cu recuperado a 40 °C y 125 rpm.....	69
Figura 40. Porcentaje de Cu recuperado a 45 °C y 100 rpm.....	69
Figura 41. Porcentaje de recuperación de Cu en la biolixiviación	70
Figura 42. Porcentaje de Cu recuperado en la muestra 1	71
Figura 43. Porcentaje de Li recuperado a 40 °C y 75 rpm.....	72
Figura 44. Porcentaje de Li recuperado a temperatura ambiente y sin agitación	72
Figura 45. Porcentaje de Li recuperado a 40 °C y 100 rpm.....	73
Figura 46. Porcentaje de Li recuperado a 40 °C y 125 rpm.....	73
Figura 47. Porcentaje de Li recuperado a 45 °C y 100 rpm.....	73
Figura 48. Porcentaje de recuperación de Li en la biolixiviación	74
Figura 49. Porcentaje de Li recuperado en la muestra 1	75
Figura 50. Porcentaje de Mn recuperado a 40 °C y 75 rpm	75
Figura 51. Porcentaje de Mn recuperado a temperatura ambiente y sin agitación.....	76
Figura 52. Porcentaje de Mn recuperado a 40 °C y 100 rpm	76
Figura 53. Porcentaje de Mn recuperado a 40 °C y 125 rpm	76
Figura 54. Porcentaje de Mn recuperado a 45 °C y 100 rpm	77
Figura 55. Porcentaje de recuperación de Mn en la biolixiviación	77
Figura 56. Porcentaje de Mn recuperado en la muestra.....	78
Figura 57. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 40 °C y 75 rpm.....	79
Figura 58. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 40 °C y 100 rpm.....	80
Figura 59. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 40 °C y 125 rpm.....	80
Figura 60. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 45 °C y 100 rpm.....	81

Figura 61. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético	81
Figura 62. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 40 °C y 75 rpm	82
Figura 63. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 40 °C y 100 rpm	82
Figura 64. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 40 °C y 125 rpm	83
Figura 65. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 45 °C y 100 rpm	83
Figura 66. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético	84
Figura 67. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido acético	85
Figura 68. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 40 °C y 75 rpm	86
Figura 69. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 40 °C y 100 rpm	87
Figura 70. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 40 °C y 125 rpm	87
Figura 71. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 45 °C y 100 rpm	88
Figura 72. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico	88
Figura 73. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 40 °C y 75 rpm	89
Figura 74. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 40 °C y 100 rpm	90
Figura 75. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 40 °C y 125 rpm	90
Figura 76. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 45 °C y 100 rpm	91
Figura 77. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico	91
Figura 78. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido nítrico	92
Figura 79. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm	93
Figura 80. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 40 °C y 100 rpm	93
Figura 81. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 40 °C y 125 rpm	94
Figura 82. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 45 °C y 100 rpm	94
Figura 83. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico	95
Figura 84. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm	96
Figura 85. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 40 °C y 100 rpm	96
Figura 86. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 40 °C y 125 rpm	97
Figura 87. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 45 °C y 100 rpm	97
Figura 88. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico	98
Figura 89. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm	99
Figura 90. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 40 °C y 100 rpm	99
Figura 91. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 40 °C y 125 rpm	100

Figura 92. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 45 °C y 100 rpm	100
Figura 93. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido nítrico.....	101
Figura 94. Curva de calibración para Cu	131
Figura 95. Curva de calibración para Li	131
Figura 96. Curva de calibración para Mn.....	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Principales propiedades químicas y físicas del litio	4
Tabla II. Principales propiedades físicas y químicas del Cobre	9
Tabla III. Principales propiedades químicas y físicas del manganeso [13]	11
Tabla IV. Reactivos utilizados	40
Tabla V. Equipo utilizado	40
Tabla VI. Composición del medio de cultivo	44
Tabla VII. Condiciones de las muestras de biolixiviación	48
Tabla VIII. Propiedades de algunos ácidos importantes. [23]	53
Tabla IX. Condiciones de las muestras de lixiviación convencional	54
Tabla X. Porcentajes de los elementos presentes en baterías de celular	59
Tabla XI. Recuperaciones máximas de Mn para cada sistema en Ác, Acético	85
Tabla XII. Porcentajes de recuperación más altos a 40 °C y 75 rpm	102
Tabla XIII. Porcentajes de recuperación más altos a 40 °C y 100 rpm	102
Tabla XIV. Porcentajes de recuperación más altos a 40 °C y 125 rpm.	103
Tabla XV. Porcentajes de recuperación más altos a 45 °C y 100 rpm.	103
Tabla XVI. Porcentajes de recuperación más altos a temperatura ambiente y sin agitación.	104
Tabla XVII. Valores de pH en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm	111
Tabla XVIII. Valores de pH en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación	111
Tabla XIX. Valores de pH en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm	112
Tabla XX. Valores de pH en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm	112
Tabla XXI. Valores de pH en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm	113
Tabla XXII. Valores de pH en la biolixiviación para la muestra 1	113
Tabla XXIII. Valores de azúcar a 40 °C y 75 rpm	114
Tabla XXIV. Valores de azúcar a temperatura ambiente y sin agitación	114
Tabla XXV. Valores de azúcar a 40 °C y 100 rpm	115
Tabla XXVI. Valores de azúcar a 40 °C y 125 rpm	115
Tabla XXVII. Valores de azúcar a 45 °C y 100 rpm	116
Tabla XXVIII. Valores de azúcar para la muestra 1	116

Tabla XXIX. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm	117
Tabla XXX. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación	117
Tabla XXXI. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm	118
Tabla XXXII. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm	118
Tabla XXXIII. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm	119
Tabla XXXIV. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación para la muestra 1	119
Tabla XXXV. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm	120
Tabla XXXVI. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación	120
Tabla XXXVII. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm	121
Tabla XXXVIII. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm	121
Tabla XXXIX. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm	122
Tabla XL. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación para la muestra 1 ...	122
Tabla XLI. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm .	123
Tabla XLII. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación	123
Tabla XLIII. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm	124
Tabla XLIV. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm	124
Tabla XLV. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm	125

Tabla XLVI. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación para la muestra 1	125
Tabla XLVII. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido acético	126
Tabla XLVIII. Porcentajes de recuperación de Li en ácido acético	126
Tabla XLIX. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido acético.....	127
Tabla L. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido nítrico	127
Tabla LI. Porcentajes de recuperación de Li en ácido nítrico	128
Tabla LII. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido nítrico	128
Tabla LIII. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido cítrico.....	129
Tabla LIV. Porcentajes de recuperación de Li en ácido cítrico.....	129
Tabla LV. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido cítrico.....	130
Tabla LVI. Datos de curva de calibración de Cu.....	130
Tabla LVII. Datos de curva de calibración de Li	131
Tabla LVIII. Datos de curva de calibración de Mn	132

RESUMEN

El reciclaje es un proceso que transforma y reprocesa materiales para usarlos nuevamente, obteniendo recursos valiosos que de otro modo serían desechados dañando al ambiente. Además, es un proceso que por su naturaleza ahorra dinero y crea empleos, de tal manera que ayuda a la economía. En la actualidad, el desecho de baterías de celular representa un problema ambiental pues contiene elementos que generan reacciones tóxicas, como Co, Cu, Ni, etc. Por lo tanto, es necesario que estos desechos tengan un manejo adecuado, disminuyendo el daño ambiental, por lo que es imperativo la implementación de nuevos procesos como la biolixiviación. Este, es un proceso orgánico de disolución, realizado por bacterias que oxidan materiales permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos para su reciclaje. El *Aspergillus Níger* es un hongo muy común y adaptable que puede, por ejemplo, ser usado en la biolixiviación para ayudar a incrementar el porcentaje de recuperación de valores metálicos. El objetivo del presente trabajo es comparar la recuperación de diversos valores metálicos utilizando medios de lixiviación convencionales contra la biolixiviación con la finalidad de comprobar si este último es más factible.

Para la experimentación se utilizaron baterías de celular para recuperar Li, Cu y Mn a través de procesos de biolixiviación y lixiviación convencional y observar su capacidad de lixiviación en cada uno de los medios. Primero se realizó la recolección de baterías, se desensamblaron para triturarlas, se molieron con ayuda de un atricionador, se procedió a la biolixiviación durante 21 días, donde se encontró un pH mínimo de 5.79, el cual sirvió de base para estandarizar el pH en los medios del proceso de lixiviación convencional con el fin de tener un parámetro de comparación, y en estas, las pruebas duraron 140 minutos. Se prepararon las muestras para su posterior análisis en un espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin Elmer modelo A-Analyst 300.

Se presentan los resultados de diversas pruebas experimentales de biolixiviación y lixiviación convencional para la recuperación de Li, Cu y Mn a cuatro diferentes condiciones teniendo como variables: 1) pH; 2) Temperatura; 3) Agitación; y 4) Tiempo. También se manejaron como variables específicas, el azúcar en el caso de la biolixiviación y el tipo de ácido (ácidos orgánicos e inorgánicos) para la lixiviación convencional, debido a la naturaleza de cada proceso. Para el litio, el porcentaje de recuperación más alto fue 23.04% y se encontró en la lixiviación convencional con ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm, habiendo un 25% más de recuperación que en otros medios. Para el cobre, el porcentaje de recuperación más alto fue 10.96% y se encontró en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm, siendo 6 veces mayor la recuperación que en otros medios. Para el manganeso, el porcentaje de recuperación más alto fue 1.18% y se encontró en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm, siendo 5 veces mayor la recuperación que en otros medios.

INTRODUCCIÓN

Un proceso hidrometalúrgico es aquel en el cual se obtiene el valor metálico de interés, purificado con base en reacciones químicas en solución acuosa. El proceso hidrometalúrgico más importante es la lixiviación, en la cual el material (ya sea un mineral o un material de desecho) que contiene el metal que se desea extraer se disuelve de un modo selectivo. La cantidad de energía para tratar los materiales en procesos hidrometalúrgicos es menor que los procesos pirometalúrgicos, por lo tanto son también más económicos. Sin embargo las velocidades de reacción son lentas, y generan un problema ambiental debido al desecho de residuos y aguas residuales.

Por otro lado, es importante mencionar que en la actualidad el uso de celular ha incrementado, por lo que su desecho también. Los celulares, y con ellos sus baterías, son tirados junto con los residuos urbanos lo que es muy dañino al ambiente puesto que contiene sustancias tóxicas que no son tratadas como se deben. Estas baterías contienen elementos que con un proceso adecuado pueden ser recuperados y reciclados.

Por tanto es de suma importancia buscar nuevos procesos ingenieriles que utilicen alternativas no tradicionales con el fin de aprovechar nuevos agentes lixiviantes y así también atacar un problema ambiental, aprovechando el reciclaje de un metal valor.

Se sugieren procesos biotecnológicos que presentan como ventaja que la cantidad de metal recuperado aumenta con la ayuda de hongos o bacterias respecto con los procesos de biolixiviación convencionales, además de que son procesos económicos, puesto que los agentes lixiviantes únicamente requieren algunos nutrientes y una fuente de energía, usualmente azúcar, además de que son amigables con el medio ambiente.

En el presente trabajo se utiliza el hongo *Aspergillus niger* como agente biológico en la recuperación de litio, manganeso y cobre, ya que es un hongo común, que se adapta

fácilmente a casi cualquier condición en el que esté presente y tiene una buena resistencia a sustancias tóxicas.

Siendo así el objetivo general recuperar metales valor a partir de baterías de celular utilizando diversos medios lixiviantes. Teniendo cuatro objetivos particulares:

1. Recopilar, clasificar, triturar y moler baterías de celular de desecho.
2. Analizar las mejores condiciones para proponer un proceso de biolixiviación de baterías de celular utilizando el hongo *Aspergillus niger*.
3. Determinar el intervalo de pH del licor lixiviante en un proceso de biolixiviación en un proceso de biolixiviación con *Aspergillus niger*.
4. Comparar la recuperación del Li, Cu y Mn utilizando ácido nítrico, ácido acético y ácido cítrico respecto del proceso de biolixiviación.

Este trabajo se basa en la hipótesis de que el proceso de biolixiviación con *Aspergillus niger* presentara recuperaciones similares a las obtenidas con ácido mineral (ácido nítrico) un ácido débil (ácido acético) y un ácido orgánico (ácido cítrico) cuando se comparan en un mismo intervalo de pH.

CAPITULO I. ANTECEDENTES

1.1 Litio.

El litio es el elemento químico más ligero, es un metal blando, de color blanco plata que se oxida rápidamente en aire o agua y por ser reactivo no se encuentra en estado libre en la naturaleza. Es altamente inflamable y ligeramente explosivo cuando se expone al aire y especialmente al agua, además de corrosivo. Se extrae de salmueras donde existe en sales naturales y de depósitos minerales principalmente de lepidolita, petalita, espodumeno y amblygonita. El estado del litio en su forma natural es sólido, y es un elemento perteneciente al grupo de los alcalinos. [1]

En la Tabla I se muestran las principales propiedades químicas y físicas del litio. [2]

Tabla I. Principales propiedades químicas y físicas del litio

Propiedad	Valor	Unidades
Masa atómica	6.941	U
Densidad	0.534	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Punto de fusión	180.5	$^{\circ}\text{C}$
Punto de ebullición	1,341	$^{\circ}\text{C}$
Calor específico	3,582	$\text{Jg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Conductividad eléctrica	11.7×10^6	$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$
Conductividad térmica	84.7	$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$

El litio se encuentra en la naturaleza en aproximadamente 145 minerales, pero solamente en algunos puede considerarse en cantidades comerciales, además de

presentarse en salmueras, aguas termales y agua de mar, en cantidades muy diferentes que oscilan entre 20 ppm y 65 ppm. [2]

Este elemento puede encontrarse de diversas formas, como puede ser en concentraciones anómalas de pegmatitas; en ambientes sedimentarios asociados con arcilla; en zonas de alteración hidrotermal asociados a minerales a bajas como a altas temperaturas; en evaporitas no marinas; en salmueras de ambientes desérticos; en aguas salinas o salmueras asociadas a yacimientos de petróleo; en yacimientos de boro; berilio, flúor, manganeso y posiblemente fosfato; en ambientes lacustre asociados a silicatos de magnesio; en aguas, plantas y suelos de ambientes desérticos; en rocas sedimentarias ricas en hierro. [2]

1.1.1 Obtención del litio. [1]

El litio se obtiene a partir de dos fuentes naturales. La primera es del mineral espodúmeno (3.73% Li, 8.03% Li_2O) que es un silicato doble de aluminio y litio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) que se encuentra asociado con el cuarzo, mica y feldespato. La otra fuente de obtención es a partir de salmueras naturales de los salares, encontrándose en forma de sales de litio, principalmente, sulfato doble de litio y potasio (KLiSO_4). En la Figura 1 se muestra un diagrama de flujo que presenta la obtención del litio, a partir de estas dos fuentes con sus respectivas aplicaciones que derivan de éstas. Los grandes yacimientos comerciales existentes en el mundo se encuentran en los Estados Unidos (Carolina del Norte), Australia Canadá, Zaire, China, y Rusia.

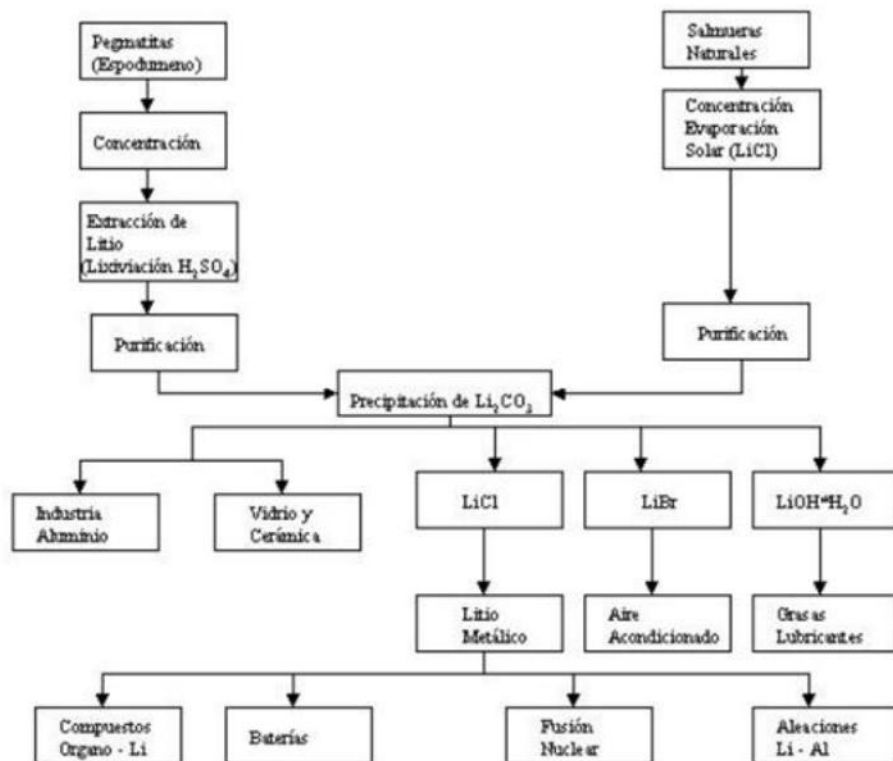


Figura 1. Diagrama extracción/Aplicación del litio

Descripción del proceso de obtención de Li_2CO_3

El carbonato de litio (Li_2CO_3), es el compuesto base más importante entre las sales de Li. Su importancia principalmente radica en que es fácil de purificar y sirve para la conversión de otras sales de litio tales como LiCl , LiBr y $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ y otros compuestos. Se estima que la producción mundial es de 45,000 toneladas anuales, siendo Chile el principal productor, mientras que el principal consumidor de carbonato de litio es Estados Unidos.

La extracción de las salmueras del salar, se realiza mediante bombas que succionan la salmuera a 30 m de profundidad, descargándolas a través de cañerías a un sistema de pozas de evaporación solar, donde el Li se concentra desde 0.17% a 4.3%. Durante el proceso de evaporación, precipitan sales en las pozas en forma secuencial, las que son

cosechadas y descartadas como impurezas: halita (NaCl), silvinita (NaCl + KCl), carnalita (KCl x MgCl₂ x 6H₂O) y bischofita (MgCl₂ x 6H₂O). En las pozas de mayor concentración precipita carnalita de litio. (LiCl-MgCl₂ x 7H₂O), con el objeto de recuperar el litio que contiene, es repulpeada y lavada con una solución saturada en cloruro de magnesio, pero no saturada en cloruro de litio. La bischofita (MgCl₂ x 6H₂O) presente y no disuelta, se separa por centrifugación y es eliminada del sistema. La salmuera finalmente así concentrada alcanza 5.8% Li, 20% Mg y 0.7% ácido bórico (H₃BO₃), encontrándose lista para ser transportada a la planta química.

El tratamiento químico en la Planta consiste en eliminar el magnesio remanente, en dos etapas de purificación. Para ello, la salmuera concentrada se diluye hasta un contenido de 0.6% de Li. Este producto se obtiene por reacción en caliente (alrededor de 85°C), entre la salmuera purificada libre de magnesio (1ppm) y una solución de Na₂CO₃, precipitando el Li₂CO₃, según la reacción (1). El producto final se seca y se comercializa en cristales (70%), o bien se compacta para ser vendido en forma de gránulos (30%). La pureza del producto es cercana al 99.5% Li₂CO₃.



En la Figura 2 se muestra un diagrama que describe el proceso de obtención de Li₂CO₃

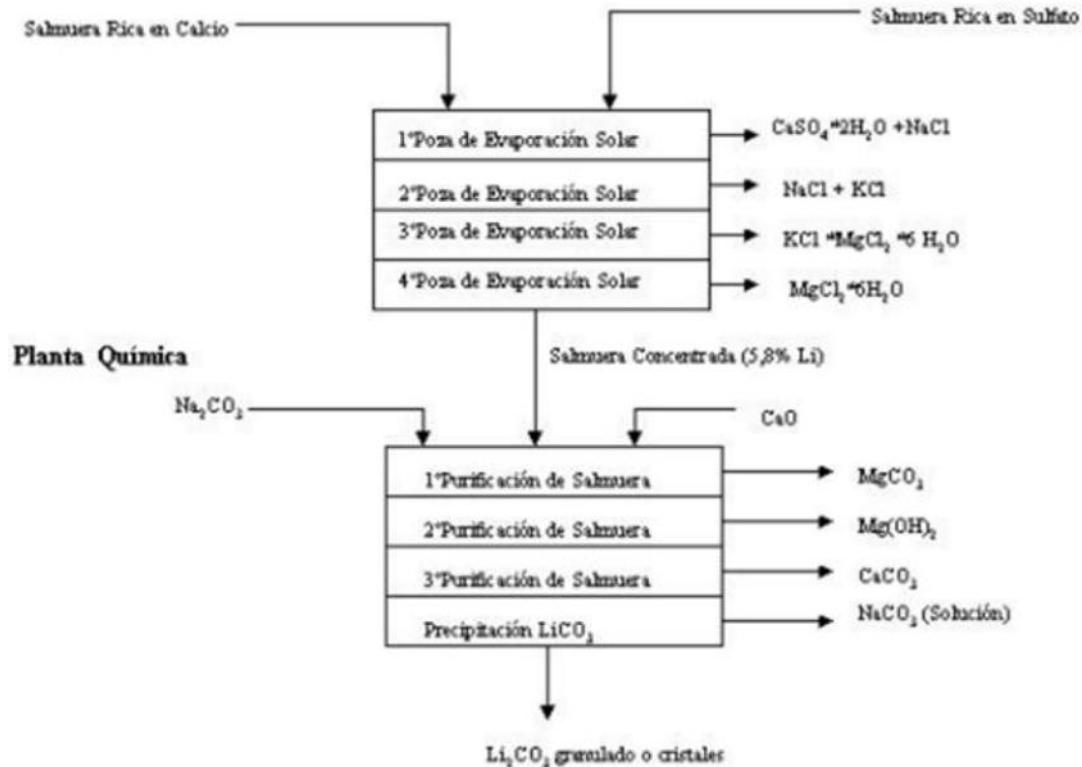


Figura 2. Obtención de Li_2CO_3

1.1.2 Usos [1]

El carbonato de litio es el producto de mayor consumo. La industria de la cerámica y vidrio, y las aleaciones de aluminio-litio, son las mayores consumidoras de carbonato de litio, que aproximadamente demandan un 65% del mercado de litio. Además el carbonato de litio sirve de punto de partida en la obtención de la mayor parte de los otros derivados químicos de litio. Le sigue en orden de importancia el hidróxido de litio el que abarca un cuarto del mercado. El resto del mercado está constituido por el fluoruro de litio, el hipoclorito de litio, el cloruro de litio, butil litio y litio metálico.

Las principales industrias consumidoras de litio son: Industria de aluminio, vidrio y cerámica con el 65% del mercado aproximadamente, fabricación de grasas industriales de tipo multiuso con menos del 20% de la demanda, el 15% restante se reparte en:

Sistema de aire acondicionado y deshumidificación, fabricación de caucho sintético, fabricación de productos farmacéuticos, fabricación de baterías primarias (pilas secas), aleaciones, y otros variados usos de los diferentes productos químicos de litio que se fabrican (alrededor de 70 variedades).

1.2 Cobre

El cobre es un metal blando, es muy buen conductor eléctrico. Después de la plata, es el material que tiene la mejor conductibilidad eléctrica y térmica. El cobre presenta estabilidad frente al agua. Con aire húmedo se forma una capa de pátina impermeable (carbonato de cobre) que protege el cobre contra nueva corrosión. Para proteger el cobre contra los efectos del azufre, por ejemplo causado por un aislante de caucho natural, es necesario estañar el cobre. El conformado en frío, le confiere acritud al cobre, pero recociéndolo se vuelve a ablandar. Los compuestos de cobre suelen ser tóxicos. [3] En la Tabla II se muestran las principales propiedades físicas del Cobre. [4]

Tabla II. Principales propiedades físicas y químicas del Cobre

Propiedad	Valor	Unidades
Masa atómica	63.536	U
Densidad	8.96	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Punto de fusión	1083.4	$^{\circ}\text{C}$
Punto de ebullición	2926.8	$^{\circ}\text{C}$
Calor específico	0.385	$\text{J}\cdot(\text{g } ^{\circ}\text{C})^{-1}$
Conductividad eléctrica	58x106	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
Conductividad térmica	397	$\text{W}\cdot(\text{mK})^{-1}$

Típicamente, el cobre se produce mediante un proceso pirometalúrgico (de alta temperatura): se concentra mineral de cobre con alto contenido de azufre y a continuación se convierte en una masa de sulfuro de hierro y de sulfuro de cobre. El oxígeno que se introduce en la masa convierte el sulfuro de hierro y el sulfuro de cobre en un cobre impuro, llamado cobre blíster, que después es purificado. Otros métodos incluyen lixiviar el cobre a partir de minerales de bajo azufre con un ácido débil y después extraerlo electrolíticamente de la solución. [5]

En el cobre se logra un elevado grado de pureza, de aproximadamente un 99.98% utilizando procedimientos de fabricación electrolíticos, este metal se denomina cobre catódico. Refundiendo se obtiene el cobre electrolítico, utilizado preferentemente en electrotecnia. Contiene una proporción muy reducida de oxígeno (0.01 a 0.05%). Si se trata de soldar el cobre, hay que utilizar un cobre que no contenga oxígeno. [3]

El cobre electrolítico se emplea en electrotecnia preferentemente como material conductor para cables eléctricos, barras de corriente, hilo de bobinas y pistas conductoras de circuitos impresos. En la construcción de motores y generadores se utiliza el cobre electrolítico principal de las aleaciones de cobre. Al ser muy conductor del calor, el cobre también se emplea para puntas de soldadores y como material para los disipadores de calor de componentes semiconductores. [3]

1.3 Manganeso

El manganeso es un metal que es sólido a temperatura ambiente, muy frágil, muy duro, de textura granosa y de un color gris blanco. Su peso específico es de 6.85 y no se ha obtenido todavía bien cristalizado. A temperatura ambiente no experimenta efecto alguno con el gas oxígeno y el aire secos, y estos gases húmedos le alteran un poco; pero se oxida pronto y principalmente con el oxígeno a una temperatura alta. [6] En la Tabla III se muestran las principales propiedades químicas y físicas del manganeso.

Tabla III. Principales propiedades químicas y físicas del manganeso [13]

Propiedad	Valor	Unidades
Masa atómica	63.536	U
Densidad	8.96	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Punto de fusión	1083.4	$^{\circ}\text{C}$
Punto de ebullición	2926.8	$^{\circ}\text{C}$
Calor específico	0.385	$\text{J}\cdot(\text{g } ^{\circ}\text{C})^{-1}$
Conductividad eléctrica	58x106	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$
Conductividad térmica	397	$\text{W}\cdot(\text{mK})^{-1}$

Es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre, se encuentra en la tierra, los sedimentos, las rocas, el agua y los productos biológicos. Al menos un centenar de minerales contienen manganeso. Entre los minerales que contienen manganeso, los óxidos, carbonatos, y silicatos son las formas más importantes. El manganeso forma diversos compuestos órgano-metálicos. La fuente comercial más importante de manganeso es el dióxido de manganeso (MnO_2), que se encuentra naturalmente en depósitos sedimentarios de pirolusita. También existen otros dos tipos de depósitos, las acumulaciones de carbonatos, que suelen estar compuestas por rodocrosita (MnCO_3), y los depósitos estratiformes. Los depósitos suelen trabajarse con técnicas a cielo abierto, en ocasiones es necesario explotarlos mediante minería subterránea, realizándose la extracción mediante la técnica de laboreo por cámaras y pilares, raras veces es necesario aplicar técnicas de explotación en profundidad. [7]

El manganeso se utiliza en la producción del acero como reactivo para reducir el oxígeno y el azufre, y como agente de aleación para la fabricación de aceros especiales, aluminio y cobre. En la industria química se utiliza como agente oxidante y para la producción de permanganato de potasio y otros productos químicos derivados del manganeso. Además, se utiliza como recubrimiento de electrodos en varillas de soldadura, en los trituradores de rocas y en las agujas y cambios de vía de los ferrocarriles. [7]

1.4 Biolixiviación

Para conocer la biolixiviación es necesario establecer en primer lugar lo que es la lixiviación. La lixiviación es la separación de sustancias solubles de otras insolubles mediante disolventes adecuados. Se emplea la lixiviación controlada en múltiples procesos químicos y metalúrgicos. Igualmente se puede producir una lixiviación “natural” de materias y sustancias expuestas, voluntaria o involuntariamente, a la acción de disolventes naturales o artificiales. [9]

La lixiviación natural, que podrá tener lugar sobre residuos almacenados, ya sea de forma transitoria o definitiva (depósito de seguridad), obliga a prever el máximo aislamiento de dichos residuos en relación con líquidos lixiviantes, y si la lixiviación se produce, ésta debe ser debidamente controlada, de acuerdo con su peligrosidad. [8]

En el sector minero metalúrgico, la biotecnología ha sido utilizada como una herramienta en la disolución y recuperación de los valores metálicos contenidos en menas. Mayormente, los procesos microbianos han sido empleados en la lixiviación de cobre y uranio, en el mejoramiento de la extracción de metales preciosos contenidos en sulfuros refractarios y en el tratamiento de aguas residuales. [9]

La lixiviación bacteriana o “biolixiviación” es un proceso natural de disolución ejecutado por un grupo de bacterias que tienen la habilidad de oxidar minerales, permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos. Es decir, en lugar de usar

productos químicos como ácidos, se recurre a organismos vivos que pueden ser hongos, bacterias o algas. Esta operación se incluye en la hidrometalurgia, y más concretamente en la biohidrometalurgia, debido a la participación activa de los microorganismos en el proceso. Cabe destacar que en el presente trabajo, se estudió la viabilidad y la factibilidad de la biolixiviación. [9]

La biolixiviación presenta algunas ventajas respecto a los procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos convencionales.

• Ventajas de la Biolixiviación:

- a) Ausencia de contaminación ambiental por SO_2 .
- b) Consumos energéticos reducidos, como consecuencia de que no es preciso secar los minerales y de que los procesos tienen lugar a temperaturas inferiores a $100\text{ }^\circ\text{C}$.
- c) Bajo consumo de reactivos, ya que estos son producidos por los microorganismos.
- d) Bajos costos de operación.
- e) Posibilidad de tratamiento de metales pobres y productos residuales, que de otra forma no podrían beneficiarse.
- f) Flexibilidad en las instalaciones, que permite hacerlas rentables incluso trabajando a escalas reducidas.

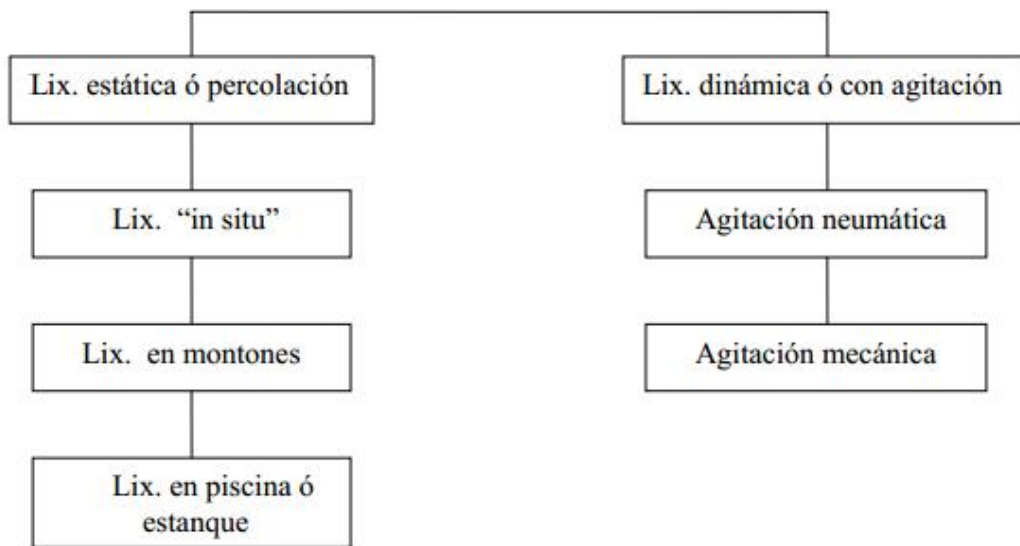
La biolixiviación también presenta una serie de desventajas que han limitado su implantación general a nivel industrial. Las más importantes son:

- a) A causa del lento crecimiento de los microorganismos implicados, las velocidades de reacción del proceso son bajas, del orden de días a semanas.
- b) La obtención de soluciones excesivamente diluidas que dificulta obtener directamente el metal a partir de ellas.
- c) La adopción de nuevos procesos extractivos que requieren correr varios riesgos, fundamentalmente económicos, que la situación actual de la metalurgia

extractiva no permite asumir y por lo tanto la adopción de tecnologías nuevas, está bastante limitada. [9]

1.4.1 Clasificación física de la biolixiviación [9]

En la Figura 3 se muestra la clasificación física de la biolixiviación



ñ

Figura 3. Clasificación física de la biolixiviación

Para determinar cuál es la metodología adecuada de biolixiviación se analizan las características de la mena, geología de la mena, ubicación geográfica, disponibilidad económica, volúmenes de reserva, entre otros factores. Esta metodología se divide en dos tipos: Lixiviación estática y Lixiviación agitada. Siendo su principal diferencia la forma en que somete el mineral al contacto con la solución lixiviante.

a) Lixiviación estática o de lecho fijo: El material a lixiviar no se mueve, es decir, no hay movimiento del sólido respecto al líquido, y el licor pasa a través del lecho del mineral el cual puede estar dispuesto de diferentes formas. En la lixiviación estática el tamaño de

partícula debe ser tal que permita el contacto entre el lixivante y el mineral. Este tipo de lixiviación se caracteriza por presentar reacciones muy lentas.

Existen diferentes tipos de lixiviación de lecho fijo. El primer tipo de lixiviación es la denominada “in situ”, mediante la cual se solubilizan las especies mineralógicas valiosas existentes en un yacimiento sin necesidad de extraer el mineral del terreno, sino por el contrario, inyectando las soluciones lixiviantes en la zona mineralizada. Las soluciones fértiles se recogen a través de pozos desde los que se envían a una planta de tratamiento de líquidos para proceder a la recuperación del metal. Esta técnica tiene costos de operaciones relativamente bajos con respecto a otros medios de lixiviación, por lo que se emplean en minas ya explotadas con mineral residual de bajo contenido o en minas que por su baja ley no justifican los gastos de explotación.

La otra forma de lixiviación de lecho fijo es llamada de montones, esta técnica implica una cuidadosa preparación del terreno de forma que resulte posible la recolección de las soluciones sin posibilidad de que éstas se pierdan en el terreno en el que se ha implantado.

En la Figura 4 se representa la lixiviación en montón; se prepara el terreno sobre el que se construirá, dejándolo liso y con una pendiente de 4 a 5 grados, se extiende una capa de arena de río, de unos 5 a 10 cm de espesor sobre la cual se sitúa una lámina de polietileno, sobre esta lámina se colocan tuberías de drenaje perforadas para recoger el licor, que conducen a un canal exterior, desde donde se envía a los depósitos de almacenamiento que, a su vez, alimentarán la planta de recuperación del metal. Sobre la lámina y las tuberías se coloca una nueva capa de arena de 20-25 cm de espesor, sobre esta capa se carga primero una capa de mineral de 50-100 cm y luego se procede a la carga del resto del mineral triturado. El montón de mineral tiene una forma tronco-piramidal con alturas que varían en función de las características del mismo.

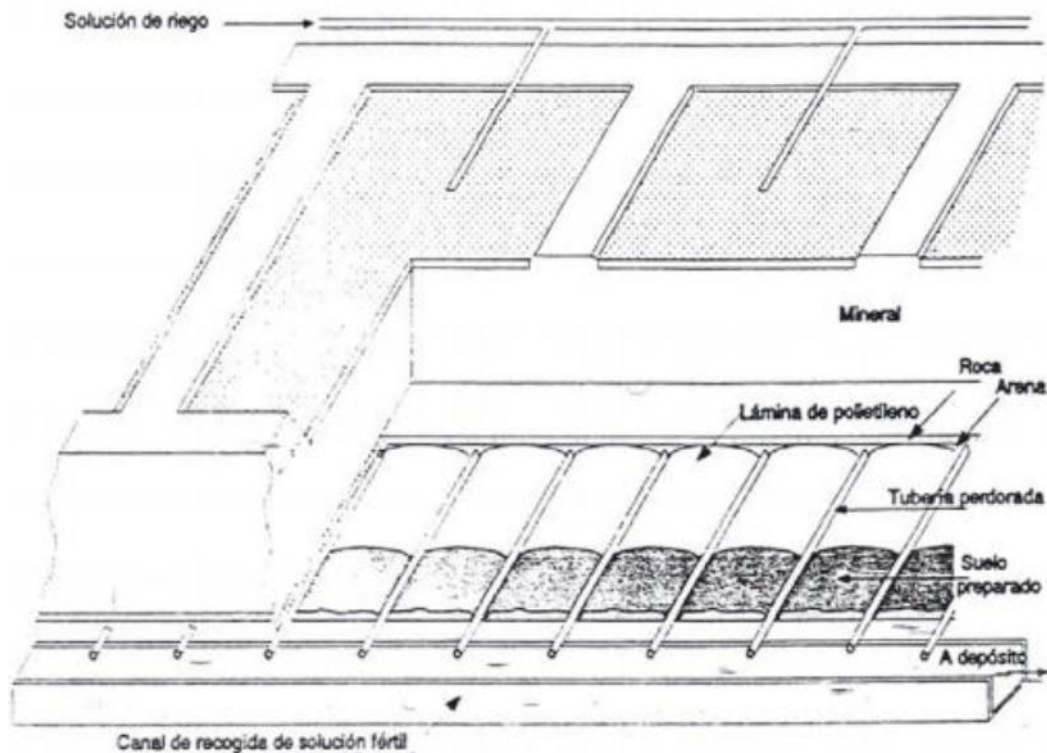


Figura 4. Lixiviación en “montones”

Una vez construido el montón se comienza la lixiviación. Las soluciones lixiviantes, llegan a la parte superior y se distribuyen utilizando diversos sistemas, como tuberías perforadas, aspersores, etc. Los montones se dividen en secciones para el mejor control y operación. Las soluciones fértiles recogidas en los canales exteriores son conducidas a depósitos en los que se almacenan previamente a su envío a las plantas de concentración.

b) Lixiviación Agitada: En este tipo de lixiviación, el mineral es reducido de tamaño a una granulometría muy fina (menor de $100\text{-}150\mu\text{m}$), para facilitar la transferencia de materia, el cual se encuentra en una pulpa formada con el agente lixivante. Además de la función principal de la agitación, que es mantener en suspensión el sólido en el seno del líquido para conseguir lixiviarlo, otra función es conseguir una fuerte turbulencia de la pulpa para que así, por la inercia del sólido a seguir el movimiento del líquido se

establezca una velocidad relativa entre ambos, lo que favorece la difusión de los reactivos a través de la capa de tránsito aumentando de velocidad de disolución.

Este tipo de proceso presenta una cinética muy rápida gracias a la gran área superficial del mineral y la agitación del medio, que agiliza notablemente el transporte de productos y reactivos desde la interfase al seno del líquido. En este tipo de lixiviación la pulpa se coloca en un recipiente el cual posee algún dispositivo que permita la agitación de la pulpa. Esta agitación puede ser mecánica o neumática. Además este proceso presenta la ventaja de poder efectuarse en recipiente cerrados lo que permite un buen control ambiental, y a su vez, en estos contenedores cerrados la lixiviación puede darse a presión atmosférica o a presiones artificiales las cuales se modifican para que el proceso sea termodinámicamente estable. En estos recipientes, se puede controlar la temperatura. En estos procedimientos el capital requerido es generalmente elevado, además el proceso necesita de posteriores procedimiento de separación sólido-líquido. Esta técnica se emplea para tratar minerales de alto contenido.

1.4.2 Factores que influyen en la disolución de los metales [9]

Entre los factores que influyen en la biolixiviación se encuentran aquellos que afectan directamente al crecimiento de los microorganismos y aquellos otros que afectan a la cinética de solubilización de los minerales. En ambos casos, el principal problema a resolver es como mantener las condiciones ambientales para el adecuado crecimiento celular en sistema lixivante. Entre las variables a controlar se encuentran:

- a) **Temperatura:** La temperatura óptima para la oxidación de minerales sulfurados por acción de las bacterias mesófilas se encuentra entre un intervalo de 28 y 35 °C. En esta variable se recogen dos factores importantes a tener en cuenta: el aumento en la velocidad de reacción por incremento de la temperatura (activación) y el incremento de la velocidad de muerte térmica de las células (inactivación) producto de la desnaturalización proteica, que provoca la pérdida

de la activación biológica, pudiendo ser ésta más importante que la activación del proceso de biolixiviación de los sulfuros.

- b) Acidez del medio: La oxidación de las formas reducidas del azufre depende los movimientos de protones y electrones, por lo que el pH influye directamente sobre la actividad bacteriana.
- c) Concentración de nutrientes: El nitrógeno es el nutriente más importante seguido del potasio y el calcio, que son elementos minoritarios vitales para el crecimiento, aunque se requieren de cantidades pequeñas.
- d) Disponibilidad de CO₂ y O₂: La disponibilidad del CO₂ es muy importante ya que constituye la única fuente de carbono para las bacterias autótrofas. La energía necesaria para asimilarlo depende de la oxidación de los sustratos. En medio ácido, la solubilidad del O₂ y el CO₂ es baja, por lo que es necesaria una velocidad de transferencia de materia máxima para que este aspecto no sea controlante del proceso.

1.4.2.1 Influencia de otros factores.

Como se mencionó anteriormente la composición del medio de cultivo, el pH, la presencia o no de determinados elementos, son algunos de los parámetros que pueden variar la cantidad de los metales en la biolixiviación.

La producción de un tipo de ácido orgánico está genéticamente determinada e interrelacionada con los factores del medio.

- a) Efecto de la fuente de carbono: Con azúcar como fuente de carbono, con concentraciones entre un 8 y un 10 % en el medio de fermentación se garantizan cantidades considerables de ácidos.
- b) Efecto de la temperatura: La temperatura es un factor físico determinante en las reacciones químicas y biológicas.
- c) Efecto del pH: El pH inicial de los medios de cultivo es decisivo en la concentración y en el tipo de ácido a ser sintetizado por los microorganismos, y

por tanto influye en la eficiencia de la biolixiviación. Esto depende de la cepa y del mineral a tratar.

- d) Tolerancia de los microorganismos a los iones metálicos: Los metales pesados son tóxicos para la célula a concentraciones elevadas y requeridos en muy bajas cantidades. Es por ello que para los trabajos de lixiviación es necesario la selección de cepas resistentes a metales, ya que en la medida que el proceso se desarrolla la concentración de estos en los licores se incrementa.
- e) Densidad de pulpa: La eficiencia de la lixiviación microbiana también se ve afectada por la mayor o menor concentración del mineral incorporado al sistema, lo que se conoce como densidad de pulpa. Un incremento de ésta, provoca disminución en el recobrado del metal. Esto se debe a que el incremento de la densidad de pulpa genera una mayor cantidad de productos solubles disueltos, lo que puede inhibir la actividad microbiana y así influir negativamente en la disolución de los metales.

1.4.3 Microorganismos [9]

Una característica que define a la mayoría de los microorganismos que intervienen en las transformaciones de metales es su alta resistencia para evolucionar en ambientes extremos con condiciones de vida muy agresivas. Estos ambientes pueden diferenciarse en función de su temperatura, nutrientes o pH.

El área más importante es, quizás, dentro del proceso biotecnológico de metales, la oxidación de sulfuros metálicos por medio de microorganismos. Estos viven asociados normalmente a ambientes acuosos característicos de las explotaciones mineras, con un bajo pH, altas concentraciones de metales pesados y, en algunos casos, elevadas temperaturas, y se reproducen con gran facilidad. La fuente de energía para la actividad vital de estos cuerpos vivos la suelen obtener de la oxidación de las distintas formas reducidas del azufre y de diferentes metales.

Dentro de los microorganismos heterótrofos, los hongos filamentosos son los que han demostrado una mayor efectividad en la extracción de metales presentes en minerales oxidados. Se destacan dentro de ellos las especies *Aspergillus niger* y *Penicillium simplicissimum*, debido a su habilidad de excretar grandes cantidades de ácidos orgánicos, entre estos, el más efectivo ha sido el ácido cítrico.

1.4.4 Biolixiviación de minerales sulfurados [9]

Los metales se pueden extraer de los minerales a través de procesos biológicos o de procesos puramente químicos de transferencia electrónica. La oxidación bacteriana transcurre a través de un mecanismo electroquímico en donde el microorganismo actúa como un catalizador que transporta los electrones del donante (mineral) al receptor (oxígeno). Desde otro punto de vista, el ataque y solubilización de un determinado mineral por bacterias puede ocurrir por un contacto directo o indirecto.

a) Mecanismo indirecto. En este mecanismo el microorganismo actúa a través de las sustancias producidas en su propio metabolismo. Los productos de esta reacción pueden volver a ser oxidados y reutilizados. Es decir, la acción bacteriana regenera el medio de ataque y reduce el consumo de reactivos. Este tipo de mecanismo es uno de los más importantes en las aplicaciones industriales actuales de la biolixiviación. El papel que juega la bacteria es de formación y regeneración continua de los reactivos capaces de atacar el sustrato mineral.

b) Mecanismo directo. En este mecanismo se requiere de un contacto directo entre el microorganismo y el sustrato, en presencia de oxígeno. La bacteria oxida directamente, a través de acción enzimática, el azufre y el hierro ferroso de los minerales a ácido sulfúrico y férrico, respectivamente. La primera etapa del ataque directo en la oxidación del mineral sulfurado es la solubilización del sustrato sólido, previa a la oxidación metabólica, siendo efectiva mediante una disociación del mineral sulfurado. Una vez liberado el anión sulfuro, se une inmediatamente al sistema enzimático de la bacteria y así es oxidado a sulfato.

1.4.5 Biolixiviación de minerales oxidados [9]

Los minerales oxidados como silicatos, carbonatos y fosfatos son lixiviados principalmente por microorganismos heterótrofos, los cuales excretan ácidos orgánicos que operan mediante dos mecanismos que pueden ocurrir simultáneamente o no. Como resultado se obtiene un metal oxidado que ha sido disuelto de una fase sólida a una fase líquida donde los iones H^+ desplazan los cationes metálicos de la matriz del mineral y con ello se induce la disolución de los metales. Posteriormente los ácidos orgánicos secuestran los metales a través de un mecanismo de quelación, formándose complejos solubles. Este mecanismo es aplicable tanto a minerales silicatos como no silicatos. La formación de estos complejos evita que los metales precipiten en forma de hidróxidos, proceso que beneficia la lixiviación ya que es posible disminuir el nivel de toxicidad al acomplejarse el ión metálico con el anión del ácido orgánico.

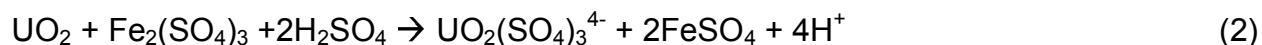
1.4.6 Biolixiviación de menas de cobre [10]

El tratamiento de minerales marginales de cobre, con contenidos bajos de metal, es una práctica muy común. La ley de estos minerales es demasiado baja para tratarlos pirometalúrgicamente, sin embargo es suficientemente alta para no tratarlos. La importancia de la contribución bacteriana a la solubilización del cobre es muy difícil de evaluar, pero podemos decir que las bacterias actúan tanto directamente sobre los sulfuros (mayormente pirita y calcopirita), como directamente en la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} que a su vez actúa como un efectivo oxidante de los distintos minerales sulfurados. Paralelamente a esta acción, la acidez de la solución resultante se regenera por reacciones de oxidación del azufre sulfurado a ácido sulfúrico.

1.4.7 Biolixiviación de menas de uranio [10]

En un gran número de plantas en las que se obtiene uranio, el metal se extrae del mineral solubilizándolo con ácido sulfúrico. Sin embargo de esta manera solo es posible

pasar el uranio hexavalente y no el tetravalente, el cual también aparece en los minerales en cantidades importantes. Este uranio puede ser oxidado por el sulfato férrico según la siguiente reacción:



Está claro que la acción bacteriana es un método simple y barato de catalizar el paso ferroso a férrico y suministrar así el oxidante necesario para el proceso. El consumo de sulfato férrico es un factor importante en relación con el coste de extracción del uranio que puede reducirse generando este Fe^{3+} mediante biolixiviación de una materia prima barata como la pirita.

Este proceso tiene la ventaja de obtener soluciones más concentradas de Fe^{3+} gracias a la formación adicional de ácido sulfúrico como otro producto de la actividad bacteriana, ya que este evita la precipitación del oxidante, tal como ocurre cuando se genera químicamente, y permite menores consumos de ácido.

1.5 Hongo *Aspergillus Níger*

Los grupos de *Aspergillus* tiene características como: cabezas conoidales de tonos negros grisáceos, negro café, púrpura o negro carbón; son globosas, radiadas o divididas formando columnas de cadenas de unas irregulares y otras bien definidas. [15]

La característica macroscópica primordial de los grupos de *Aspergillus* es el color, que tienen diferentes tonos de verde, pardo, amarillo, blanco, gris y negro, suelen parecer diminutos alfileres. Microscópicamente las cabezas conoidales presentan cuatro formas básicas; globosas, radiadas, columnares o claviformes. [15]

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

etimología es *Aspergillus*-formado por esporas y *níger*-negro brillante; por tanto se define como hongo formado por esporas negras. [14]

Este hongo se caracteriza por ser un fitopatógeno, ya que su alimentación es en base a azúcares y carbohidratos pero en general se encuentra en el medio ambiente sobre todo en lugares húmedos, sin embargo puede crecer en otras condiciones. [14]

En cuanto a las condiciones óptimas de su desarrollo, el intervalo de temperatura para su crecimiento va desde 0-5°C hasta 35-40°C, la temperatura óptima es entre 25-30°C y el pH óptimo de crecimiento de este hongo es de 4.5-5.5 pero soporta pH ácidos de 3.5 y alcalinos de 6.8. En cuanto a condiciones de iluminación este microorganismo no es exigente.

Se ha encontrado en diversos tipos de hábitat: 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. Se encuentra también en una gran variedad de sustratos que incluye granos, forraje, frutos, vegetales, semillas y en la rizósfera (parte del suelo inmediata a las raíces), y de una gran variedad de plantas tales como banano, trigo, arroz, algodón, café, caña de azúcar, cebada, avena, maíz y guisantes, entre otros.[14]

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. También de este hongo se producen algunos antibióticos y preparaciones enzimáticas. [14] En la Figura 5 se muestran micrografías del Hongo *Aspergillus níger*.

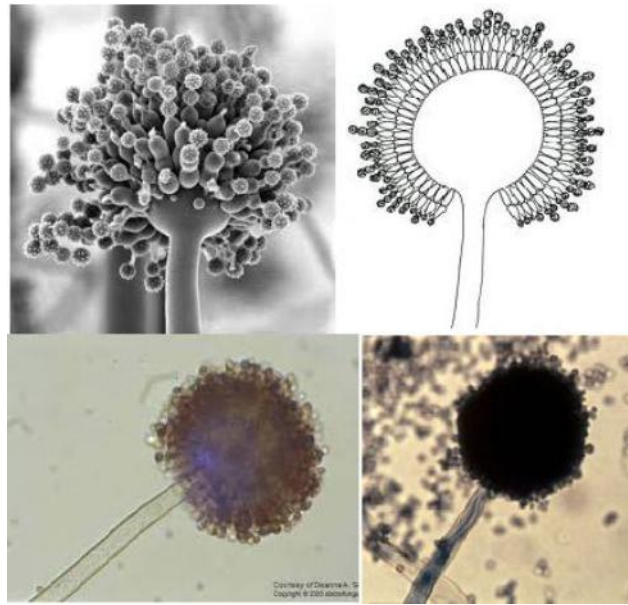


Figura 5. Micrografías de Hongo *Aspergillus niger*

1.5.1 Ciclo del crecimiento microbiano [24]

El ciclo del crecimiento microbiano puede dividirse en varias fases: de latencia, exponencial, estacionaria y de muerte.

- a) Fase de latencia: Cuando una población microbiana se inocula en medio fresco, no ocurre crecimiento inmediatamente, sino después de cierto tiempo que se llama fase de latencia, que puede ser más larga o más corta dependiendo de muchos factores. Esto también ocurre si el inóculo se toma a partir de un cultivo viejo, entonces tiene lugar una fase de adaptación, incluso si todas las células presentes en el inóculo son capaces de reproducirse. Esto ocurre porque las células, en estas condiciones, carecen de determinados componentes esenciales y tiene que transcurrir un cierto tiempo para que se proceda a su síntesis. Esta fase está caracterizada por un inapropiado espectro enzimático, un metabolismo deprimido, síntesis de metabolitos intermediarios fácilmente difusibles, síntesis de enzimas extracelulares (principalmente hidrolíticas), etc.

- b) Fase o crecimiento exponencial: En esta fase el número de células se dobla cada cierto período de tiempo.
- c) Fase estacionaria: En la fase estacionaria no hay incremento neto del número de células. Sin embargo, aunque en esta fase no tiene lugar el crecimiento, todavía ocurren muchas funciones celulares, incluyendo el metabolismo energético y algunos procesos biosintéticos. Esta fase esta caracterizada por marcados cambios en la composición celular y cese del crecimiento.
- d)) Fase de muerte: Si la incubación continua después que la población alcance la fase estacionaria, las células deben permanecer vivas y metabólicamente activas, pero también deben morir. Si esto último ocurre se dice que las células entran en fase de muerte o declinación.

1.6 Reciclaje

El reciclaje es un proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado (basura), a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto. También se podría definir como la obtención de materias primas a partir de desechos, introduciéndolos de nuevo en el ciclo de vida y se produce ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales, macro económico y para eliminar de forma eficaz los desechos de los humanos que no necesitamos. Reciclar significa usar un material o elemento en forma similar a su uso original o usar su materia prima para fabricar otro mediante una operación compleja que permite su recuperación. [11]

El reciclaje es un acto de suma importancia para la sociedad ya que supone la reutilización de elementos y objetos de distinto tipo, que de otro modo serían desechados, contribuyendo a formar más cantidad de basura y dañando de manera continua al planeta, además de generar una gran cantidad de recursos financieros, ambientales y sociales. El reciclaje transforma materiales usados, que de otro modo serian simplemente desechos, en recursos muy valiosos. [12]

El reciclaje está directamente ligado con la ecología y con el concepto de sustentabilidad que supone que el ser humano debe poder aprovechar los recursos que el planeta y la naturaleza le brindan pero sin abusar de ellos y sin generar daños al ambiente. [12]

El reciclaje es un tema muy importante en la noción compleja de conservación ambiental ya que es a partir de él que se puede contribuir a limitar la contaminación y, además, reutilizar los diferentes recursos de manera continua. Cuando hablamos de reciclar o de reciclaje hacemos referencia entonces a un acto mediante el cual un objeto que ya ha sido usado es llevado por un proceso de renovación en lugar de ser desechado. Casi todos los elementos que nos rodean pueden ser reciclados o reutilizados en diferentes situaciones, aunque algunos de ellos, por ser tóxicos no pueden ser guardados. [12]

Tanto el vidrio, como el papel y los cartones, los textiles, los residuos orgánicos, el plástico y otros elementos son todos elementos de reciclaje. Obviamente, los procesos de reciclaje y de reutilización variarán en términos de complejidad en cada caso, pudiendo incluso algunos materiales ser reciclados sólo un par de veces. De todos modos, la importancia del reciclaje reside en el hecho de que mientras más elementos sean reciclados, menos material será desechado y por lo tanto el medio ambiente sufrirá menos el crecimiento permanente y desorganizado de la basura humana. [11]

Proceso de reciclaje. [11]

El reciclaje crea un ciclo que incluye la recopilación de materiales reciclables. Clasificar y procesar estos materiales para convertirlos en materias primas, fabricar nuevos productos y la utilización de los mismos.

1. Recolección y proceso.

Recoger desechos reciclables varía de una comunidad a otra, pero podemos encontrar cuatro procesos principales: En la acera, en centros específicos de recolección, centros donde se recompensa de alguna manera por reciclar y otros programas de depósito y/ recolección de productos desechables

Independientemente del método utilizado en el proceso de reciclaje, la próxima etapa del proceso es la misma. Todo el material reciclable es llevado al depósito de reciclaje de turno, para su posterior clasificación y transformación de materiales y nuevos bienes de consumo. Los productos finales ya reciclados, son comercializados como cualquier producto nuevo.

2. La Fabricación.

Una vez limpios y separados, los productos reciclados son sometidos a un segundo paso de reciclaje, donde son transformados mediante un proceso físico, mecánico, químico y/o energético. Hoy en día, es muy frecuente encontrar productos reciclados parcialmente o en su totalidad. Los materiales reciclados también se utilizan para aplicaciones innovadoras para mobiliario urbano.

3. La Comercialización de Productos Reciclados. La comercialización de productos reciclados completa el ciclo del reciclaje. Al adquirir productos reciclados, gobiernos, empresas, consumidores individuales, son clave. Cada uno de ellos juega e interpreta un papel primordial muy importante para el éxito de este proceso. Como hoy en día el consumidor exige productos que sean respetuosos con el medio ambiente, los fabricantes de productos se esfuerzan por seguir ofreciendo productos de gran calidad pero, reciclados, para satisfacer la gran demanda en el Mercado.

Beneficios del reciclaje. [11]

- El reciclaje protege y amplía empleos de fabricación.
- Reduce la necesidad de vertederos y del proceso de incineración.

- Evita la contaminación causada por la fabricación de productos de materiales vírgenes.
- Ahorra energía.
- Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y global.
- Ahorra en recursos naturales.
- Ayuda a mantener y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras.

1.7 Baterías de celular

Una batería es un dispositivo diseñado para almacenar energía eléctrica que emplea como electrolito, una sal de litio, cadmio o níquel que provee los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. [16]

En general el funcionamiento de una batería, se basa en una celda electroquímica. Las celdas electroquímicas tienen dos electrodos: El ánodo y el cátodo. El ánodo se define como el electrodo en el que se lleva a cabo la oxidación y el cátodo donde se efectúa la reducción. Los electrodos pueden ser de cualquier material que sea un conductor eléctrico, como metales, semiconductores. [17]

Para completar el circuito eléctrico, las disoluciones se conectan mediante un conductor por el que pasan los cationes y aniones, conocido como puente de sal (o como puente salino). Los cationes disueltos se mueven hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo para que las disoluciones se neutralicen. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo debido a una diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrolitos. [17]

Las principales partes de una batería son: [18]

- Rejillas: Armazón que sirve de soporte para materiales activos; conducen la corriente. Están hechas de una aleación que suministra características específicas a la rejilla. Desempeñan también la misión de distribuir la corriente uniformemente en toda la placa.

- Placas: Compuestas por las rejillas, impregnadas de una pasta o material activo.
- Placas positivas: Compuestas de un reactivo constituido por partículas muy pequeñas y de alta porosidad para que el electrolito penetre libremente en el interior de las placas.
- Placas negativas: Estas placas se emplean en pequeñas cantidades, sustancias difusoras o expansoras para impedir la contracción y solidificación del reactivo, con lo que se perdería capacidad y vida la batería.
- Separadores: El objetivo primordial de los separadores es impedir el contacto metálico entre las placas de polaridad opuesta. Al mismo tiempo, permiten la conducción electrolítica libre. Pueden ser colocados de tres maneras: en forma de placa, en forma de sobre y en forma de sobres envolventes.
- Electrolito: Su función es servir como medio conductor de energía, entre los componentes internos de la batería.
- Caja de la batería: Recipiente que contiene el electrolito y elementos conductores de la corriente. La caja y la cubierta están fabricadas en polipropileno.
- Tapon respiradero: Las baterías poseen un respiradero en los tapones o en la cubierta que liberan gases, y el vapor del ácido sulfúrico se condensa a los lados de los orificios llenando de nuevo a la batería.
- Accesorios complementarios: Conectores, conjuntos de placas positivas y negativas, caja, cubierta y tapones de seguridad.

1.7.1 Baterías de Litio (“Li-Ion”) [1]

Todos los teléfonos celulares del mercado están equipados con baterías de Li-ion “litio ion” o más correctamente, “iones de litio”. Este tipo de baterías también las encontramos en productos de alta gama: ordenadores portátiles, teléfonos inalámbricos, videocámaras, etc.

Existen dos grandes tipos de baterías de litio; ambos tipos poseen altos niveles de energía:

- Las baterías de ion litio recargables.
 - Algunas veces llamadas “baterías secundarias de litio”
 - Estas baterías se encuentran a menudo en aparatos electrónicos comunes tales como teléfonos celulares y computadoras portátiles.

- Las baterías de metal de litio no recargables.
 - Algunas veces llamadas “baterías primarias de litio”

La utilización de litio metálico (99.9% pureza) como ánodos en baterías primarias, ha tenido un rápido crecimiento en los últimos años, aunque el consumo es relativamente bajo por las pequeñas cantidades requeridas.

Las pilas de litio presentan varias ventajas con respecto a otras pilas:

- Mayor densidad de energía por peso y volumen.
- Mayor vida útil, entregando un voltaje constante.
- Menor peso.
- Funcionamiento a alta capacidad y bajas temperaturas.
- Mayor tiempo de almacenamiento.

Las baterías de litio no recargables se han usado ampliamente en relojes, microcomputadores, cámaras, juegos y aparatos electrónicos. Otra gran aplicación es en la industria militar, puesto que el uso de baterías de oxihaluro de litio, se usan en misiles de defensa aéreas.

Este tipo de baterías presenta varias ventajas, entre otras, su durabilidad, gran capacidad de potencia disponible y seguridad de almacenamiento. Otra área probada es en la industria automotriz de potencia eléctrica. En este caso una de las ventajas de

la utilización de baterías de litio es la no contaminación, ahorro de combustible, durabilidad, etc.

1.7.2 Disposición de baterías de celular [19]

En los últimos años, se ha demostrado el impacto negativo que tienen las pilas en el medio ambiente y los daños que pueden causar a la salud. Comúnmente son desechadas con el resto de los residuos sólidos urbanos, en otras ocasiones son arrojadas a la intemperie provocando graves problemas ambientales, ya que luego de ser desechadas sufren un proceso de corrosión, y sus componentes altamente tóxicos se fermentan y contaminan suelos y aguas.

Las pilas pueden alcanzar una temperatura de hasta 70°C, que ocasionan derrames en sus componentes internos. Una de las principales amenazas son los derrames de metales pesados, que fluyen por el suelo y los cuerpos de agua, contaminándolos y volviéndolos tóxicos para casi cualquier forma de vida.

Se estima que en México hay registrados 65 millones de aparatos celulares, de ellos, 31% se concentran en la Zona Metropolitana del Valle de México y su vida útil es de 16 meses, por lo que cada mes se desechan 1 millón 250 mil celulares, con un peso total de 315 toneladas. Estos desechos tienen un gran impacto en el medio ambiente debido a que no se tiene una correcta disposición de ellos. El gobierno del Distrito Federal ha implementado una campaña para el desecho de pilas primarias y secundarias; este programa consiste en:

1. Las pilas y celulares usados se depositan dentro de unas columnas informativas.
2. Cada 72 horas se hace la recolección de las pilas.
3. Se levanta una bitácora de las pilas y celulares recuperados.
4. Las pilas y celulares se almacenan en un centro de acopio temporal.
5. Se separan los celulares de las pilas.
6. Los celulares se mandan a las oficinas de Recall Internacional.

7. Los teléfonos celulares se clasifican en: “viables y no viables.”
 - Viables: Son enviados a Miami Florida para su venta a mercados secundarios (con tecnología más antigua).
 - No Viables: Se envían a Bélgica en donde inicia el proceso de fundición y recuperación de metales.
8. Cuando se reúne más de una tonelada de pilas, son transportadas a la Planta de Reciclaje en Irapuato, Guanajuato.
9. En la Planta de Reciclaje las pilas se clasifican por su tipo.
 - Se recupera la carcasa de las pilas (con la que se fabrican llaves y auto partes).
 - Se recupera el litio, cadmio, níquel y el carbón-zinc.
 - Lo que no se recupera se utiliza como estabilizador de residuos peligrosos.

En la Figura 6 se muestra el proceso del reciclaje de celulares en el D.F. previamente descrito.

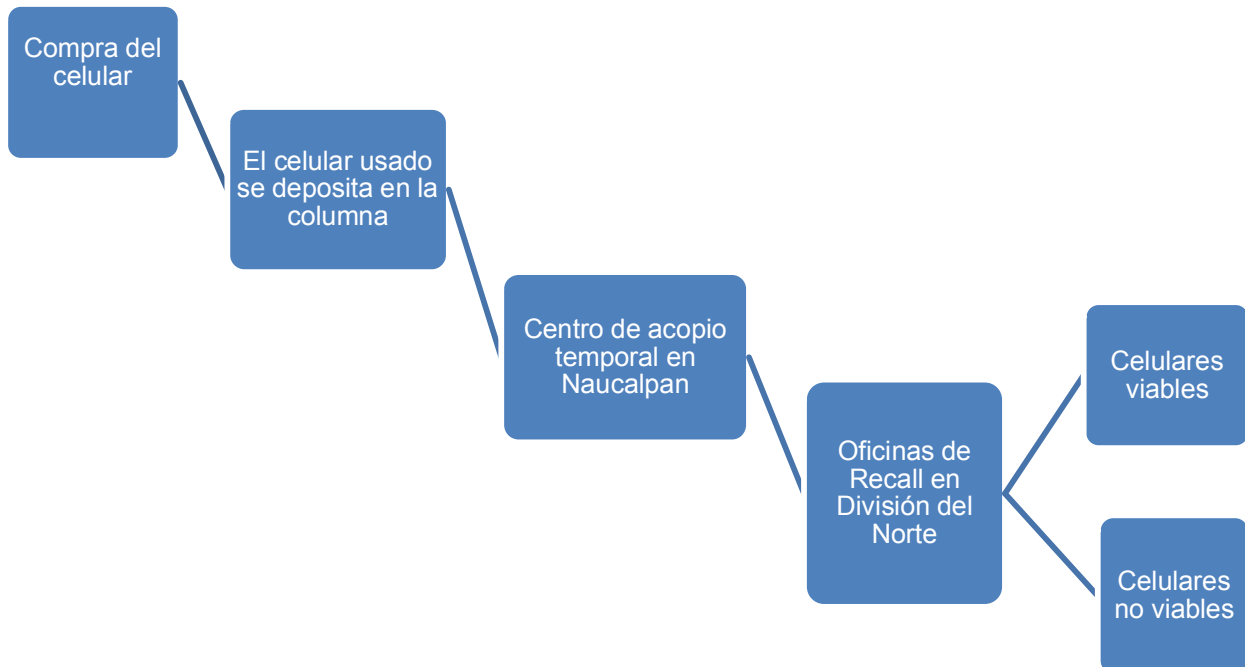


Figura 6. Reciclaje de celulares

1.7.3 Proceso de reciclaje de valores metálicos actuales de baterías

Desgraciadamente en países como México los esfuerzos por reducir la contaminación producida por pilas son insuficientes. Hasta hace algún tiempo en nuestro país, la única opción legal era una planta de confinamiento y a la fecha después de un arduo trabajo para lograr acreditar ante SEMARNAT el proceso de reciclado de pilas, existe ya la primera planta de revalorización; con la cual se dará un importante paso para el manejo de estas. [20]

En la Figura 7 se muestra el diagrama del proceso de reciclaje de todas las pilas en México. Donde se manejan dos fases del tratamiento: tratamiento mecánico y tratamiento hidrometalúrgico. En el tratamiento mecánico hay dos etapas: la clasificación, que por medio de un tamiz se realiza la separación obteniendo 4 productos: tierras finas, pilas de botón, otros objetos y pilas. Las pilas van a la fase de trituración empezando por un enfriador para después ir a un separador magnético donde el material magnético pasa a un lavador (que posteriormente va a la lixiviación) y queda la chatarra. El material no magnético pasa por un primer molino para después ser triturado y pasar por tamiz, donde los finos se van a un segundo molino (que es el material que después es lixiviado), el material que no pasa el tamiz va a un lavador para después pasar a un separador que divide los metales no ferrosos del plástico y papel.

Después del tratamiento mecánico entra en acción el tratamiento hidrometalúrgico, se empieza con la primera línea de lixiviación (con una capacidad de 50,000 L) del material que proviene del segundo molino, el material que no pasa a la precipitación va una segunda línea de lixiviación (con la misma capacidad de la primera línea), pasando por 2 filtros de vacío se obtienen el grafito y el manganeso. El lodo de la primera línea de lixiviación pasa a la fase de precipitación donde por medio de un filtro de prensa se obtienen los metales. El lodo del filtro de prensa pasa a la fase de extracción (con capacidad de 19,000 L) que por medio de un ácido extractor (H_2SO_4) se obtiene el sulfato de zinc, de esta fase se alimenta de nuevo la primera línea de lixiviación donde también se recogen los productos del lavador del separador magnético (tratamiento

mecánico), y se pasa a la fase de evaporación donde un calentador usa 1000 L de diesel como combustible para calentar el sacador (20,000 L de capacidad), finalmente se pasa a un filtro de mangas donde se obtienen las sales de manganeso.

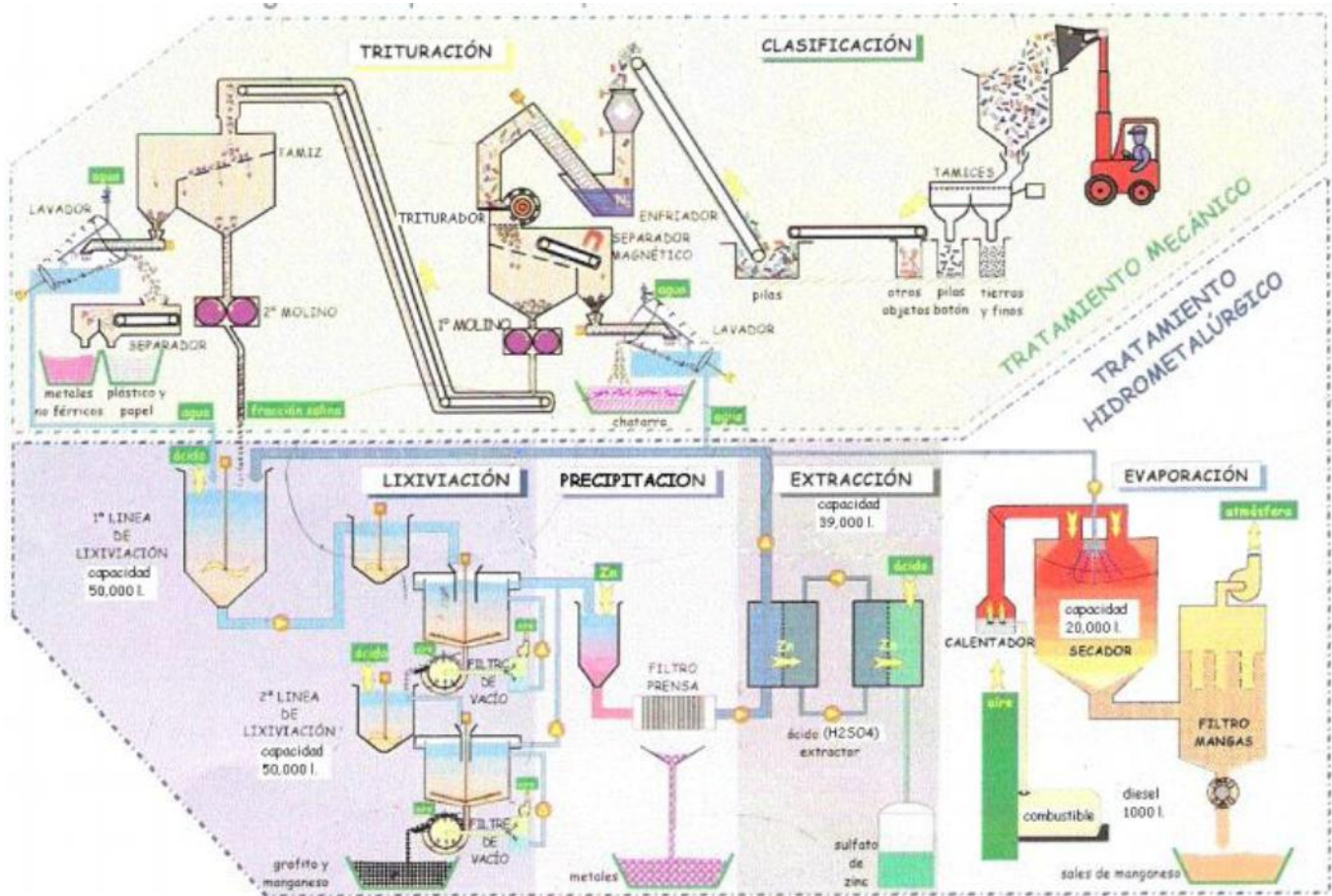


Figura 7. Diagrama simplificado del proceso de tratamiento de pilas de todo tipo. [21]

1.8 Ácidos [21]

Según Arrhenius un ácido es un compuesto que contiene hidrogeno y se disocia en agua produciendo iones hidrógeno positivos. La disociación general de un ácido HX es:



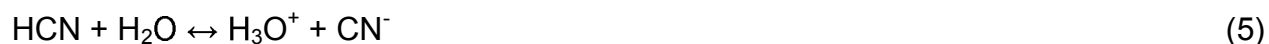
En realidad, el ion hidrógeno (protón) está solvatado, y la reacción completa es:



El ion H_3O^+ es el ion hidronio.

Estas sustancias tienden a ser corrosivas, su sabor es fuerte y producen cambios de color en presencia de indicadores. Se denominan ácidos protónicos y se pueden clasificar en ácidos fuertes (se disocian casi por completo en agua) y ácidos débiles (en agua se disocian parcialmente). La fuerza de un ácido depende de su capacidad para disociarse y se mide como su constante de disociación ácida.

En la teoría de Bronsted-Lowry, la definición de ácido se extendió a cualquier sustancia capaz de ceder protones, y la de base a una sustancia que acepta protones, las dos especies relacionadas por la pérdida o ganancia de protón se denomina par conjugado, por ejemplo, en la reacción:



El HCN es un ácido que cede un protón al agua. El agua actúa como base al aceptar el protón. De manera similar, en la reacción inversa, el catión H_3O^+ actúa como ácido y el anión CN^- como base. EL HCN es el ácido conjugado de la base CN^- , y el ión CN^- es la base conjugada del ácido HCN. De manera similar, H_3O^+ es el ácido conjugado de la base H_2O . Un ácido fuerte tiene una base débil y viceversa. El agua puede actuar como ácido y como base.

La Teoría de Lewis supone una extensión del concepto de ácidos y bases. Según esta teoría, un ácido de Lewis es un compuesto o átomo que puede aceptar un par de electrones y uno base de Lewis es una especie que puede ceder un par de electrones. Esta definición incluye las reacciones ácido-base "tradicionales". En



La reacción es fundamentalmente



Es decir, consiste en la cesión de un par de electrones por parte de un OH^- . Pero también se incluyen reacciones que no involucran iones, por ejemplo:



En la que NH_3 es una base (dador de electrones) y BCl_3 es el ácido (receptor de electrones). Esta teoría relaciona las reacciones ácido-base y las de oxidación-reducción.

1.8.1 Ácidos inorgánicos [22]

Un ácido inorgánico es un compuesto de hidrógeno y uno o más elementos (a excepción del carbono) que, cuando se disuelve en agua u otro disolvente, se rompe o se disocia, produciendo iones hidrógeno. La solución resultante tiene ciertas características, como la capacidad de neutralizar bases, tornar de color rojo el papel tornasol y producir determinados cambios de color cuando se combina con otros indicadores. A los ácidos inorgánicos se les denomina a menudo ácidos minerales.

Un anhídrido inorgánico es un óxido de metaloide que puede combinarse con agua para formar un ácido inorgánico. Puede producirse por síntesis, o mediante eliminación de agua del correspondiente ácido.

Los ácidos inorgánicos se utilizan como sustancias químicas intermedias y catalizadores en reacciones químicas. Se encuentran en distintas industrias, como metalistería, madera, textiles, colorantes petróleo y fotografía. En el trabajo de los

metales se utilizan a menudo como agentes limpiadores antes de soldar, chapear o pintar.

El ácido nítrico es un ácido inorgánico importante, que es importante mencionar, es altamente corrosivo y ataca a una gran cantidad de metales. Las reacciones entre este ácido y diversas sustancias orgánicas son a menudo muy exotérmicas y explosivas, y las reacciones con metales pueden producir gases tóxicos. El ácido nítrico se utiliza en la fabricación de nitrato amónico para fertilizantes y explosivos. Asimismo se utiliza en síntesis orgánicas, metalurgia, flotación de minerales, y para el reprocesado de combustible nuclear agotado.

1.8.2 Ácidos orgánicos

Los ácidos orgánicos encierran dos, tres o cuatro cuerpos simples que son siempre el oxígeno, el carbono, el hidrógeno y el nitrógeno. Además la combinación de estos elementos está sujeta a leyes especiales, como en todas las sustancias orgánicas, de tal manera que la estructura de los compuestos que resultan es en gran manera diferente de la de los compuestos análogos de naturaleza inorgánica.

La mayor parte de los ácidos orgánicos está constituida de agua, ya que no se puede separar con los procedimientos ordinarios de desecación. Para obtenerlos en el estado seco, es necesario saturarlos por el óxido de plomo o el óxido de plata, con los cuales forman en general sales anhidras. [23]

La diferente estructura química de los ácidos orgánicos hace que sus efectos tóxicos sean muy variables. Algunos pueden causar daños graves en los tejidos, similares a los producidos por los ácidos inorgánicos fuertes. [22]

Una clasificación importante de los ácidos orgánicos los dividen en: 1) Ácidos monocarboxílicos saturados e insaturado; 2) Ácidos alifáticos dicarboxílicos; 3) Ácidos

acéticos halogenados; 4) Ácidos alifáticos monocarboxílicos; y 5) Ácidos carboxílicos aromáticos. [22]

Los ácidos monocarboxílicos *saturados de cadena larga* son los *ácidos grasos* y en su mayoría se obtienen de fuentes naturales. También se fabrican ácidos grasos sintéticos mediante oxidación al aire de parafinas (hidrocarburos alifáticos) utilizando un metal como catalizador, o mediante oxidación de alcoholes con sosa cáustica. [22]

Los ácidos orgánicos y sus derivados constituyen un amplio grupo de sustancias químicas. Se utilizan en la fabricación de casi todos los productos químicos, en las industrias de plásticos, curtidos, textiles, papel, metales, productos farmacéuticos, alimentos, bebidas y cosméticos. También se encuentran en perfumes, herbicidas, colorantes, lubricantes y productos de limpieza. [22]

CAPITULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología experimental, el equipo y material utilizados para los procesos de lixiviación y biolixiviación de baterías de celular.

En la Figura 8 se muestra el proceso experimental.

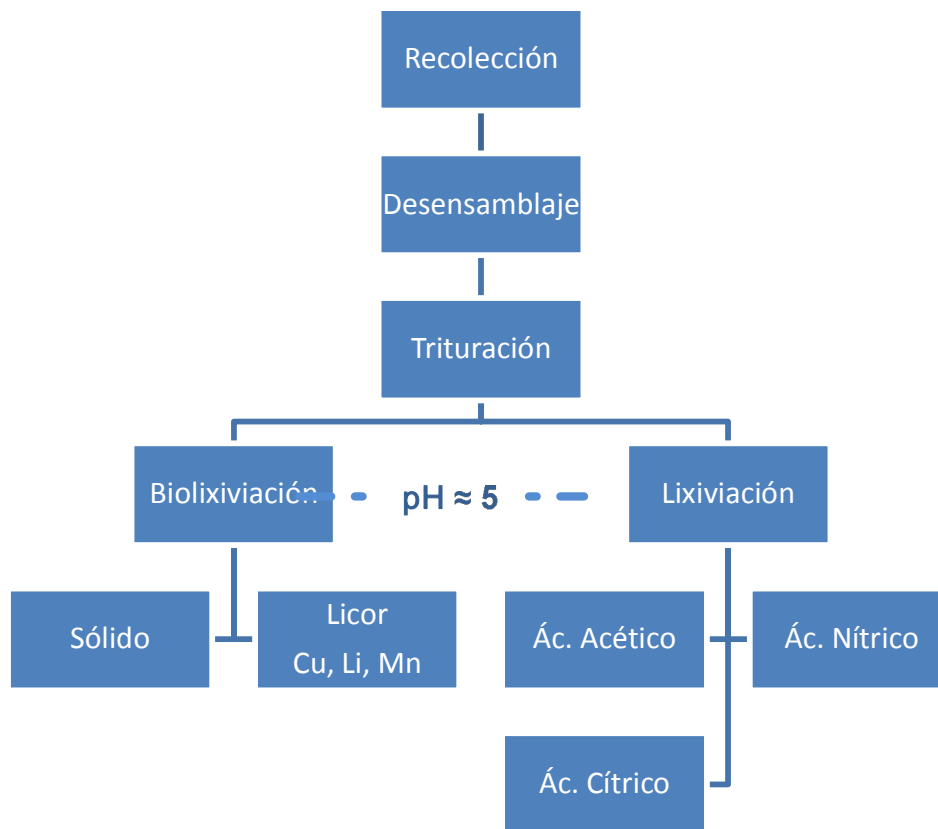


Figura 8. Diagrama de desarrollo experimental

2.1 Equipo y material

La Tabla IV muestra los reactivos usados.

Tabla IV. Reactivos utilizados

Reactivo	Formula química	Pureza	Marca
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	93.98 – 95.48%	Productos químicos Monterrey
Fosfato de potasio monobásico	KH_2PO_4	99%	J. T. Baker
Sulfato de magnesio	MgSO_4	99.9%	Química Meyer
Hidróxido de sodio	NaOH	95%	Fermont
Ácido clorhídrico	HCl	37.2%	Fermont
Sacarosa	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	99%	Alfa Aesar
Ácido nítrico	HNO_3	70%	Fermont
Ácido cítrico	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	99.5%	Sigma Aldrich
Ácido acético glacial	CH_3COOH	99.8%	Fermont

La Tabla V muestra el equipo usado

Tabla V. Equipo utilizado

Equipo	Marca	Modelo
Absorción atómica	Perkin Elmer	A-Analyst 300
Incubadora	Biotech JMC	5302
Potenciómetro	Condustronic	pH10
Refractómetro	Boeco Germany	Boe 30103
Parrilla eléctrica	Thermo scientific	Cimarec

2.2 Preparación de baterías de celular

La preparación de la muestra se llevó en diferentes pasos: Recolección, desensamblaje, molienda y preparación final.

- a) Recolección: Se obtienen las baterías de celular. En la Figura 9 se muestran algunas de las baterías utilizadas en la experimentación.



Figura 9. Recolección de pilas de celular

- b) Desensamblaje: En este paso se abren cada una de las pilas, separando su interior como se muestra en la Figura 10. Las 4 partes de las que se componen una batería de celular, son de plástico por lo que se cortan con tijeras.

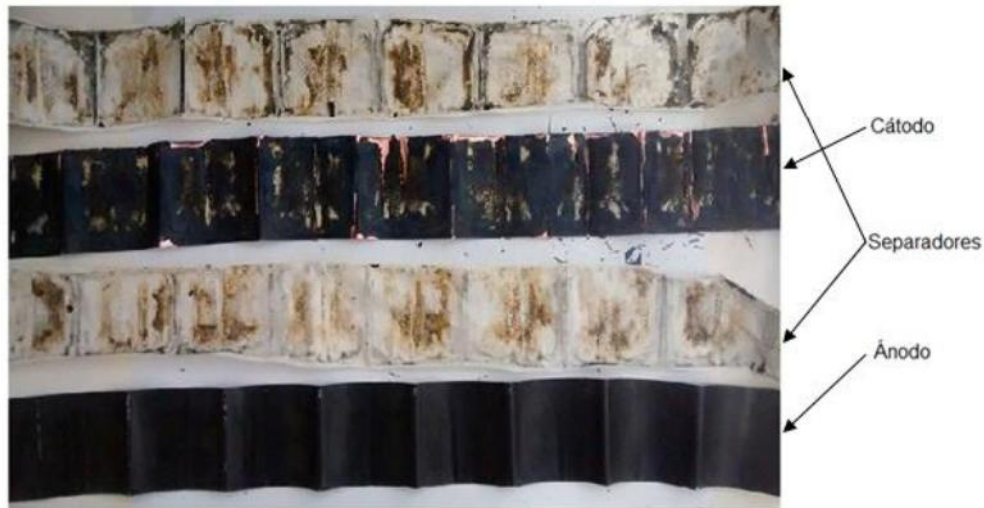


Figura 10. Composición interna de una batería de celular.

c) Molienda: La molienda se realiza en seco en un atricionador, este paso se lleva a cabo moliendo máximo dos baterías al mismo tiempo, teniendo un control del tiempo (3 minutos de molienda total en lapsos de 1 minuto) para evitar el sobrecalentamiento del equipo. En la Figura 11 se muestra el proceso de molienda en el atricionador.



Figura 11. Atricionador moliendo baterías de celular

- d) Homogenización y muestreo: Se mezcla toda la muestra molida y se hacen muestras de 5g mediante la técnica de cono-cuardeo. En la Figura 12 se puede observar la muestra de 5g de la batería molida.



Figura 12. Muestra de 5 g de batería molida

2.3 Lixiviación bacteriana

2.3.1 Preparación del medio de cultivo y esterilización

Para que el hongo tenga un medio apropiado para su desarrollo, se necesita un medio de cultivo apropiado, que para este trabajo se realizó con la composición mostrada en la Tabla VI, donde el nitrato de amonio, el fosfato de potasio monobásico, y el sulfato de magnesio heptahidratado son los macronutrientes del *Aspergillus niger* y finalmente la sacarosa es la fuente de carbono aportando así la energía al hongo.

Tabla VI. Composición del medio de cultivo

Reactivo	Formula	Cantidad	Unidades
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	3	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Fosfato de Potasio monobásico	KH_2PO_4	1	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Sulfato de magnesio heptahidratado	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Sacarosa	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	100	$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
Agua	H_2O	1	L

Además, se elabora una solución de NaOH al 5%, que sirve para modificar el pH del medio de cultivo.

Se pesan los reactivos y se mezclan agregando agua en un matraz volumétrico de 1 L, sin llegar al aforo. Se mide el pH del medio con un potenciómetro portátil y se modifica hasta 6.5 agregando la solución de NaOH al 5% con micropipeta, y finalmente se afora a 1 L. La solución que se obtiene se muestra en la Figura 13. Esta solución debe permanecer en refrigeración.



Figura 13. Medio de cultivo

En un matraz se coloca una muestra de 5 g de batería molida, y se agregan 200 mL del medio de cultivo. El matraz se tapa con algodón y este, a su vez, se cubre con papel aluminio.

Se agrega suficiente agua de la llave a la autoclave y se coloca el matraz (pueden ser varios matraces según lo requiera la experimentación). Se cierra lo mejor posible la autoclave para evitar fugas, y es expuesta a calor hasta alcanzar una temperatura de 120 °C y una presión de 14 psi, una vez alcanzando estas condiciones se mantienen durante 17 minutos.

En la Figura 14 se muestra el matraz preparado para ser esterilizado y la autoclave.



Figura 14. Matraz preparado para esterilizar y autoclave

2.3.2 Inoculación del hongo *Aspergillus Níger*

Una vez esterilizada la muestra se saca de la autoclave y se limpia la mesa con un algodón humedecido con alcohol en un área de 30 cm para esterilizarla. Se coloca en el centro de dicha área un mechero con flama alta.

Dentro de esta área debe llevarse a acabo la inoculación debido a que se trabaja con un hongo. El matraz de la muestra, el matraz que contiene el hongo *Aspergillus níger*, la micropipeta y las puntas de micropipeta, previamente esterilizadas, se colocan dentro de esta área. Se realiza el procedimiento descrito a continuación y mostrado en la Figura 15.

1. Se pasan rapidamente las manos por el fuego para eliminar cualquier tipo de microorganismo.
2. Se destapa el matraz que contiene al hongo, cuidando que el algodón no se contamine.
3. Se destapa la muestra a inocular, cuidando de igual manera el algodón.
4. Se pasa la boquilla del matraz de la muestra por el fuego para eliminar residuos de algodón.
5. Se pasa la boquilla del matraz que contiene al hongo por el fuego, de igual manera para eliminar residuos de algodón.
6. Se toma la punta de la micropipeta con la micropipeta a 1 mL.
7. La micropipeta se introduce al matraz con el hongo y se toma 1mL.
8. La micropipeta con el mL de lodo se introduce a la muestra y se deja vaciar el contenido.
9. Se pasan las boquillas de los matraces por el fuego.
10. Se tapan los matraces.
11. Se agita el matraz recién inoculado.
12. La muestra se pone en la incubadora a las condiciones estipuladas y cada 3 días se saca una muestra para revisar su crecimiento.
13. Se tapa el matraz que contiene al hongo y se coloca en la incubadora.

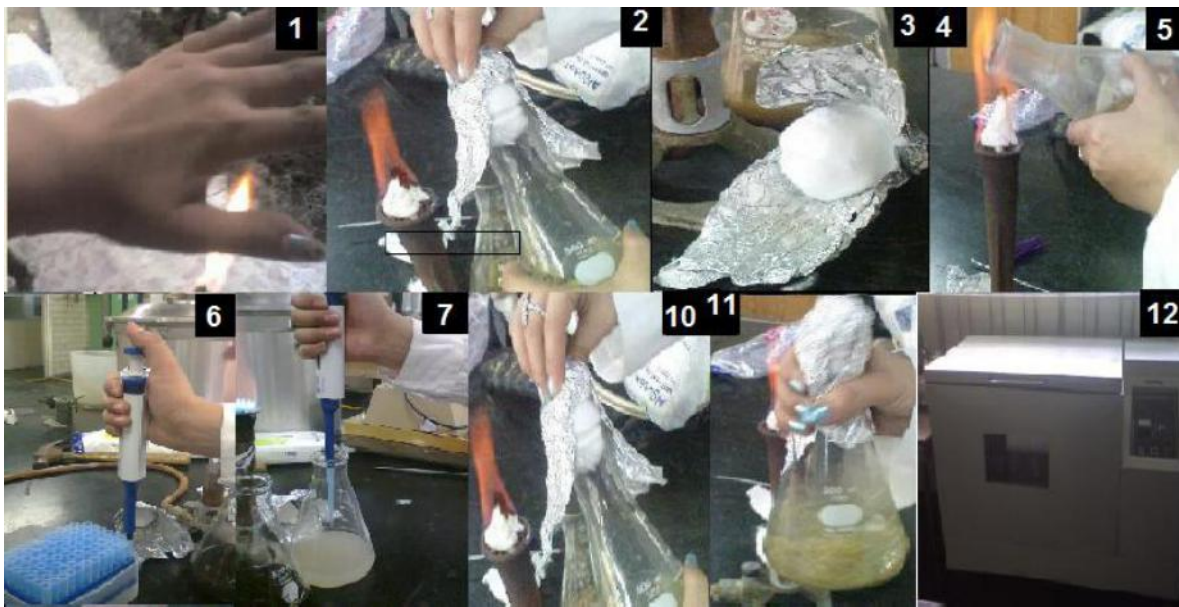


Figura 15. Proceso de inoculación

2.3.3 Biolixiviación

Para la biolixiviación se requiere la preparación de diversas muestras. Las condiciones de las muestras se presentan en la Tabla VII

Tabla VII. Condiciones de las muestras de biolixiviación

Muestra	Temperatura	Agitación
1.1	40 °C	75 rpm
1.2	40 °C	75 rpm
1.3	40 °C	75 rpm
1.4	T. Ambiente	Sin Agitación
1.5	T. Ambiente	Sin Agitación
1.6	T. Ambiente	Sin Agitación
2.1	40 °C	100 rpm
2.2	40 °C	100 rpm
2.3	40 °C	100 rpm
3.1	40 °C	125 rpm
3.2	40 °C	125 rpm
3.3	40 °C	125 rpm
4.1	45 °C	100 rpm
4.2	45 °C	100 rpm
4.3	45 °C	100 rpm

Las muestras permanecen en estas condiciones durante 21 días. Cada tres días se sacan 2 mL de la muestra, siguiendo el procedimiento previamente descrito en la inoculación, y se colocan en un frasco agregando 10 mL de agua destilada. Se colocan en refrigeración para detener el crecimiento del hongo. Es importante mencionar que cada muestra se realizó por triplicado con el fin de tener un resultado estadísticamente más certero. La incubadora se muestra en la Figura 16.



Figura 18. Refractómetro portátil

2.3.4 Filtrado y dilución

El filtrado se hace para que los sólidos no intervengan en la medición en el equipo de absorción atómica y evitar que se tape, todas las muestras deben ser filtradas. Se lleva a cabo por medio de un filtro al vacío. El filtro se conecta a la compresora por medio de una manguera, en la Figura 19 se muestra como se realiza el filtrado al vacío, se coloca un papel filtro, se vierte la muestra y se agregan 10 mL de agua destilada para enjuagar las paredes del frasco, se prende la compresora y empieza a filtrarse la muestra, una vez filtrada la solución la compresora se apaga y la manguera se desconecta, se vierte el líquido en el frasco, se remueve el papel filtro con el hongo y el filtro se lava y se coloca un nuevo papel filtro para repetir el proceso para una nueva muestra.



Figura 19. Filtrado al vacío

El siguiente paso en el proceso es la dilución, se toman 5 mL de la muestra previamente filtrada y se vierten en un matraz volumétrico de 50 mL, se agrega 1 mL de HCl y se afora, la nueva solución se agita perfectamente para proceder a la medición en absorción atómica.

2.4 Lixiviación con ácidos orgánicos e inorgánicos

2.4.1 Preparación del medio lixivante y ajuste de pH

Como se menciona más adelante el pH mínimo encontrado en el proceso de biolixiviación es 5.79, por tanto, para que el pH fuera similar en todos los medios lixiviantes se estableció un pH entre 5.5 y 6 para el proceso de lixiviación.

Para la preparación del medio lixivante se requiere un volumen de 200 mL de agua destilada en un vaso de precipitados en agitación, se mide pH y se agrega ácido nítrico, ácido acético o ácido cítrico, en pequeñas cantidades, según sea el medio lixivante requerido, se mide el pH constantemente y se ajusta con NaOH hasta obtener un pH entre 5.5 y 6. En la Figura 20 se muestra la preparación del medio lixivante y ajuste de pH.

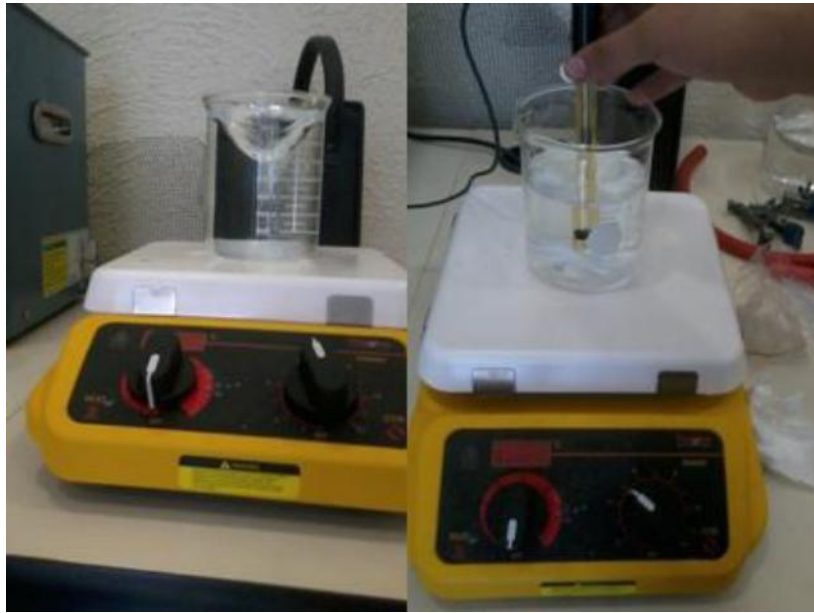


Figura 20. Preparación del medio lixivante y ajuste de pH

2.4.2 Lixiviación

En la Tabla VIII se muestra las principales propiedades de los ácidos utilizados en la fase de experimentación.

Tabla VIII. Propiedades de algunos ácidos importantes. [23]

Denominación química	Color/Forma	p.e. (°C)	p.f. (°C)	p.m (g/mol)	Solubilidad en agua	Densidad relativa (agua=1)
Ácido nítrico	Líquido transparente incoloro o amarillento	83	-42	63.01	Soluble	1.5027 @ 25°C/4°C
Ácido acético	Cristales rómbicos (0.6 °C P.F.) Líquido incoloro (16.6 °C P.F.)	118	16.6	60.05	Miscible	1.0492
Ácido cítrico	Cristales incoloros translucidos o polvo blanco granular	descomp	153	192.12	Muy soluble	1.665

Se coloca la muestra de 5 g de batería molida en un matraz, se agrega el medio lixivante a 200 mL, se pone dentro del matraz un agitador magnético como se muestra en la Figura 21. Se prende la parrilla eléctrica a las condiciones mostradas en la Tabla IX.

Tabla IX. Condiciones de las muestras de lixiviación convencional

Muestra	Agente lixiviante	Temperatura	Agitación
5.1	Ác. Acético	40 °C	75 rpm
5.2	Ác. Acético	40 °C	100 rpm
5.3	Ác. Acético	40 °C	125 rpm
5.4	Ác. Acético	45 °C	100 rpm
6.1	Ác. Nítrico	40 °C	75 rpm
6.2	Ác. Nítrico	40 °C	100 rpm
6.3	Ác. Nítrico	40 °C	125 rpm
6.4	Ác. Nítrico	45 °C	100 rpm
7.1	Ác. Cítrico	40 °C	75 rpm
7.2	Ác. Cítrico	40 °C	100 rpm
7.3	Ác. Cítrico	40 °C	125 rpm
7.4	Ác. Cítrico	45 °C	100 rpm

Estas muestras permanecen a estas condiciones durante 140 minutos. Cada 20 minutos se sacan 2 mL de la muestra y se le agregan 20 mL de agua destilada

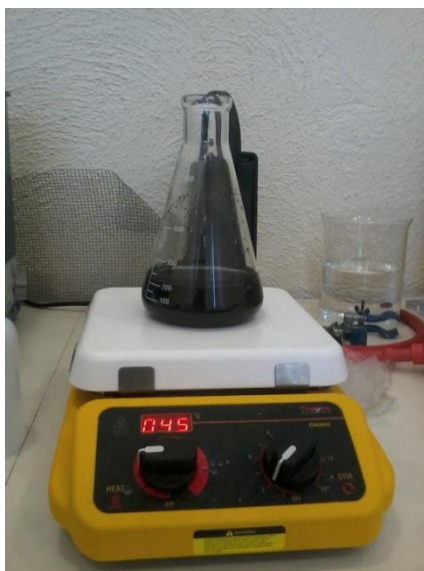


Figura 21. Lixiviación

2.4.3 Preparación de muestras de lixiviación

Las muestras de lixiviación no precisan de filtrado ya que los sólidos no son de gran tamaño, tampoco es necesario agregar ácido pues éste está contenido en el medio lixivante. Sin embargo se requieren diluir, se toman 5 mL de la muestra de lixiviación, se vierten en un matraz volumetrico de 50 mL y se afora como se muestra en la Figura 22, la nueva solución se agita perfectamente para proceder a la medición en absorción atómica.



Figura 22. Dilución de muestras

2.5 Espectrofotetría de absorción atómica Li, Cu, Mn

Una vez que las muestras están listas para la lectura, el equipo de absorción atómica, que se puede observar en la Figura 23, se prepara con los parámetros necesarios según el elemento a determinar, colocando la lámpara necesaria y elaborando la curva de calibración con los estándares apropiados para cada elemento.

Una vez preparado el equipo se hace la lectura, agitando las muestras para tener una solución homogénea. El resultado que el equipo arroja son las ppm de Li, Cu y Mn que

contiene la solución. Para determinar el contenido de estos elementos en la muestra se precisa de un cálculo según la dilución de la muestra.



Figura 23. Equipo de absorción atómica

CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Composición química de las baterías

Todas las baterías de celular utilizadas en este trabajo fueron baterías recargables de Ion-Li del tipo 3.6 ± 0.1 V, es decir, la materia es homogénea química y físicamente. Para la determinación cuantitativa de los elementos existentes en una batería de celular se recurrió al análisis de la cabeza del material ensayado el cual fue homogenizado. La composición interna de la pila se divide en cuatro partes, las cuales fueron analizadas por separado realizando los cálculos necesarios, por ejemplo para el Li:

a) Parte 1

Peso de la parte 1 de la batería = 1.798 g

Lectura del equipo de Absorción Atómica = 1.874 ppm

$$1.874 \text{ mgL}^{-1} \times 1 \times \left(\frac{100}{10}\right) \times \left(\frac{100}{10}\right) \times (.25 \text{ L}) = 46.8 \text{ mg}$$

$$\frac{46.8 \text{ mg}}{1000 \text{ mg}} \times 1 \text{ g} = 0.0468 \text{ g}$$

$$\frac{0.0468 \text{ g}}{1.798 \text{ g}} \times 100 = 2.602 \% \text{ Li}$$

b) Parte 2

Peso de la parte 2 de la batería = 3.435 g

Lectura del equipo de Absorción Atómica = 0.619 ppm

$$0.619 \text{ mgL}^{-1} \times 1 \times \left(\frac{100}{10}\right) \times \left(\frac{100}{10}\right) \times \left(\frac{100}{10}\right) \times (.25 \text{ L}) = 154.75 \text{ mg}$$

$$\frac{154.75 \text{ mg}}{1000 \text{ mg}} \times 1 \text{ g} = 0.15475 \text{ g}$$

$$\frac{0.15475 \text{ g}}{3.435 \text{ g}} \times 100 = 4.505 \% \text{ Li}$$

c) Parte 3

Peso de la parte 3 de la batería = 4.981 g

Lectura del equipo de Absorción Atómica = 0.796 ppm

$$0.796 \text{ mgL}^{-1} \times 1 \times \left(\frac{100}{10}\right) \times \left(\frac{100}{10}\right) \times \left(\frac{100}{10}\right) \times (.25 \text{ L}) = 199 \text{ mg}$$

$$\frac{199 \text{ mg}}{1000 \text{ mg}} \times 1 \text{ g} = 0.199 \text{ g}$$

$$\frac{0.199 \text{ g}}{4.981 \text{ g}} \times 100 = 3.995 \% \text{ Li}$$

d) Parte 4

Peso de la parte 4 de la batería = 6.057 g

Lectura del equipo de Absorción Atómica = 1.217 ppm

$$1.217 \text{ mgL}^{-1} \times 1 \times \left(\frac{100}{10}\right) \times \left(\frac{100}{10}\right) \times (.25 \text{ L}) = 30.425 \text{ mg}$$

$$\frac{30.425 \text{ mg}}{1000 \text{ mg}} \times 1 \text{ g} = 0.030425 \text{ g}$$

$$\frac{0.030425 \text{ g}}{6.057 \text{ g}} \times 100 = 0.502 \% \text{ Li}$$

Porcentaje de Li presente en la batería

Peso de la batería = 16.271 g

$$0.0468 \text{ g} + 0.15475 \text{ g} + 0.199 \text{ g} + 0.030425 \text{ g} = 0.430975 \text{ g}$$

$$\frac{0.430975}{16.271} = 2.6487 \% \text{ Li}$$

Los porcentajes de los elementos analizados se presentan en la tabla Tabla X. El resto de la batería lo comprenden algunos elementos minoritarios, plásticos y grafito.

Tabla X. Porcentajes de los elementos presentes en baterías de celular

Elemento	Ánodo (%)	Separador (%)	Separador (%)	Cátodo (%)	Total (%)
Co	0.0115	6.171×10^{-4}	4.286×10^{-4}	0.05	0.0225
Cu	0.0265	9.803×10^{-4}	6.645×10^{-4}	21.01	7.83
Fe	0.567	0.01414	0.0111	0.0102	0.0729
Li	2.602	4.505	3.995	0.502	2.648
Mn	5.62	10.276	9.174	0.064	5.623

Al realizar el análisis de cada parte de la batería, se decidió utilizar toda la batería en conjunto en vez de separarla, con dos propósitos, por un lado tener un mayor contenido metálico en la cabeza y por el otro analizar todo el sistema en su conjunto, ya que de esta manera sería más fácil escalarlo industrialmente. Se observa que una batería de celular contiene cobre, litio, y manganeso en mayor proporción, de tal manera que únicamente se analizaron estos elementos.

3.2 Medición de pH en la biolixiviación

El pH marca el nivel de acidez que tiene el medio, el ácido es producido por el hongo, por tanto es un ácido orgánico. El pH es el parámetro más importante en el presente trabajo, puesto que el pH más bajo obtenido de la biolixiviación es 5.79 y es el valor utilizado como referencia para el estudio de comparación con la lixiviación convencional.

Se muestran los resultados para el pH para las condiciones de $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 75 rpm en la Figura 24; Temperatura ambiente y sin agitación en la Figura 25; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 26; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 125 rpm en la Figura 27; $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 28.

Las muestras en la biolixiviación se realizaron por triplicado y se graficó el promedio junto con la desviación estándar representada por la barra de error, debido a que los

fenómenos naturales son menos estables que los fenómenos sintéticos. La desviación estándar muestra la variabilidad del hongo, es decir, los organismos no tienen un mismo comportamiento, debido a que como seres vivos cada microorganismo actúa de manera diferente, por ello se muestra la diferencia de su comportamiento conforme a su crecimiento.

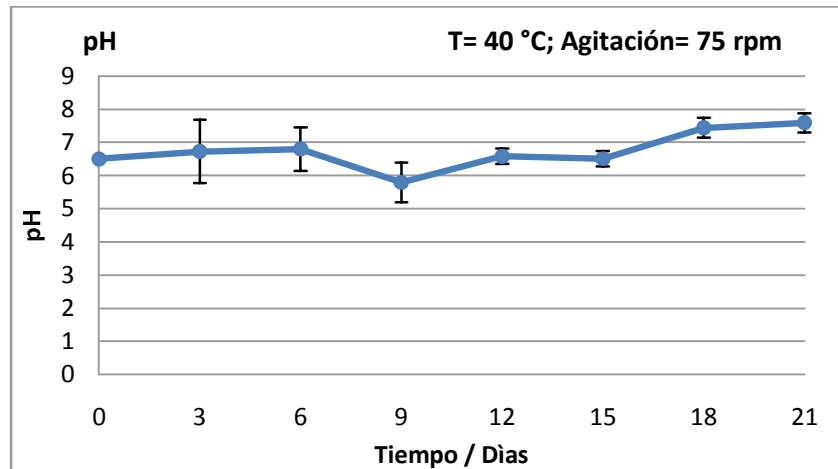


Figura 24. Medición de pH en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm

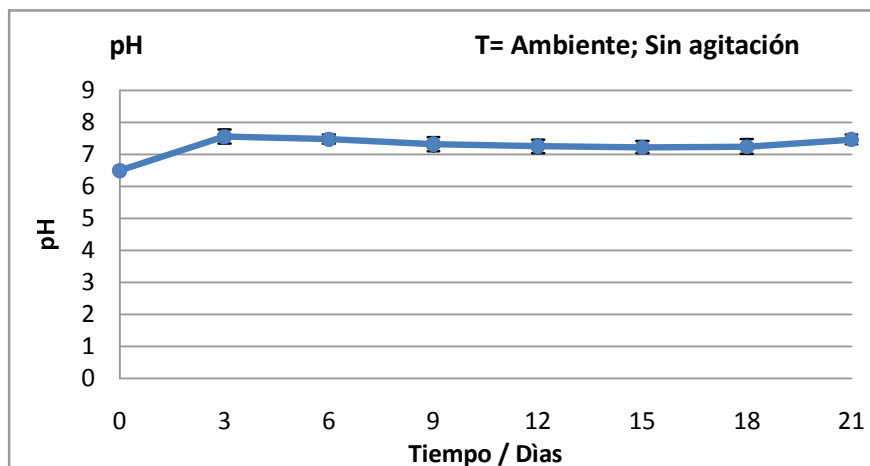


Figura 25. Medición de pH en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación

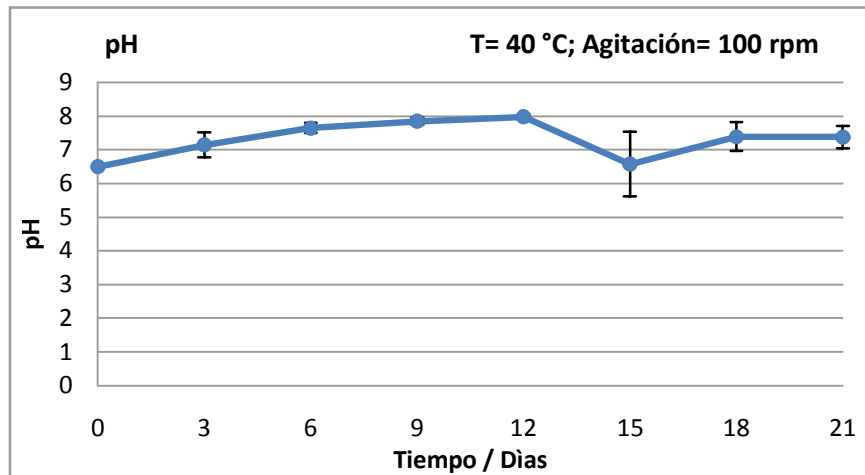


Figura 26. Medición de pH en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm

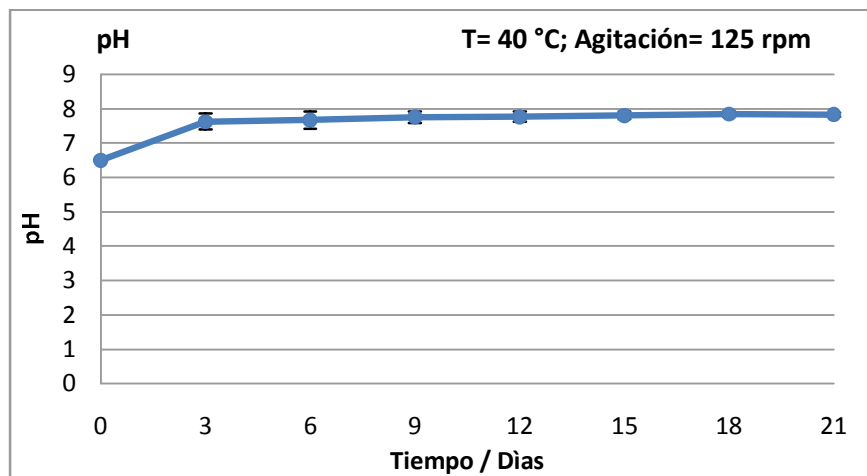


Figura 27. Medición de pH en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm

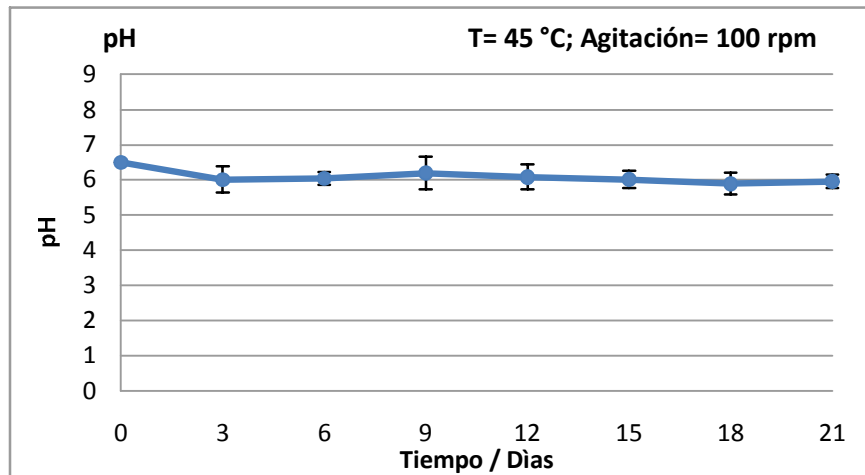


Figura 28. Medición de pH en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm

EL pH aumenta en casi todos los sistemas, a excepción de cuando el hongo está a 45 °C y 100 rpm donde genera más ácido y el pH disminuye, esto indica que el hongo crece mejor a estas condiciones, por ello en este sistema deben encontrarse mayores recuperaciones de los elementos previamente mencionados.

Es notorio que al día 3 todos los sistemas presentan un cambio importante en el pH y después se mantiene relativamente estable, esto es porque los primeros 3 días el hongo se dedica a crecer modificando el pH, esto se ve reflejado en las recuperaciones donde, en general, se observan cambios importantes al día 3.

En la Figura 29 se presenta el pH de una muestra que se monitoreo durante 152 días.

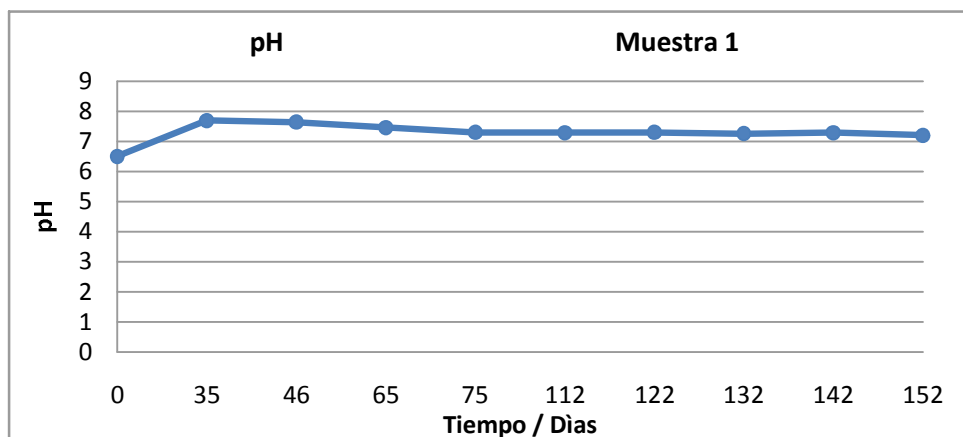


Figura 29. Medición de pH en la biolixiviación de la muestra 1

Para la muestra 1 el pH aumenta de manera significativa al día 35 y de ahí disminuye sutilmente hasta el día 75, se mantiene relativamente estable para después mantenerse estable, sin embargo el pH siempre es más alto que el inicial.

3.3 Medición de azúcar en la biolixiviación

Es importante tener un control de la cantidad de azúcar presente en el medio biológico debido a que el hongo se alimenta 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.

Se muestran los resultados al medir el azúcar para las condiciones de $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 75 rpm en la Figura 30; Temperatura ambiente y sin agitación en la Figura 31; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 32; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 125 rpm en la Figura 33; $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 34.

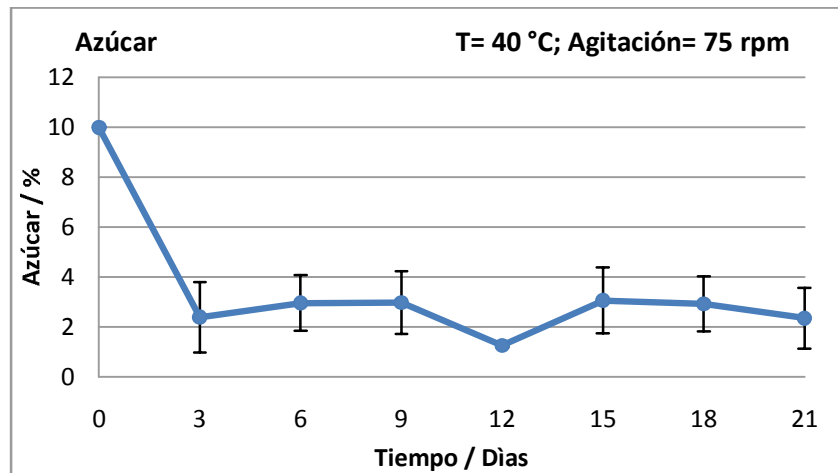


Figura 30. Medición de azúcar en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm

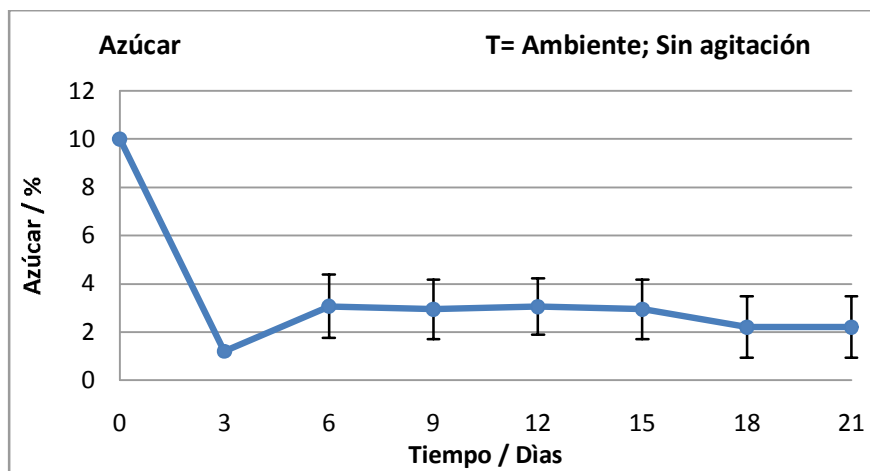


Figura 31. Medición de azúcar en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación

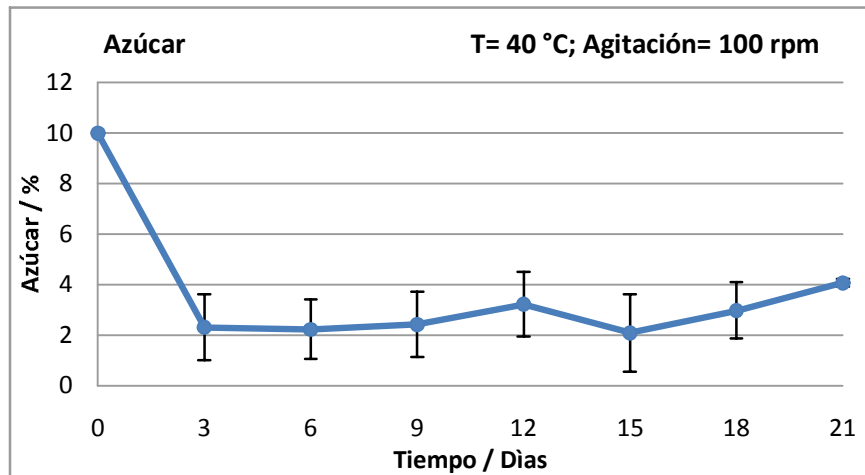


Figura 32. Medición de azúcar en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm

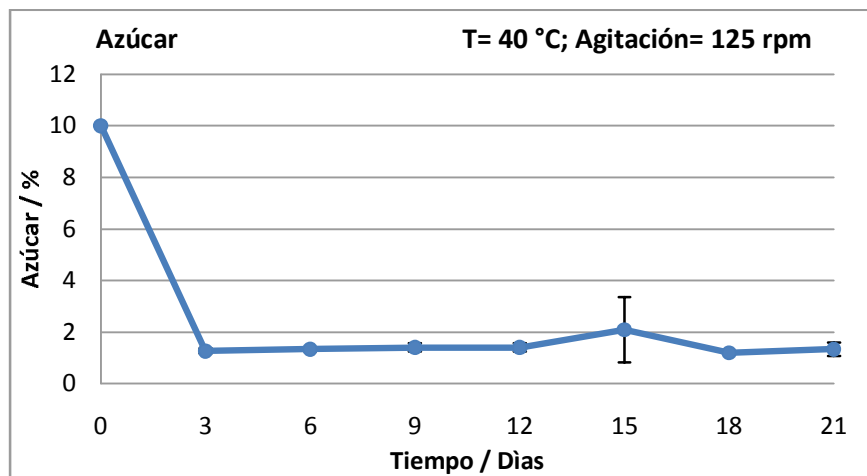


Figura 33. Medición de azúcar en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm

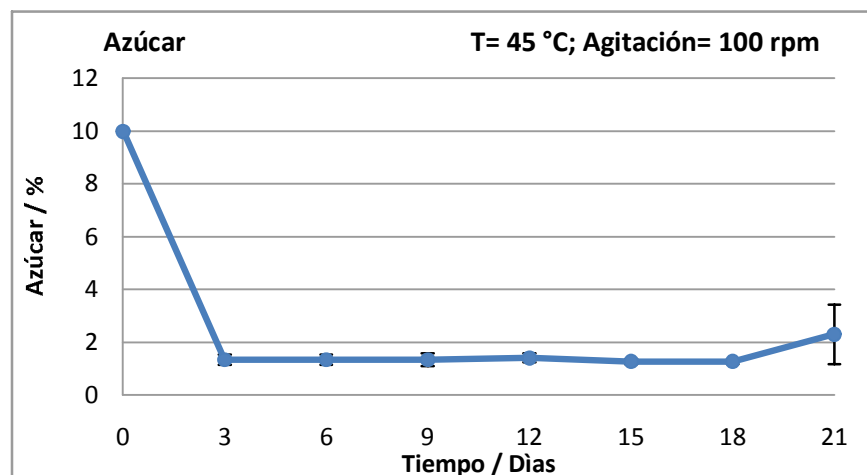


Figura 34. Medición de azúcar en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm

Todos los sistemas presentan la misma tendencia, la cantidad de azúcar disminuye súbitamente en el día 3, a partir de este día es, en general, constante. Esto indica que el hongo consume casi toda a sacarosa posible inmediatamente para crecer y luego deja de crecer. No se muestra que alguna de las condiciones favorezca especialmente al hongo en cuanto al consumo de azúcar.

En la Figura 35 se muestra el porcentaje de azúcar en la muestra que duró 152 días en biolixiviación.

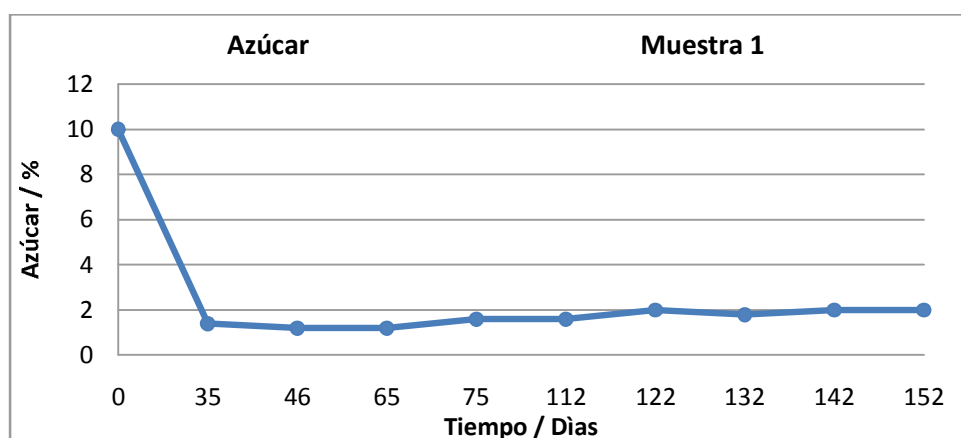


Figura 35. Medición de azúcar en la biolixiviación de la muestra 1

En la Figura 35 se puede observar que para el sistema de la muestra 1 el comportamiento del hongo es el mismo que en los demás sistemas. Disminuye al día 35 y se mantiene relativamente estable para los siguientes días.

3.4 Porcentajes de recuperación en la biolixiviación

En la biolixiviación se utilizan microorganismos que obtienen su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos, es decir, que pueden alimentarse de piedras, en el presente trabajo se utilizó azúcar para que el *Aspergillus niger* obtuviera su energía de ella. Los organismos de la biolixiviación pueden vivir en condiciones extremas; pH ácido, altas concentraciones de metales, cuyas condiciones son normales en minerales. El hongo secreta ácidos orgánicos, siendo estos los que llevan a cabo la biolixiviación. Este proceso mostro la efectividad esperada.

3.4.1 Recuperación de Cu

Se muestran los porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 36; Temperatura ambiente y sin agitación en la Figura 37; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 38; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 39; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 40.

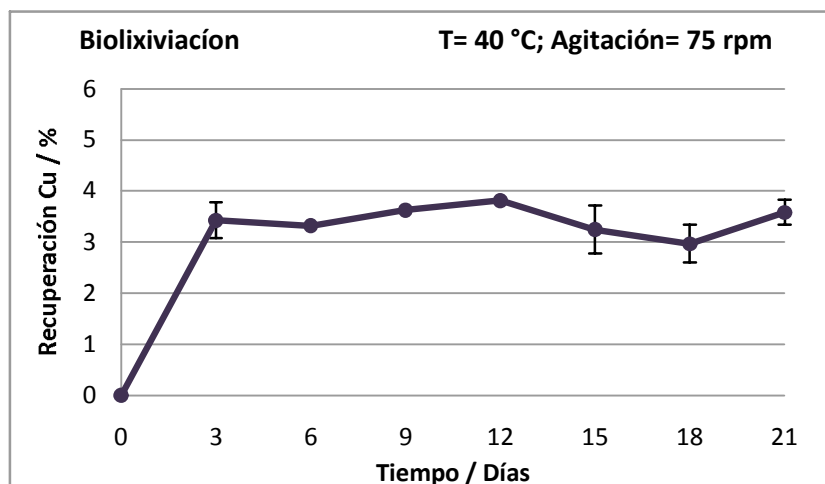


Figura 36. Porcentaje de Cu recuperado a 40 °C y 75 rpm

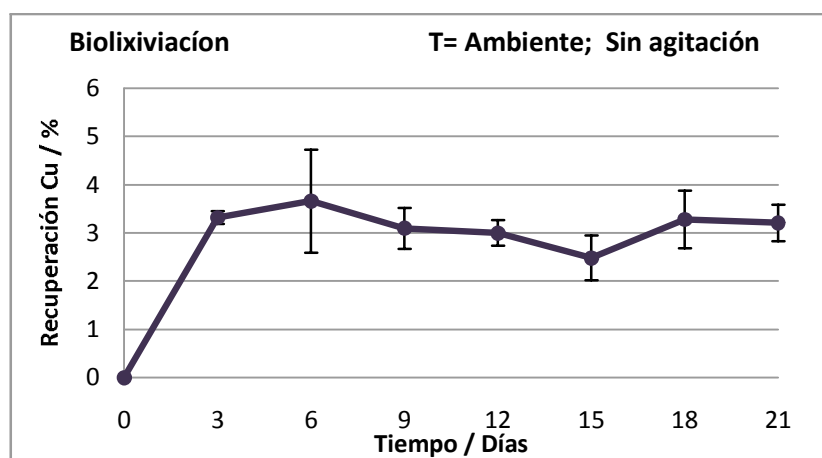


Figura 37. Porcentaje de Cu recuperado a temperatura ambiente y sin agitación

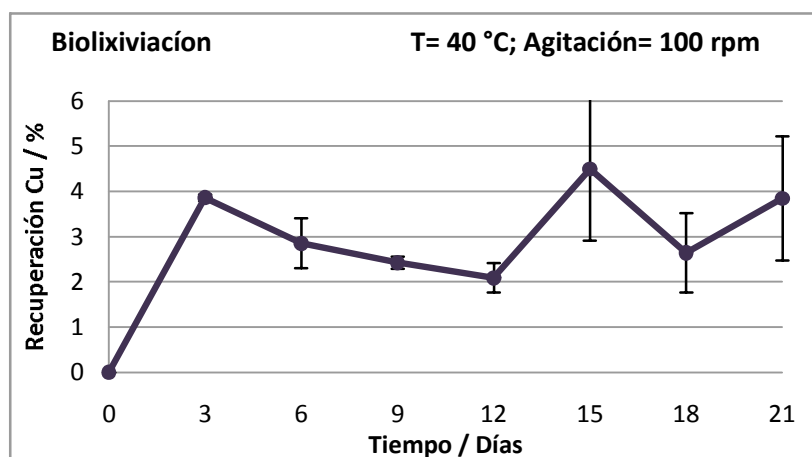


Figura 38. Porcentaje de Cu recuperado a 40 °C y 100 rpm

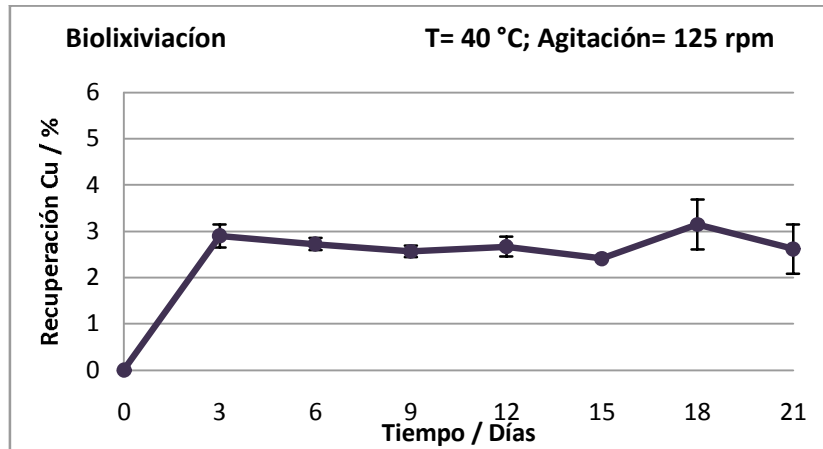


Figura 39. Porcentaje de Cu recuperado a 40 °C y 125 rpm

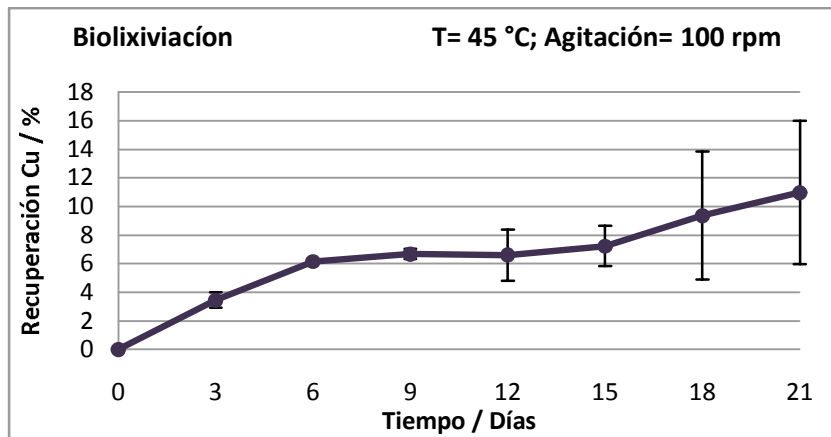


Figura 40. Porcentaje de Cu recuperado a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 41 se muestra la comparación de la recuperación de Cu a todas las condiciones.

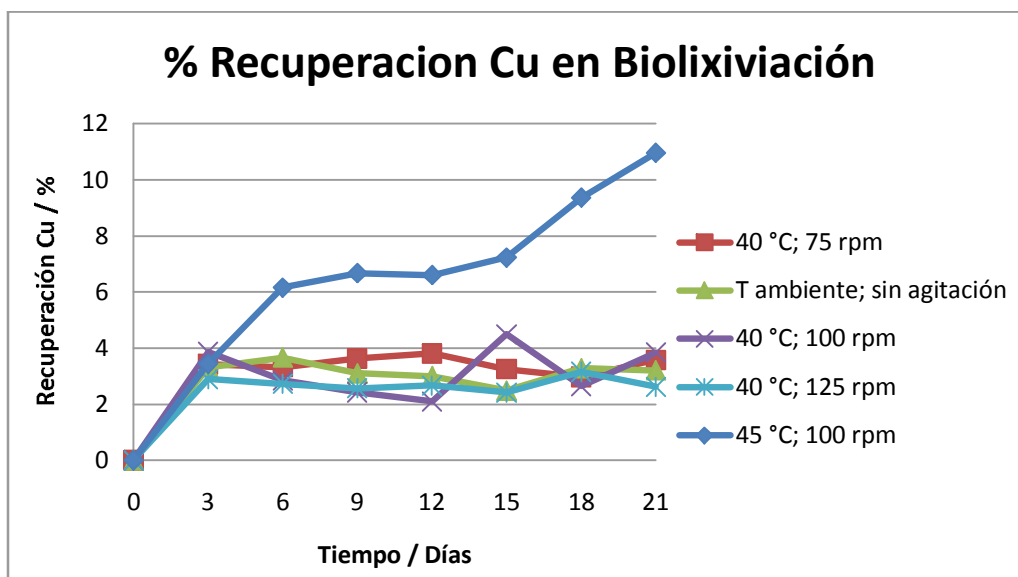


Figura 41. Porcentaje de recuperación de Cu en la biolixiviación

Podemos observar que los sistemas tienen una misma tendencia, se presenta una buena recuperación en el día 3 que se mantiene relativamente constante en los días posteriores, lo cual puede deberse a que es en esta etapa donde el hongo presenta una mayor actividad.

En la Figura 40 se muestra el sistema donde se tienen 45 °C y 100 rpm como condiciones, donde la recuperación muestra una tendencia creciente, obteniendo el mayor aumento para el día 21, lo que indica que estas condiciones favorecen el crecimiento del hongo. Este sistema muestra incluso el mayor porcentaje de recuperación en todos los medios, lo que hace a la biolixiviación el mejor medio lixivante para el Cu.

En la Figura 42 se muestra el porcentaje de recuperación de Cu de la muestra 1, que se biolixivió durante 366 días.

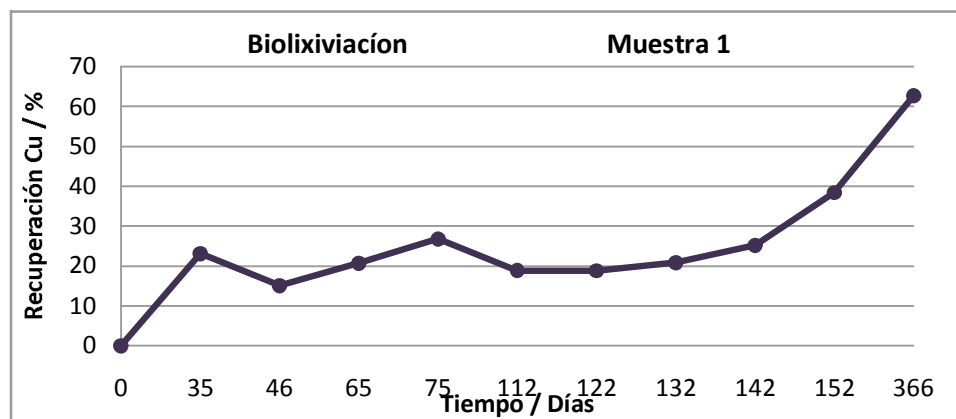


Figura 42. Porcentaje de Cu recuperado en la muestra 1

Para el sistema de la muestra 1, mostrado en la Figura 42, se observa que al día 75 se encuentra una buena recuperación que posteriormente decrece y toma una nueva tendencia que va en aumento hasta el día 366 donde se obtiene la máxima recuperación.

3.4.2 Recuperación de Li

Se presentan los porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 43; Temperatura ambiente y sin agitación en la Figura 44; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 45; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 46; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 47.

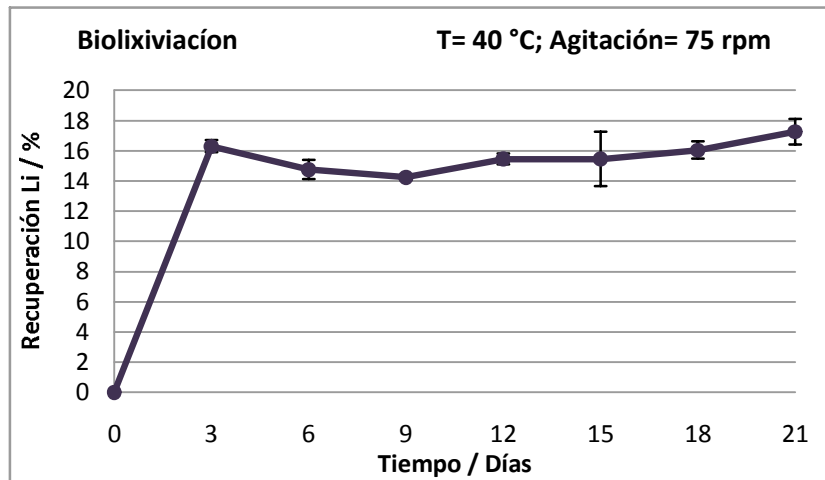


Figura 43. Porcentaje de Li recuperado a 40 °C y 75 rpm

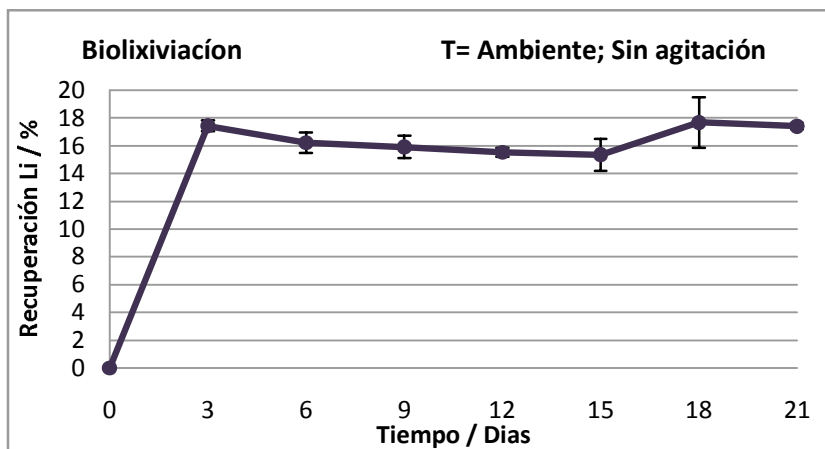


Figura 44. Porcentaje de Li recuperado a temperatura ambiente y sin agitación

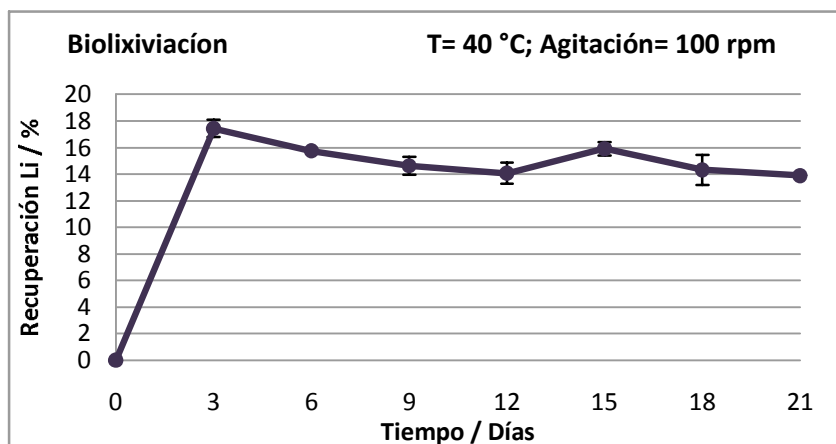


Figura 45. Porcentaje de Li recuperado a 40 °C y 100 rpm

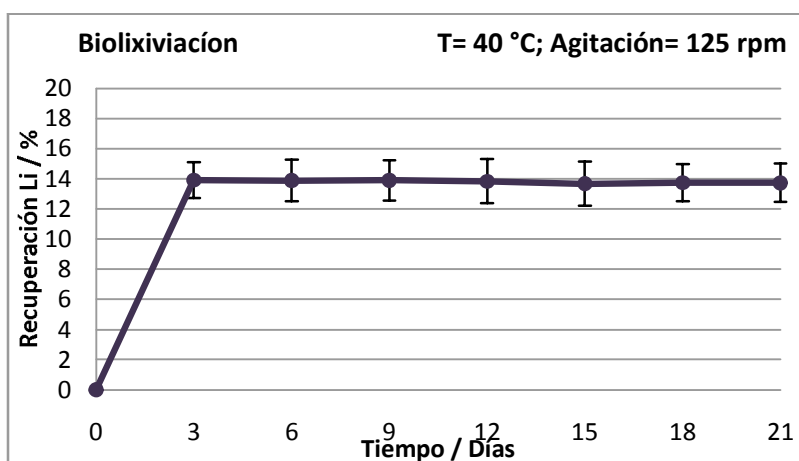


Figura 46. Porcentaje de Li recuperado a 40 °C y 125 rpm

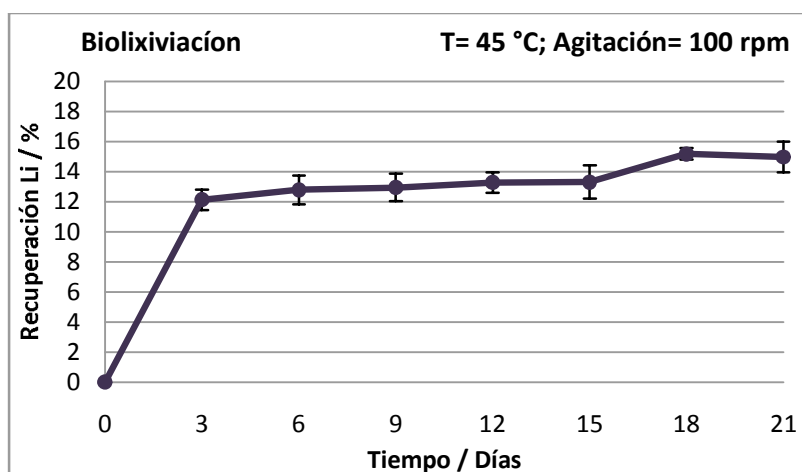


Figura 47. Porcentaje de Li recuperado a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 48 se muestra la comparación de la recuperación de Li a todas las condiciones.

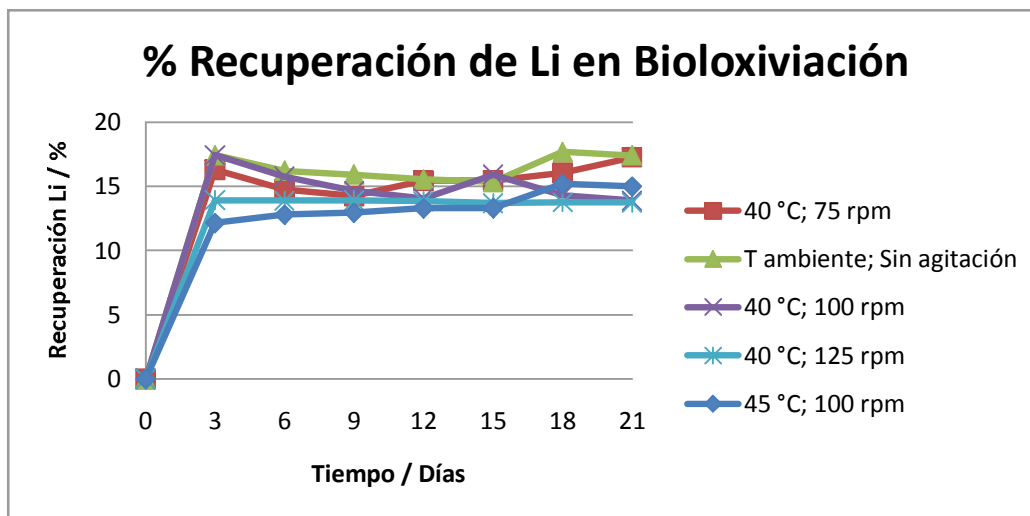


Figura 48. Porcentaje de recuperación de Li en la biolixiviación

Para la recuperación de Li los sistemas son, en general, similares ya que presentan una buena recuperación al día 3, disminuye para los días inmediatos y en los últimos días presentan su máxima recuperación. Siendo la temperatura ambiente y sin agitación las condiciones que favorecen la lixiviación del Li. En el sistema de 40 °C y 100 rpm, mostrado en la Figura 45, el mayor aumento se presenta en al día 3 y la grafica decrece ligeramente para los días posteriores. En el sistema de 45 °C y 100 rpm mostrado en la Figura 47 la recuperación va aumentando hasta el día 18, que es el punto más alto de recuperación y disminuye ligeramente para el día 21.

En la Figura 49 se muestra el porcentaje de recuperación de Li para la muestra 1 que estuvo durante 366 días en biolixiviación.

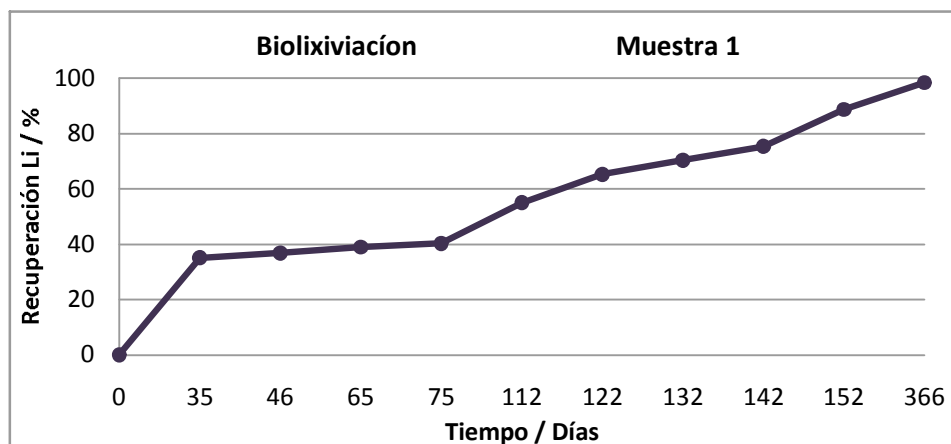


Figura 49. Porcentaje de Li recuperado en la muestra 1

En la Figura 49, la muestra 1 presenta una lixiviación creciente, teniendo la mayor recuperación en el día 366, con un porcentaje de recuperación casi del 100%.

3.4.3 Recuperación de Mn

Se presentan los porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a las condiciones de $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 75 rpm en la Figura 50; Temperatura ambiente y sin agitación en la Figura 51; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 52; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 125 rpm en la Figura 53; $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 54.

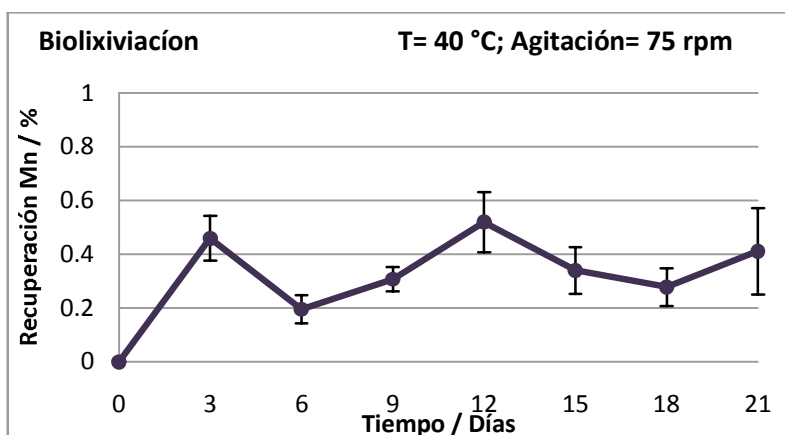


Figura 50. Porcentaje de Mn recuperado a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 75 rpm

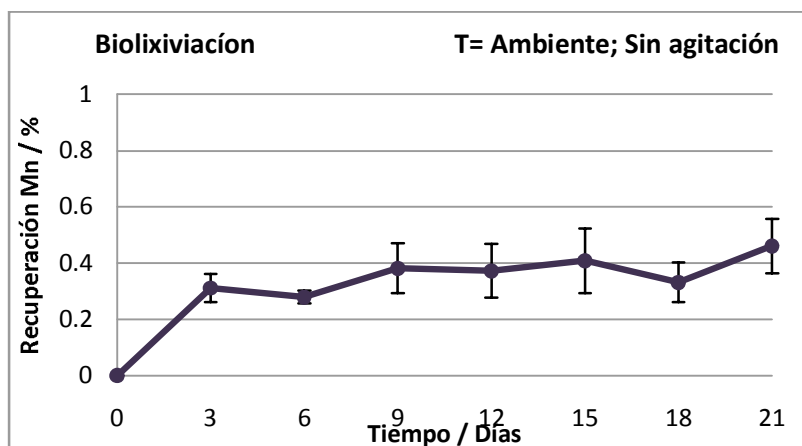


Figura 51. Porcentaje de Mn recuperado a temperatura ambiente y sin agitación

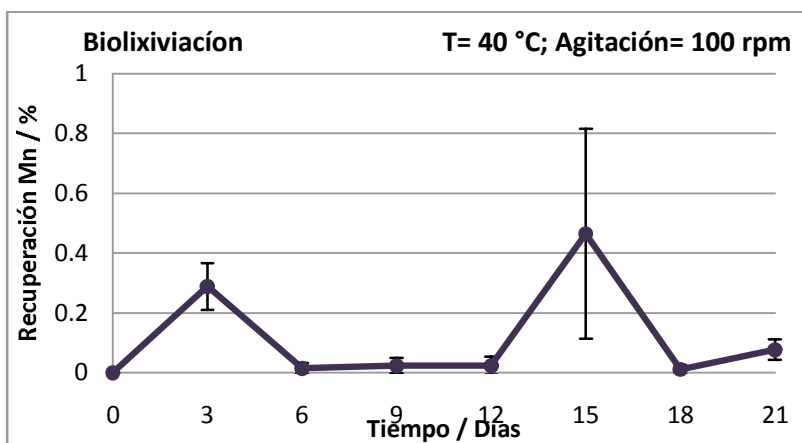


Figura 52. Porcentaje de Mn recuperado a 40 °C y 100 rpm

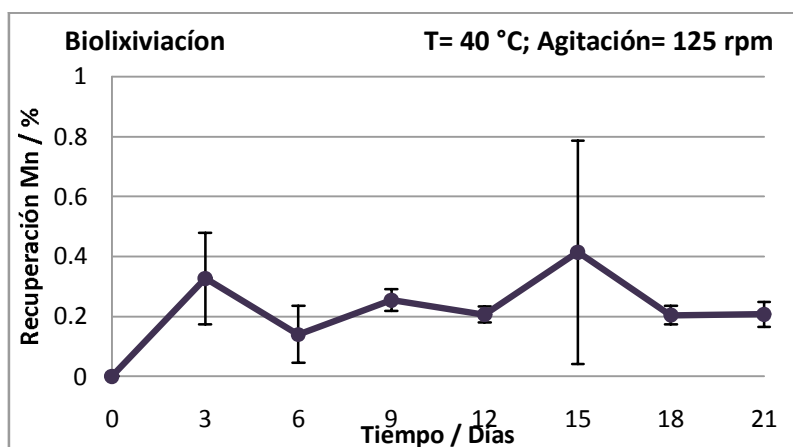


Figura 53. Porcentaje de Mn recuperado a 40 °C y 125 rpm

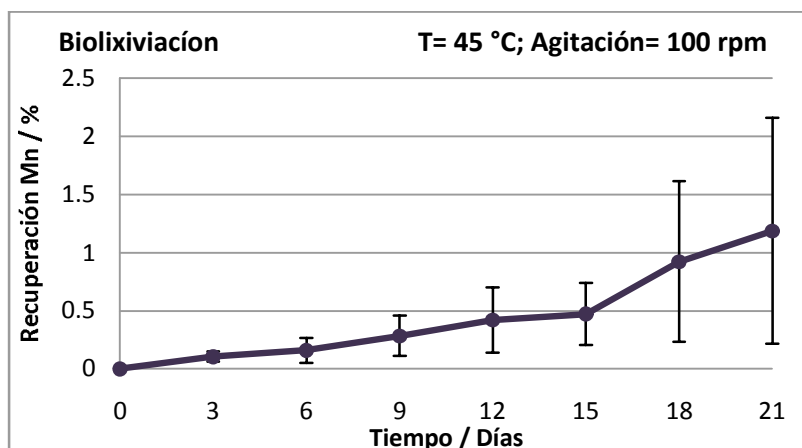


Figura 54. Porcentaje de Mn recuperado a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 55 se muestra la comparación de la recuperación de Mn a todas las condiciones.

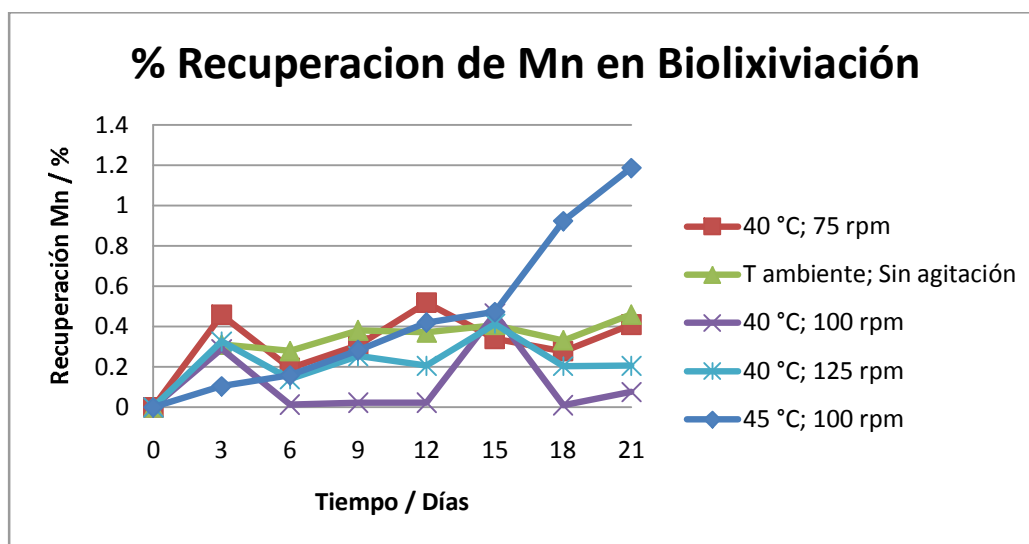


Figura 55. Porcentaje de recuperación de Mn en la biolixiviación

Debido a que la recuperación del Mn es muy baja, los errores de medición afectan. Sin embargo en la Figura 54, el sistema muestra una tendencia creciente hasta el día 21 donde se presenta la recuperación máxima, no solo de estas condiciones sino de todos los medios para el Mn, siendo 45°C y 100 rpm las condiciones que favorecen más el crecimiento del hongo por ende la recuperación de este elemento.

En la Figura 56 se muestra el porcentaje de recuperación de Mn para la muestra 1 que estuvo en biolixiviación durante 152 días.

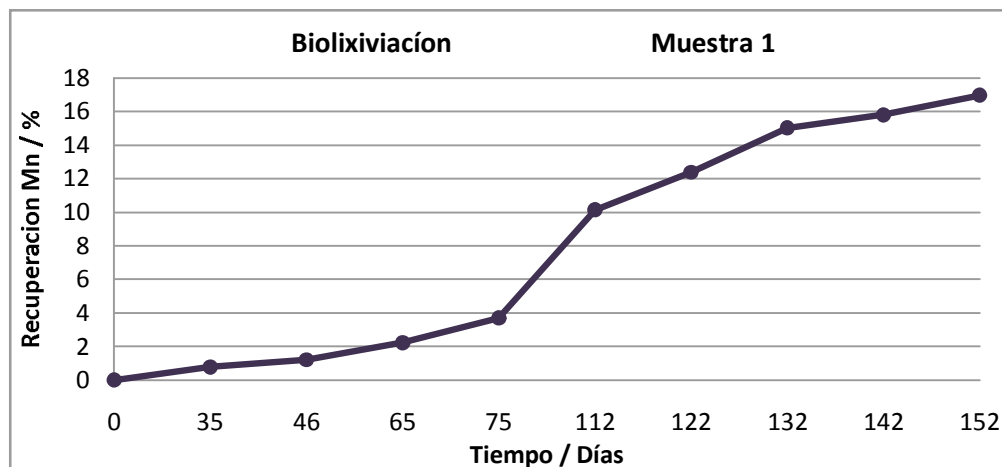


Figura 56. Porcentaje de Mn recuperado en la muestra

Para la muestra 1, cuyo sistema se muestra en la Figura 56, la recuperación va en aumento hasta que el día 152 se lleva a cabo la mayor recuperación.

3.5 Porcentaje de recuperación en diversos medios de lixiviación convencional.

La lixiviación, que también puede ser llamada extracción sólido-líquido, es la disolución de sustancias solubles con la ayuda de disolventes. Es un proceso donde se extraen solutos de un sólido en líquido, el sólido y el líquido están en contacto y los solutos pueden difundirse desde el sólido al líquido, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido para se obtiene el metal valor.

La lixiviación convencional se llevó a cabo con tres medio diferentes, un ácido inorgánico, un ácido orgánico débil y un ácido orgánico fuerte. Los ácidos orgánicos deben ser mejores lixiviantes como se observó en la biolixiviación.

3.5.1 Ácido Acético

El ácido acético es un ácido orgánico débil. Que al ser un ácido orgánico se producen naturalmente algunas plantas, algunos animales y algunos microorganismos. Se utiliza principalmente en la fabricación de medicamentos, tinturas, plásticos, aditivos para los alimentos e insecticidas.

3.5.1.1 Recuperación de Cu

Se presentan los porcentajes de recuperación de Cu en ácido acético a las condiciones de $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 75 rpm en la Figura 57; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 58; $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 125 rpm en la Figura 59; $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 100 rpm en la Figura 60.

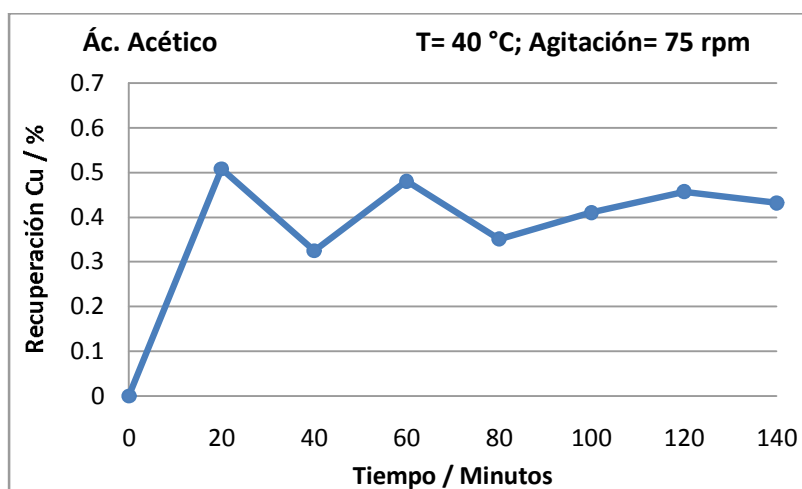


Figura 57. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 75 rpm

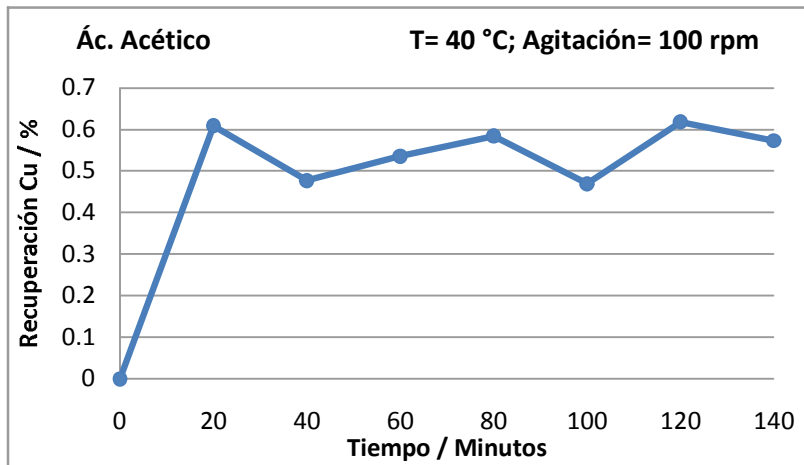


Figura 58. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 40 °C y 100 rpm

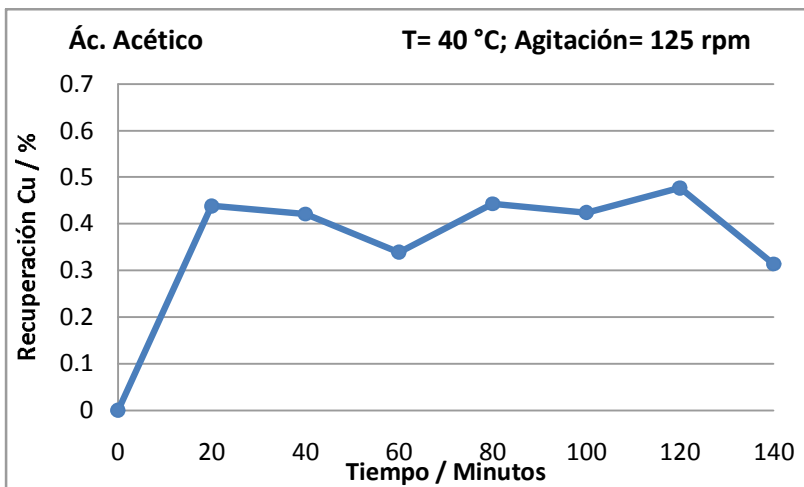


Figura 59. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 40 °C y 125 rpm

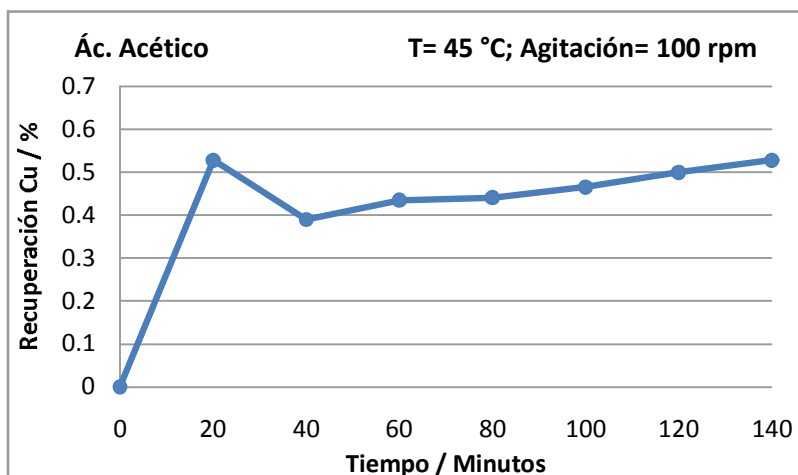


Figura 60. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 61 se muestra la comparación de la recuperación de Cu en ácido acético a todas las condiciones.

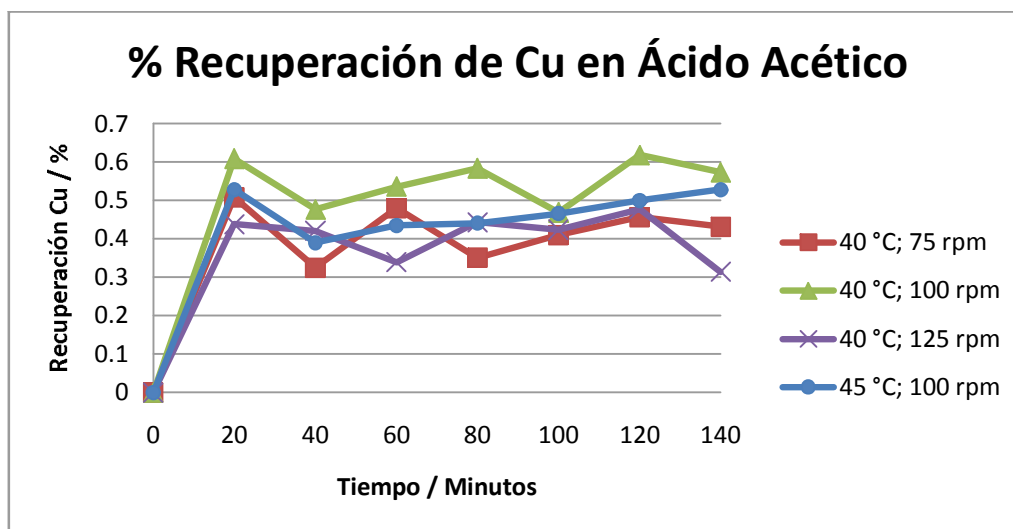


Figura 61. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido acético

En los sistemas podemos observar que en general la mayor recuperación de Cu en ácido acético se encuentra a los 20 minutos. La recuperación no es alta pero a 40 °C y 100 rpm se obtiene la mayor recuperación de Cu para este medio.

3.5.1.2 Recuperación de Li

Se muestran los porcentajes de recuperación de Li en ácido acético a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 62; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 63; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 64; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 65.

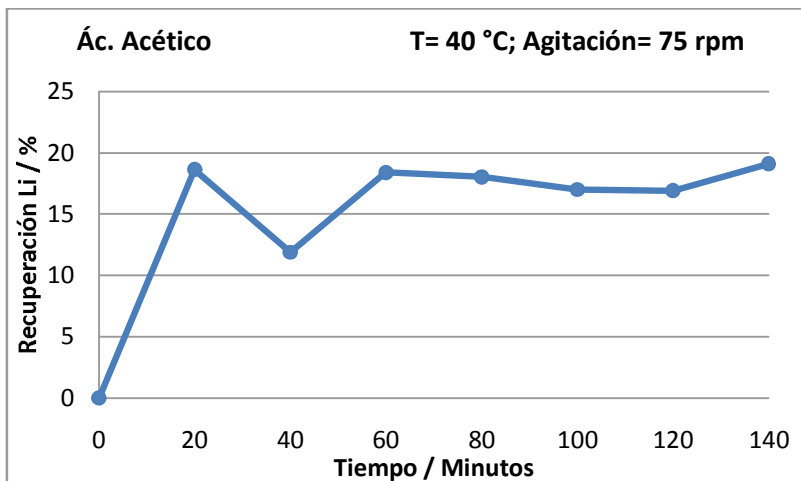


Figura 62. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 40 °C y 75 rpm

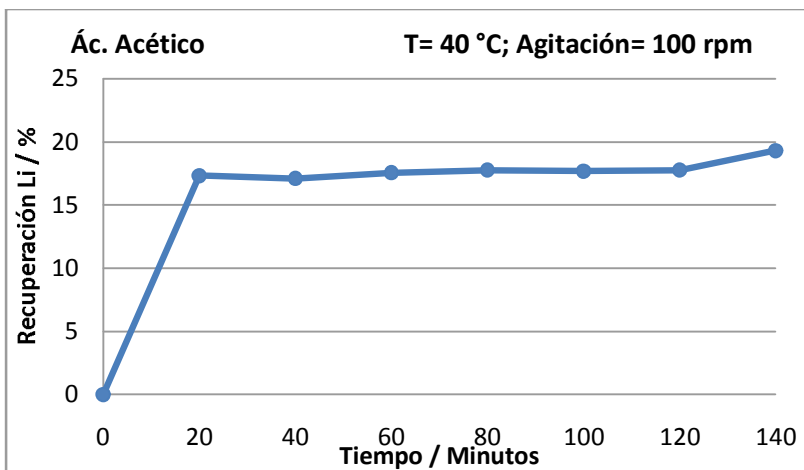


Figura 63. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 40 °C y 100 rpm

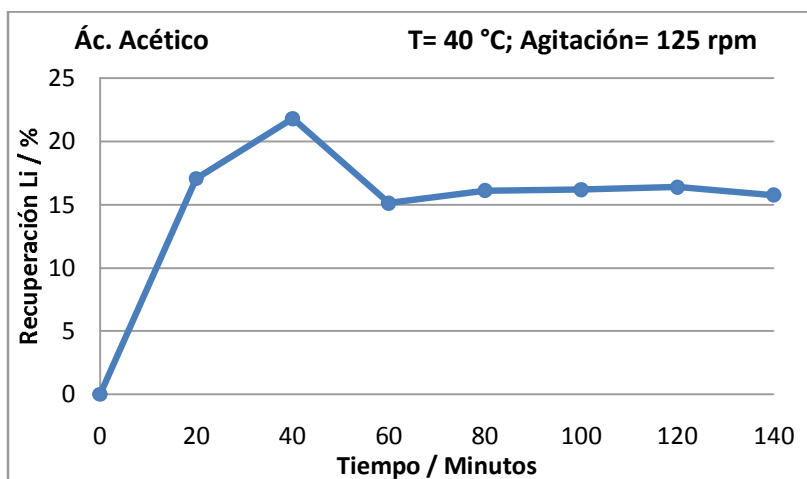


Figura 64. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 40 °C y 125 rpm

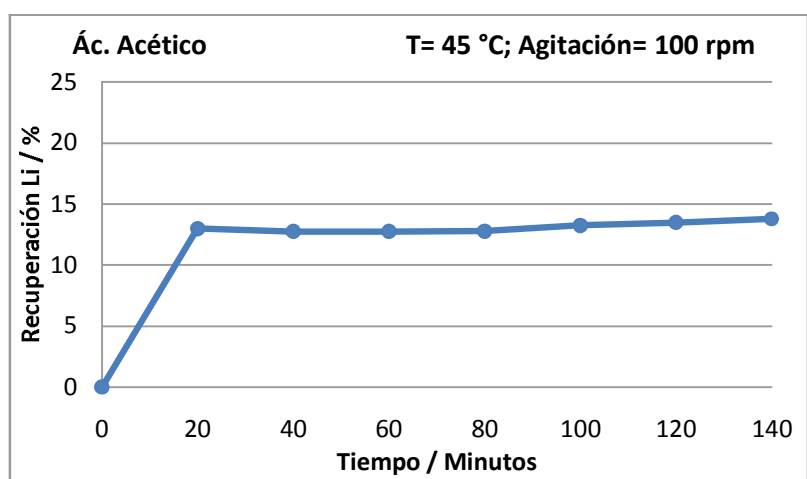


Figura 65. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 66 se muestra la comparación de la recuperación de Li en ácido acético a todas las condiciones.

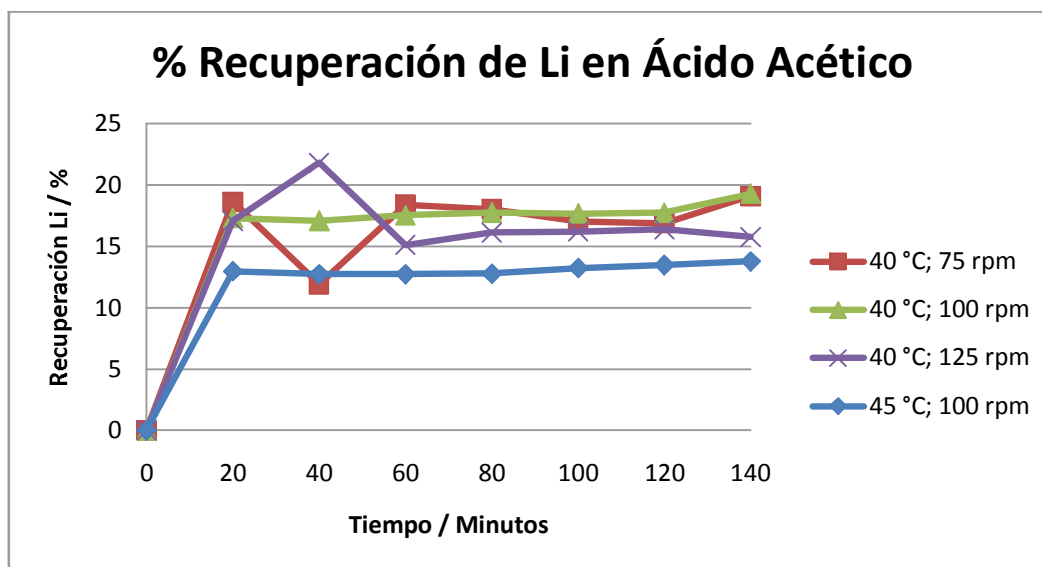


Figura 66. Porcentaje de recuperación de Li en ácido acético

Se puede observar que, a excepción de un sistema, la mayor recuperación para el Li en ácido acético se presenta al final de la experimentación, es decir a los 140 minutos. Los sistemas donde las experimentaciones estaban a 100 rpm presentan la misma tendencia, en el minuto 20 presentan una buena recuperación que disminuye para 40 y 60 minutos, en el minuto 80 aumenta su recuperación por encima del minuto 20, y a partir de este punto va aumentando la recuperación hasta el 140.

A 40 °C y 125 rpm en el minuto 40 se presenta la mayor recuperación de Li, no únicamente para este medio, sino para todos los medios. La lixiviación del litio se ve favorecida por los ácidos orgánicos.

3.5.1.3 Recuperación de Mn

Debido a que la recuperación de Mn es muy baja, los errores de medición afectan en gran manera presentado incluso recuperaciones nulas. Es por ello que en la Tabla XI se presentan las recuperaciones máximas de cada sistema.

Tabla XI. Recuperaciones máximas de Mn para cada sistema en Ác, Acético

Recuperación Max. (%)	Min	Condiciones
0.18	100	40 °C; 75 rpm
0.111	60	40 °C; 100 rpm
0.211	40	40 °C; 125 rpm

En la Figura 67 se muestra la comparación de la recuperación de Mn en ácido acético a todas las condiciones.

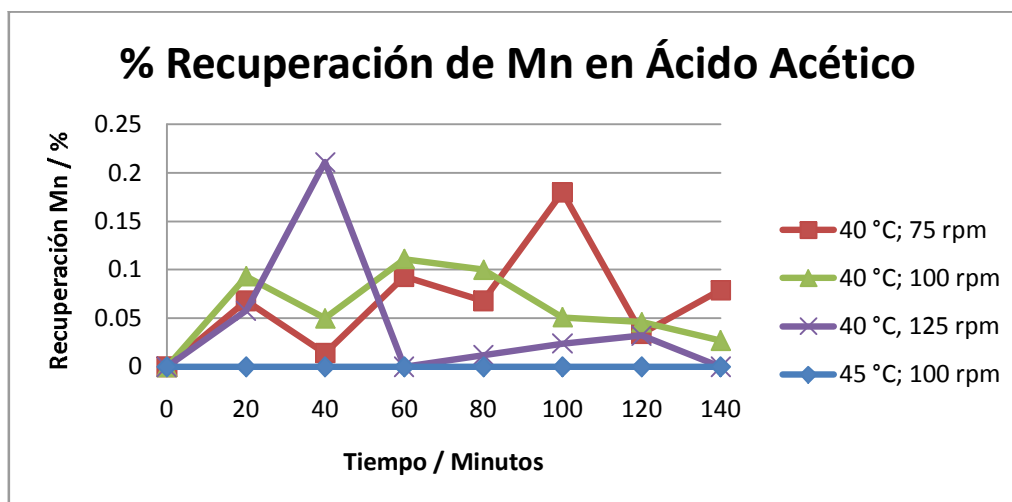


Figura 67. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido acético

El manganeso no tiene una lixiviación exitosa en ácido acético, siendo incluso nula para las condiciones de 45 °C y 100 rpm, es por eso que los sistemas presentan una tendencia anormal, ya que pueden verse afectadas por los errores de medición en el equipo de absorción atómica.

3.5.2 Ácido Nítrico

El ácido nítrico es un ácido inorgánico (ácido mineral). Como ácido mineral es derivado de compuestos inorgánicos, estos ácidos no tienen carbono a diferencia de los ácidos orgánicos. Los ácidos minerales son soluble en agua e insoluble en disolventes orgánicos. Se utilizan en algunos sectores de la industria química como materia prima

para la síntesis de otros productos químicos, también son utilizados directamente por sus propiedades corrosivas, el uso que se le al ácido nítrico es principalmente en laboratorios.

3.5.2.1 Recuperación de Cu

Se muestran los porcentajes de recuperación de Cu en ácido nítrico a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 68; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 69; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 70; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 71.

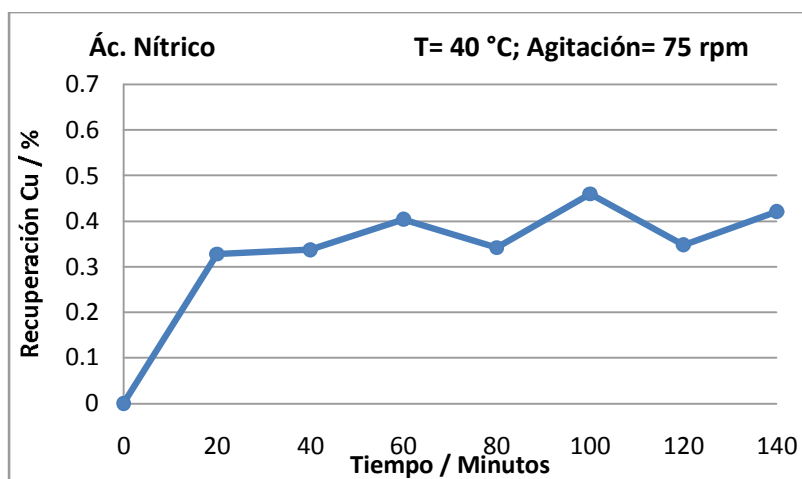


Figura 68. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 40 °C y 75 rpm

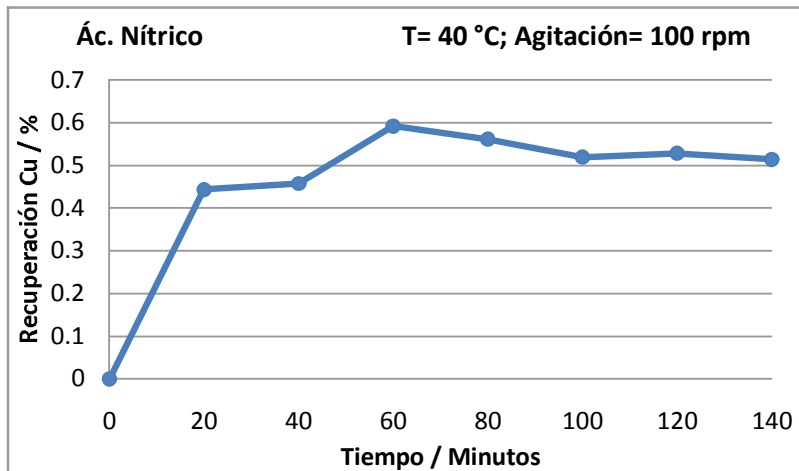


Figura 69. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 40 °C y 100 rpm

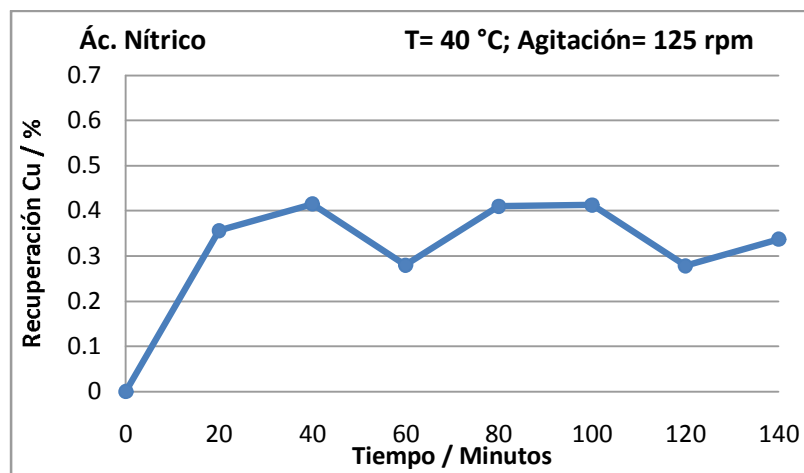


Figura 70. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 40 °C y 125 rpm

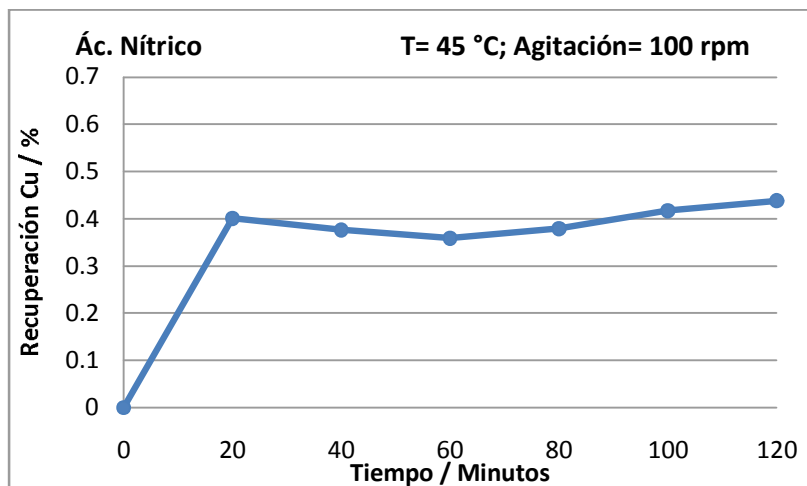


Figura 71. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 72 se muestra la comparación de la recuperación de Cu en ácido nítrico a todas las condiciones.

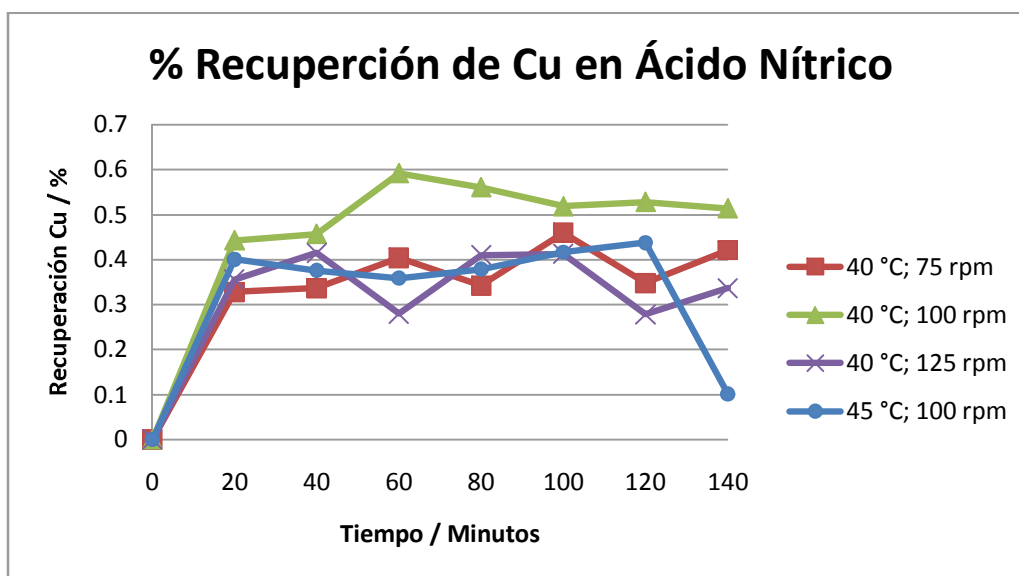


Figura 72. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido nítrico

El porcentaje de recuperación del Cu en ácido nítrico es muy baja. En todas las condiciones la mayor recuperación para este medio es después de los primeros 20

minutos. La recuperación de Cu para este medio se encuentra a los 60 minutos a 40 °C y 100 rpm.

A 45 °C y 100 rpm se puede observar notablemente que después de los 120 minutos la recuperación de Cu ya no se lleva a cabo.

3.5.2.2 Recuperación de Li

Se muestran los porcentajes de recuperación de Li en ácido nítrico a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 73; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 74; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 75; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 76.

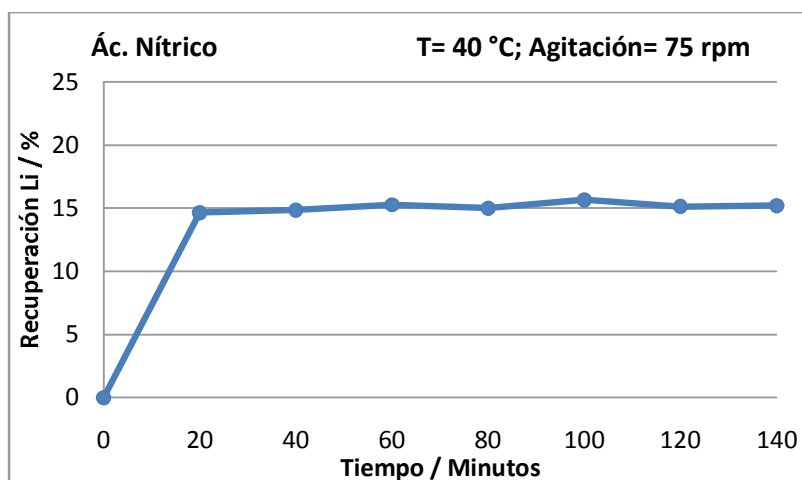


Figura 73. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 40 °C y 75 rpm

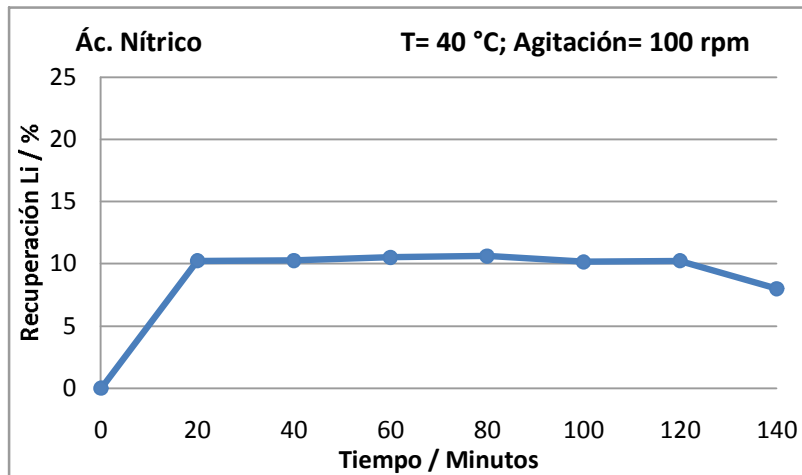


Figura 74. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 40 °C y 100 rpm

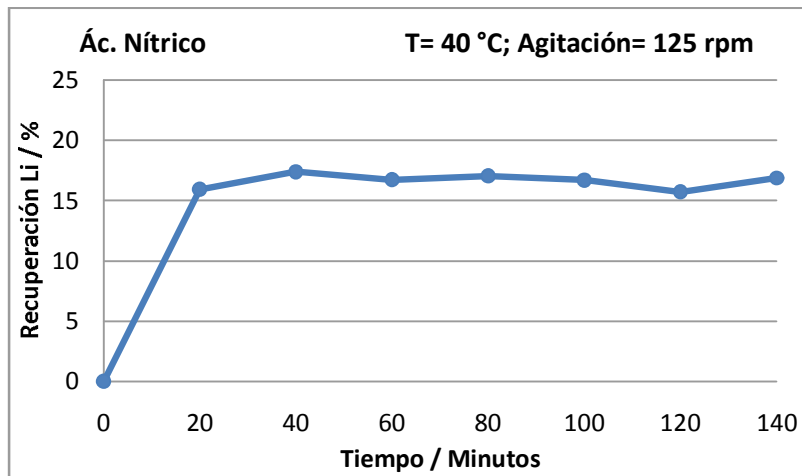


Figura 75. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 40 °C y 125 rpm

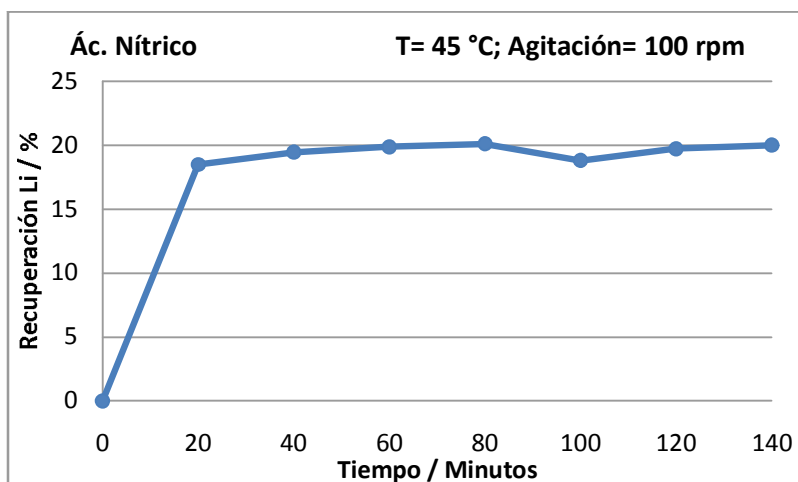


Figura 76. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 77 se muestra la comparación de la recuperación de Li en ácido nítrico a todas las condiciones.

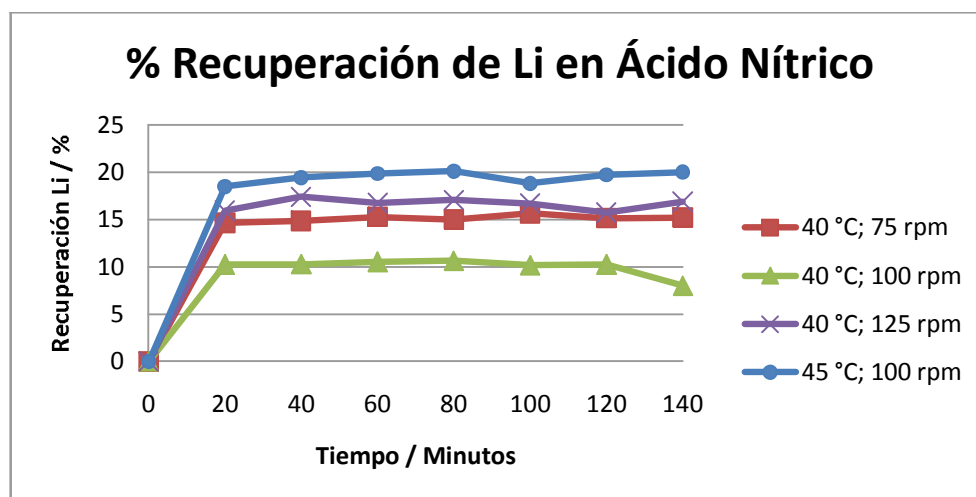


Figura 77. Porcentaje de recuperación de Li en ácido nítrico

En la Figura 77, donde se comparan las recuperaciones de Li en ácido nítrico, a todas las condiciones, se puede observar que todas las tendencias son similares, a grandes rasgos se tiene una recuperación constante. Se nota que a 40 °C y 125 rpm después de 120 minutos la recuperación de Li ya no se realiza. Para este medio la recuperación

máxima se encuentra a 80 minutos a 45 °C y 100 rpm, siendo la temperatura el principal factor.

3.5.2.3 Recuperación de Mn

La recuperación de manganeso es muy baja, presentando incluso recuperaciones nulas sobre todo en ácido nítrico, es por ello que en el sistema que presenta recuperación los errores de medición afectan. En la Figura 78 se muestra la comparación de la recuperación de Mn en ácido nítrico a todas las condiciones.

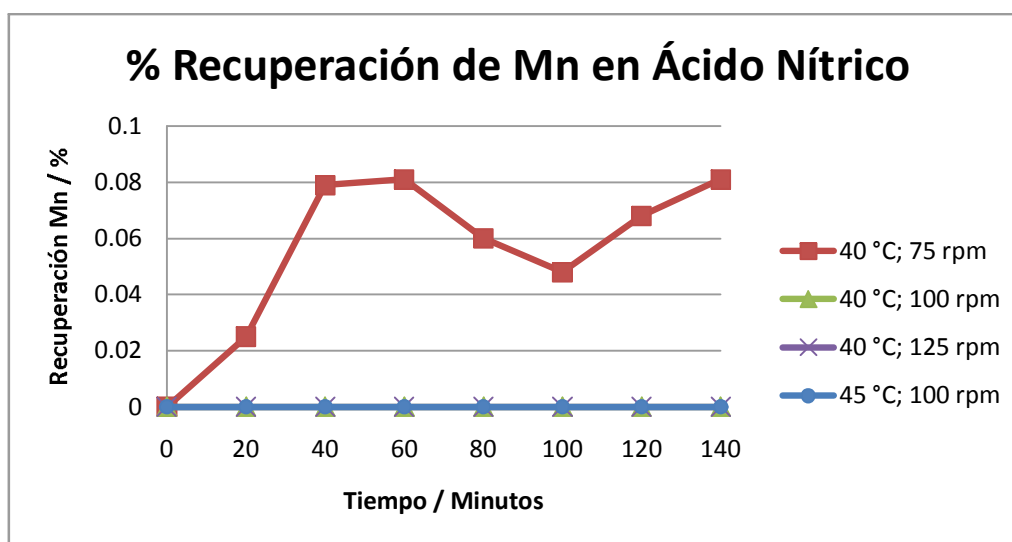


Figura 78. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido nítrico

En este medio la recuperación de Mn es nula, solo a 40 °C y 75 rpm se encuentra una recuperación baja y la tendencia es irregular debido a los errores de medición.

3.5.3 Ácido Cítrico

El ácido cítrico es un ácido orgánico fuerte, como se mencionó anteriormente los ácidos orgánicos por más fuertes que sean, como el ácido cítrico, son más débiles que los ácidos minerales y esto se debe a la presencia de Carbono en su composición. Los ácidos orgánicos se obtienen en la naturaleza, el ácido cítrico está presente

principalmente en algunos frutos como la naranja y se utiliza principalmente como conservante y antioxidante natural en el envasado de alimentos.

3.5.3.1 Recuperación de Cu

Se muestran los porcentajes de recuperación de Cu en ácido cítrico a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 79; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 80; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 81; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 82.

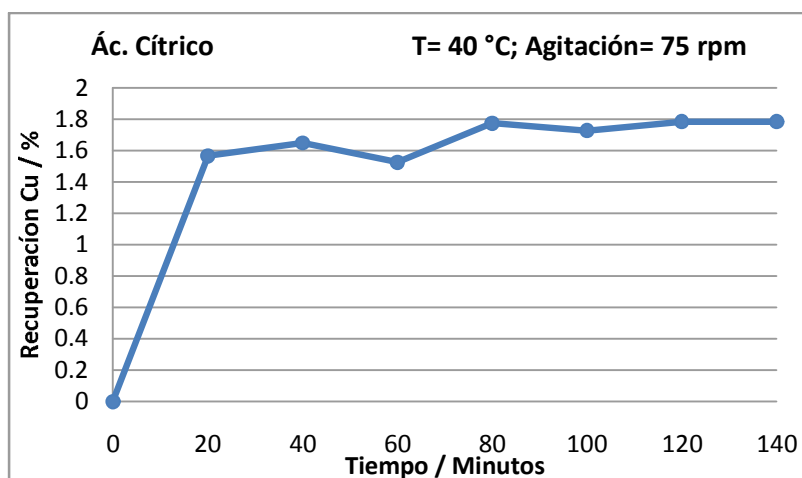


Figura 79. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm

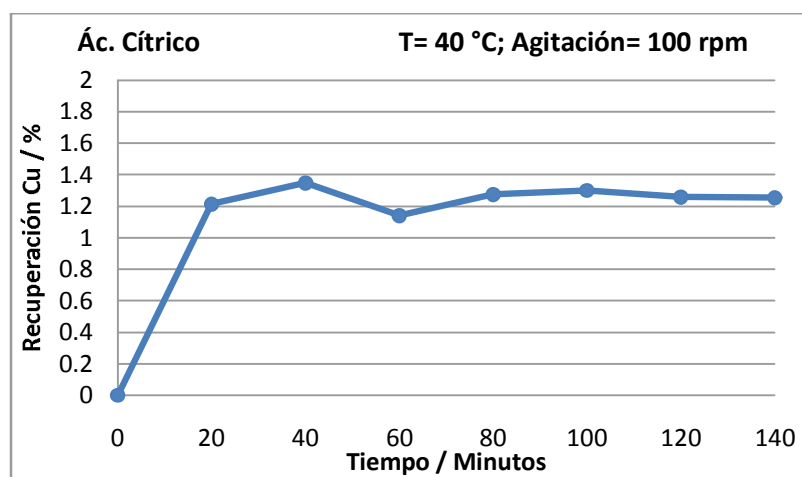


Figura 80. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 40 °C y 100 rpm

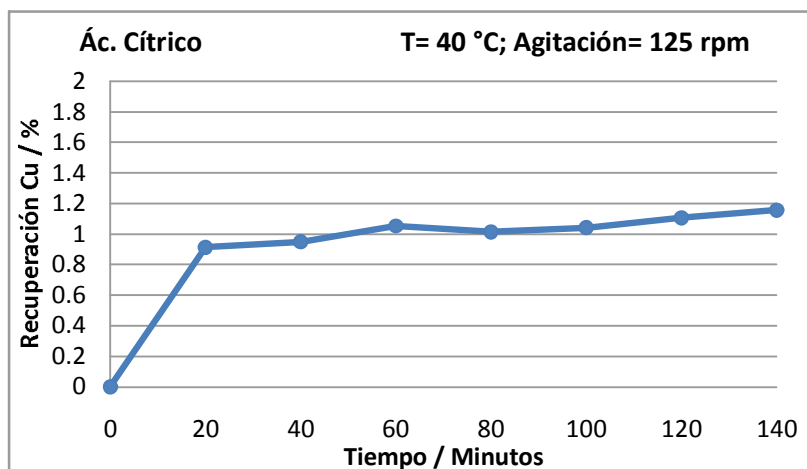


Figura 81. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 40 °C y 125 rpm

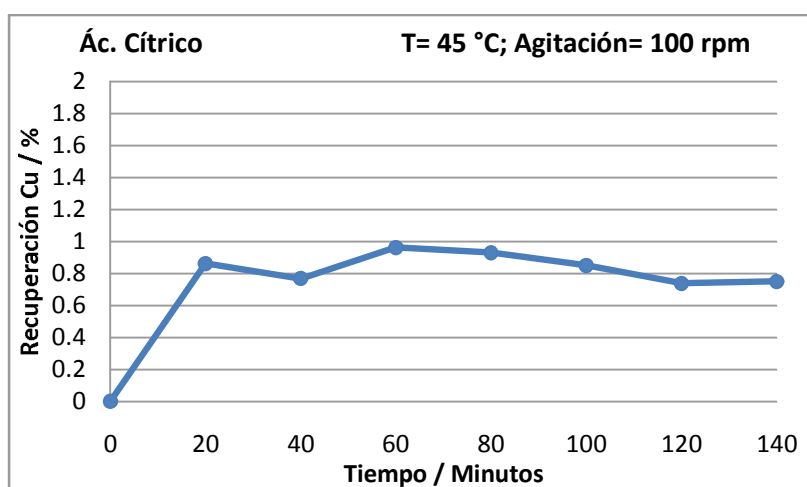


Figura 82. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 83 se muestra la comparación de la recuperación de Cu en ácido cítrico a todas las condiciones.

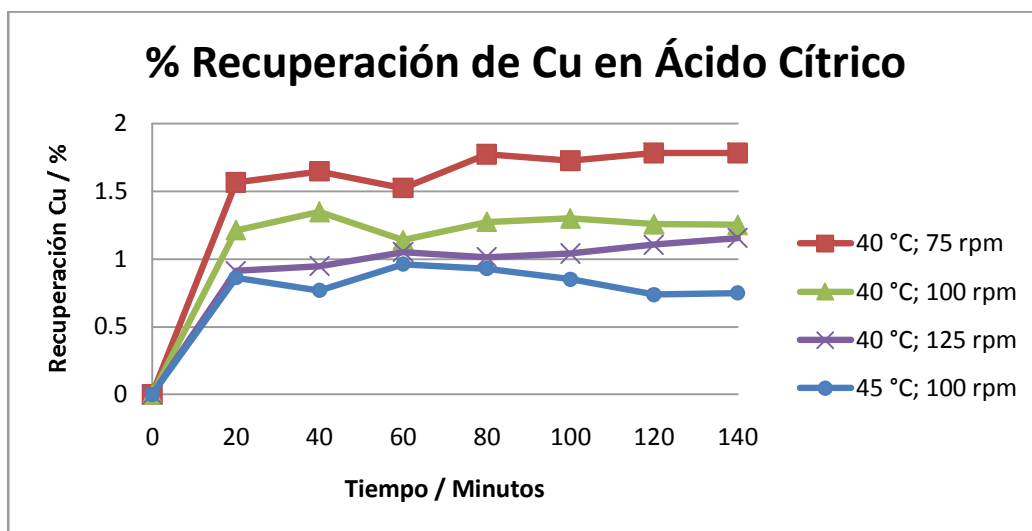


Figura 83. Porcentaje de recuperación de Cu en ácido cítrico

Para la recuperación de Cu en ácido cítrico se nota que la mayor recuperación es después de 20 minutos. Para 40 °C y 75 rpm, y 40 °C y 100 rpm el punto más bajo se encuentra a 40 minutos, para la primera condición después de este punto se empieza una recuperación en aumento hasta 140 minutos donde se encuentra la recuperación máxima de Cu para este medio. A 40 °C y 125 rpm se muestra un sistema donde la recuperación va en aumento donde el punto máximo es en 140 minutos.

3.5.3.2 Recuperación de Li

Se muestran los porcentajes de recuperación de Li en ácido cítrico a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 84; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 85; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 86; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 87.

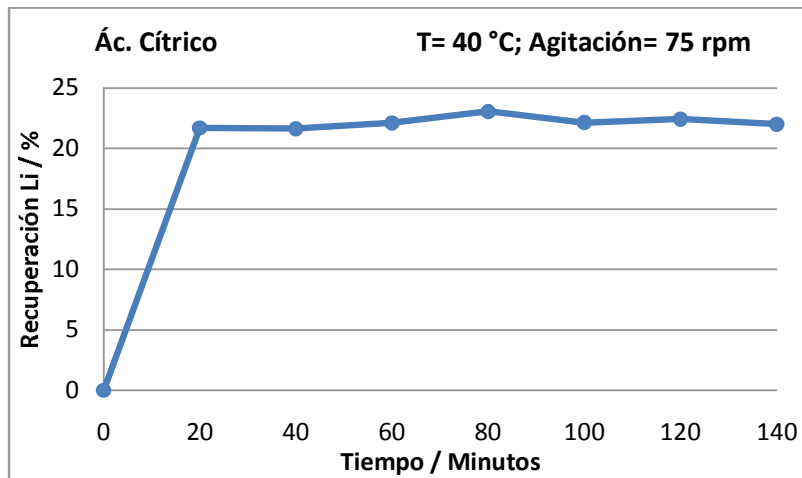


Figura 84. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm

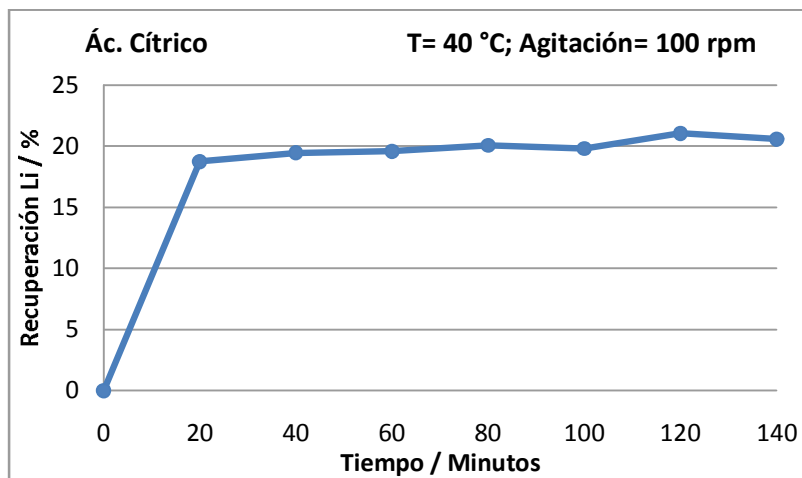


Figura 85. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 40 °C y 100 rpm

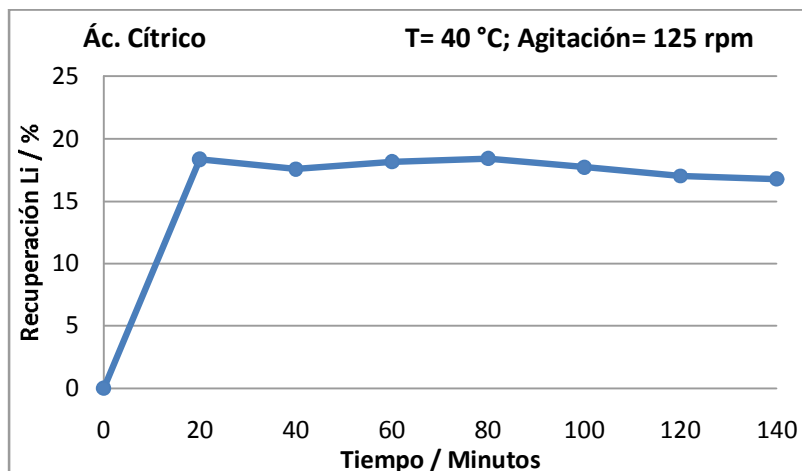


Figura 86. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 40 °C y 125 rpm

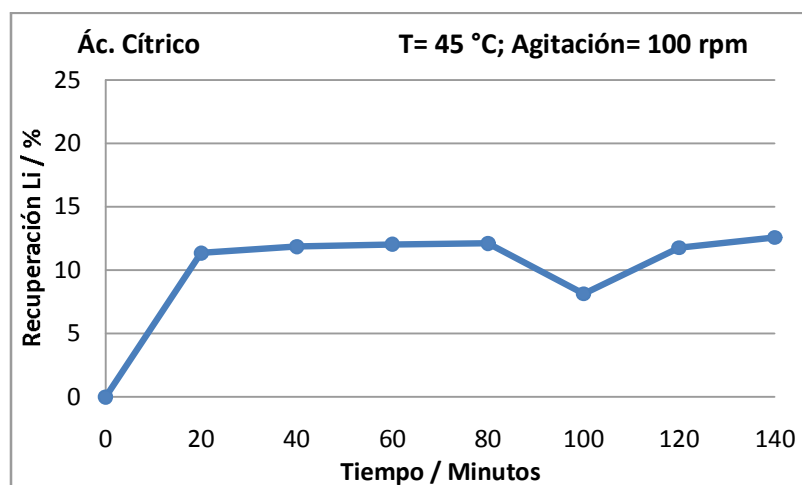


Figura 87. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 88 se muestra la comparación de la recuperación de Li en ácido cítrico a todas las condiciones.

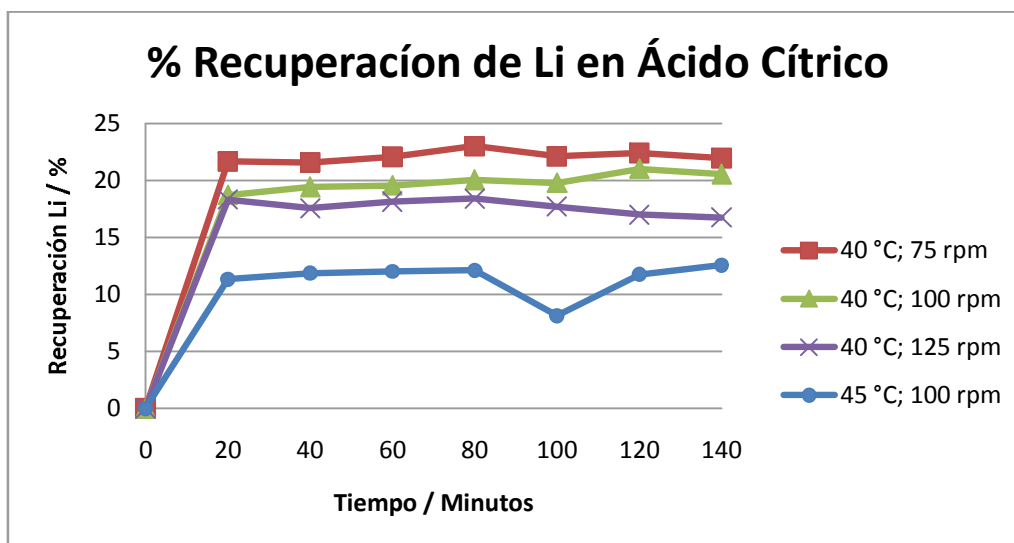


Figura 88. Porcentaje de recuperación de Li en ácido cítrico

Para la recuperación de Li en este medio se presentan tendencias similares que son constantes, a excepción del minuto 100 a 45 °C y 100 rpm donde se muestra una diferencia peculiar al haber un punto mínimo. Para este medio las condiciones más apropiadas para la recuperación de Li son a 40 °C y 75 rpm.

3.5.3.3 Recuperación de Mn

Se muestran los porcentajes de recuperación de Mn en ácido cítrico a las condiciones de T=40 °C y 75 rpm en la Figura 89; T=40 °C y 100 rpm en la Figura 90; T=40 °C y 125 rpm en la Figura 91; T=45 °C y 100 rpm en la Figura 92.

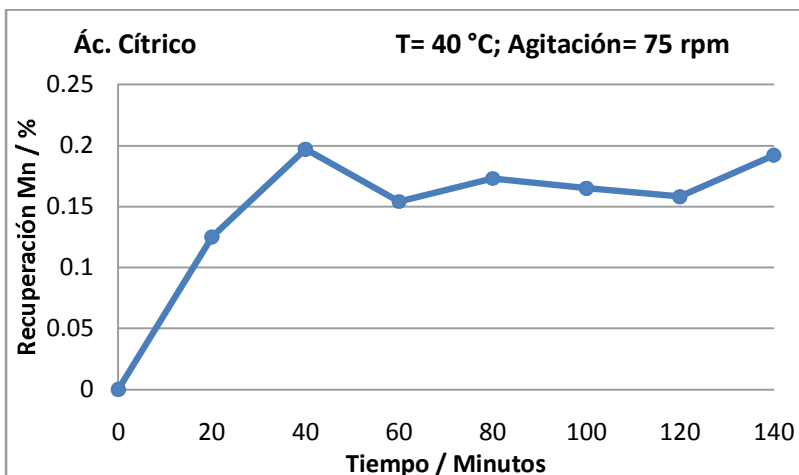


Figura 89. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm

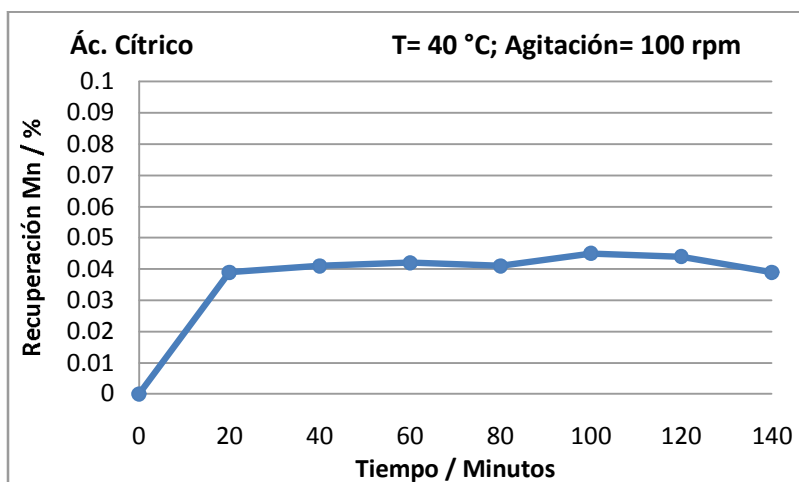


Figura 90. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 40 °C y 100 rpm

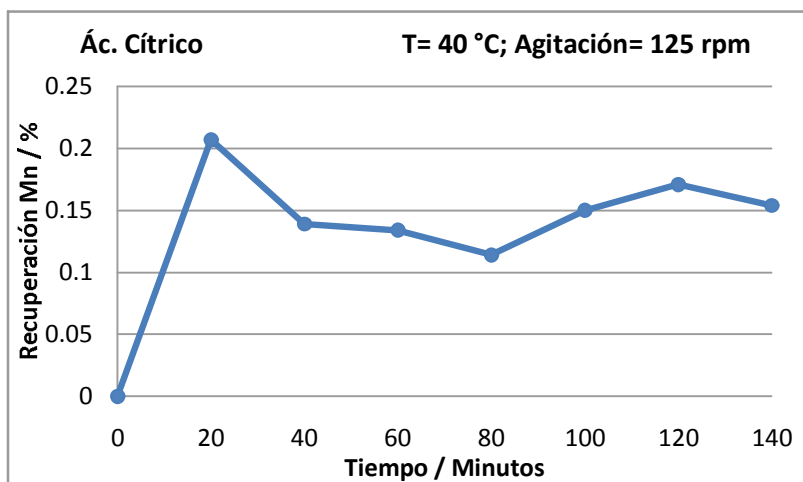


Figura 91. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 40 °C y 125 rpm

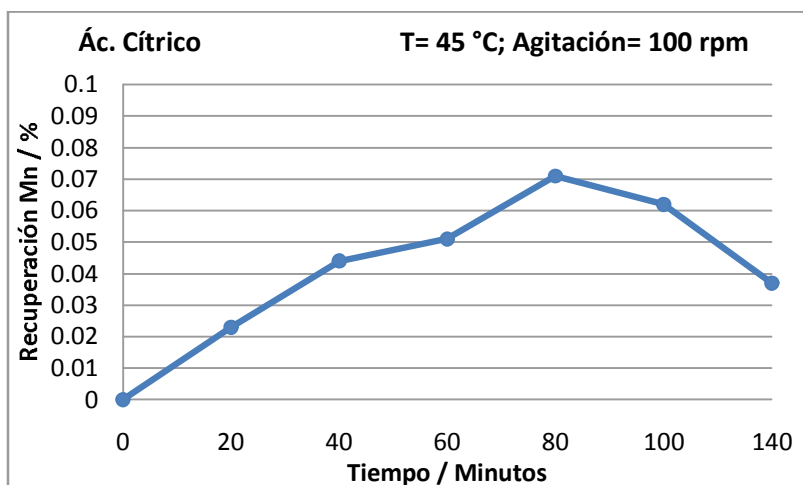


Figura 92. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico a 45 °C y 100 rpm

En la Figura 93 se muestra la comparación de la recuperación de Mn en ácido cítrico a todas las condiciones.

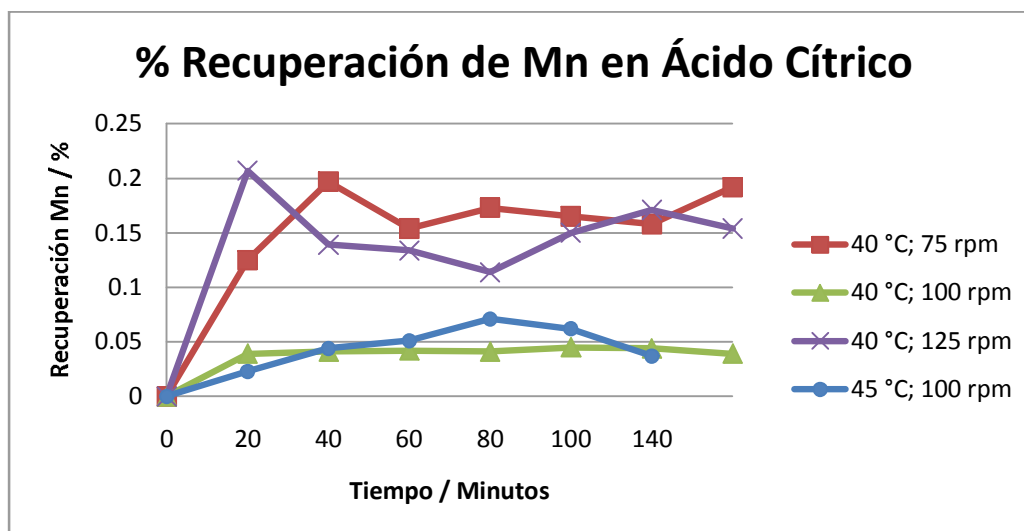


Figura 93. Porcentaje de recuperación de Mn en ácido nítrico

Como se han observado en todos los medios la recuperación de Mn no es muy elevada, es por ello que en todos los medios se observan tendencias irregulares, ya que los sistemas para este elemento pueden verse afectados por los errores de medición, como es el caso del porcentaje de recuperación de Mn en ácido cítrico.

La mayor recuperación de Mn en este medio se encuentra a 40 °C y 125 rpm.

3.6 Porcentajes de porcentajes más altos obtenidos en cada uno de los medios lixiviantes.

Se hace una comparación de los porcentajes más altos de recuperación de cada elemento en cada uno de los medios a todas las condiciones. En la Tabla XII se muestran los porcentajes de recuperación más altos de Cu, Li y Mn en cada uno de los medios lixiviantes a 40 °C y 75 rpm.

Tabla XII. Porcentajes de recuperación más altos a 40 °C y 75 rpm

	Biolixiviación	ác. Acético	ác. Nítrico	ác. Cítrico
Cu	3.809	0.508	0.46	1.784
Li	17.266	19.103	15.656	23.04
Mn	0.519	0.18	0.081	0.197

Se muestra que a 40 °C y 75 rpm la biolixiviación es el medio más lixivante seguido del ácido cítrico. La biolixiviación favorece la recuperación de Cu encontrándose una recuperación dos veces mayor que en ácido cítrico. El Mn tiene una recuperación casi tres veces mayor en la biolixiviación que en ácido cítrico. El Li, en cambio, presenta un 25% más de recuperación en ácido cítrico que en la biolixiviación.

En la Tabla XIII se muestran los porcentajes de recuperación más altos de Cu, Li y Mn en cada uno de los medios lixiviantes a 40 °C y 100 rpm.

Tabla XIII. Porcentajes de recuperación más altos a 40 °C y 100 rpm.

	Biolixiviación	ác. Acético	ác. Nítrico	ác. Cítrico
Cu	4.495	0.618	0.592	1.348
Li	17.44	19.303	10.623	21.047
Mn	0.465	0.111	0	0.045

Se muestra que a 40 °C y 100 rpm la biolixiviación es el medio más lixivante para Cu y Mn, el ácido cítrico es el mejor lixivante para el Li. La biolixiviación favorece la recuperación de Cu encontrándose una recuperación hasta tres veces mayor que en ácido cítrico. El Li, presenta un 8% más de recuperación en ácido cítrico que en ácido acético. El Mn tiene una recuperación cuatro veces mayor en la biolixiviación que en ácido acético.

En la Tabla XIV se muestran los porcentajes de recuperación más altos de Cu, Li y Mn en cada uno de los medios lixiviantes a 40 °C y 125 rpm.

Tabla XIV. Porcentajes de recuperación más altos a 40 °C y 125 rpm.

	Biolixiviación	ác. Acético	ác. Nítrico	ác. Cítrico
Cu	3.148	0.477	0.415	1.157
Li	13.929	21.831	17.4	18.422
Mn	0.414	0.211	0	0.207

Se muestra que a 40 °C y 125 rpm la biolixiviación es el medio más lixivante para Cu y Mn, el ácido acético es el mejor lixivante para el Li. La biolixiviación favorece la recuperación de Cu encontrándose una recuperación casi tres veces mayor que en ácido cítrico. El Li, presenta casi un 16% más de recuperación en ácido acético que en ácido cítrico. El Mn tiene una recuperación casi dos veces mayor en la biolixiviación que en ácido acético, se observa también que el ácido nítrico no tiene la capacidad de lixiviar este elemento.

En la Tabla XV se muestran los porcentajes de recuperación más altos de Cu, Li y Mn en cada uno de los medios lixiviantes a 45 °C y 100 rpm.

Tabla XV. Porcentajes de recuperación más altos a 45 °C y 100 rpm.

	Biolixiviación	ác. Acético	ác. Nítrico	ác. Cítrico
Cu	10.968	0.528	0.438	0.963
Li	15.184	13.787	20.1	12.583
Mn	1.187	0	0	0.071

Se muestra que a 45 °C y 100 rpm la biolixiviación es el medio más lixivante para Cu y Mn, el ácido nítrico es el mejor lixivante para el Li. La biolixiviación favorece la recuperación de Cu encontrándose una recuperación diez veces mayor que en ácido cítrico. El Li, presenta casi un 25% más de recuperación en ácido nítrico que en la biolixiviación. El Mn tiene una recuperación dieciséis veces mayor en la biolixiviación que en ácido cítrico, se observa también que el ácido acético y el ácido nítrico no tienen

la capacidad de lixiviar este elemento, sin embargo a estas condiciones la biolixiviación presenta la mayor recuperación de Mn.

En la Tabla XVI se muestran los porcentajes de recuperación más altos de Cu, Li y Mn en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación.

Tabla XVI. Porcentajes de recuperación más altos a temperatura ambiente y sin agitación.

	Biolixiviación
Cu	3.658
Li	17.674
Mn	0.46

Esta tabla se presenta únicamente para la biolixiviación puesto que estas condiciones únicamente se experimentaron en este medio. Se observan buenas recuperaciones, teniendo incluso la mayor recuperación de Li para este medio.

El porcentaje de recuperación de Cu más alto es de 10.96%, se encontró en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm, siendo 6 veces mayor la recuperación que en otros medios. Para el litio, el porcentaje de recuperación más alto es 23.04% y se encontró en la lixiviación convencional con ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm, habiendo un 25% más de recuperación que en otros medios. Para el manganeso, el porcentaje de recuperación más alto es 1.18% y se encontró en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm, siendo 5 veces mayor la recuperación que en otros medios.

El ácido cítrico es el medio que más lixivia después de la biolixiviación lo que quiere decir que los ácidos orgánicos favorecen la lixiviación. Se observa que, para ninguna condición, las mayores recuperaciones de Li son en la biolixiviación sin embargo su recuperación no se ve por mucho más favorecido en otros medios. Por otro lado se observa que el único medio capaz de recuperar Mn es la biolixiviación.

CONCLUSIONES

Se puede observar que el Li presenta una buena recuperación en todos los medios y a todas las condiciones, sin embargo la mayor recuperación para este elemento se encontró en ácido cítrico a 40 °C y 75 rpm con 23.04% de recuperación. El Cu a diferencia del Li únicamente presenta una buena recuperación en la biolixiviación, y se ve mayormente favorecida a 45 °C y 100 rpm con una recuperación máxima de 10.968%. Para el Mn, a pesar de que la biolixiviación favorece ligeramente su recuperación a 45 °C y 100 rpm con una recuperación máxima de 1.187%, en ninguno de los medios el porcentaje de recuperación es alto, siendo incluso inexistente para algunos sistemas. Esto sucede porque el Mn es un elemento termodinámicamente más estable que el Li y el Cu.

Cabe resaltar que al día 3 el pH tiene una variación notable, el porcentaje de azúcar presenta el mismo efecto ya que al día 3 presenta una gran disminución, y en cuanto a la recuperación se presenta que al día 3 se lixivian notablemente los metales, y posteriormente su recuperación es constante. Esto se debe a que, hasta el día 3 el hongo consume todo el azúcar posible para crecer y en los días posteriores se dedica únicamente a su supervivencia.

La agitación y el aumento de temperatura favorecen más la recuperación de estos metales a diferencia de donde se maneja una temperatura más baja, esto se debe a que el hongo crece más a esta temperatura y se multiplica rápidamente, y en cuanto a la agitación se debe a que, como un ser vivo, la bacteria también respira y a estas rpm el oxígeno entra y se mueve de una manera conveniente para la bacteria, es decir, las condiciones que promueven mayormente la supervivencia del hongo son a 45 °C y 100 rpm.

El porcentaje de recuperación de litio más alto fue de 23.04% y se encontró en la lixiviación convencional con ácido cítrico, habiendo un 25% más de recuperación que en otros medios. El porcentaje de recuperación de cobre más alto encontrado fue de

10.96%, siendo 6 veces mayor la recuperación que en otros medios. Para el manganeso, el porcentaje de recuperación más alto fue 1.18%, siendo 5 veces mayor la recuperación que en otros medios. A pesar de que la biolixiviación es el medio donde se encuentran las recuperaciones más altas, el ácido cítrico es un medio lixiviante que presenta recuperaciones exitosas, esto probablemente se deba a que el ácido que secreta el hongo sea ácido cítrico o muy parecido a este. El ácido nítrico y el ácido acético, ya que son un ácido mineral y un ácido débil respectivamente, únicamente presentan un valor alto de recuperación cada uno pero en general no tienen porcentajes de recuperación muy exitosos, así que podemos concluir que los ácidos orgánicos tienen una capacidad de lixiviación mayor que los inorgánicos.

En la biolixiviación se establece un pH inicial, sin embargo es un parámetro que para este experimento no se puede controlar pero se puede medir, se encontraron pH's de entre 7.98 y 5.79, por ello se estableció un pH entre 5 y 6 como base para la lixiviación convencional, es decir, las condiciones no fueron tan ácidas, son más bien casi neutras. A pesar de esto se presentan buenas recuperaciones.

En la muestra 1, que duró 366 días en biolixiviación, se pueden observar claramente que la recuperación aumenta conforme aumenta el tiempo, habiendo recuperaciones muy buenas de más de 60% para Cu, hasta el 99% para Li y casi 18% de Mn, como se estableció anteriormente esto se debe probablemente a que el hongo va creciendo.

Propuestas a futuro

Los resultados muestran resultados exitosos en la biolixiviación pero a nivel laboratorio, por lo que se propone que este proyecto sea probado a nivel industrial ya que es un proceso más barato que los que se utilizan actualmente y sobre todo, como es un proceso orgánico, es un proceso amigable con el medio ambiente y la contaminación que genera no es tan alta como los procesos actuales de lixiviación. Se nota que en la biolixiviación la mayor recuperación de Li es a temperatura ambiente y sin agitación lo que confirma que la biolixiviación puede ser un proceso biotecnológico aplicable a la industria sin la utilización de mayores energéticos.

Se propone la realización de estudios que ayuden al medio ambiente, trabajos posteriores que analicen y/o comparen procesos orgánicos a cualquier desecho inorgánico con el fin de reciclar objetos y así recuperar metales valor y evitar contaminación y daños al ambiente.

Únicamente se trabajó con la batería de celular, investigaciones futuras deberían realizar experimentos con la composición interna de todo el celular y lixiviar otros metales presentes en ésta, e incluso deberían realizarse experimentaciones con otros objetos tecnológicos que se desechan continuamente y que su composición química puede ser toxica debido a que contienen metales valor.

Este trabajo realizó una investigación muy específica, es por ello que se propone experimentar cambiando algunas variables como un probar una temperatura más alta para investigar el comportamiento del hongo y la capacidad de lixiviación en cada uno de los medios. Realizar la experimentación con pH más bajo para comprobar si es mejor la lixiviación de baterías de celular en medios más ácidos. Estudiar en futuras investigaciones otros hongos con el fin de comparar su capacidad de lixiviación en un batería de celular. El tiempo es un gran factor que debería estudiarse más, para saber si se pueden obtener mejores recuperaciones o la lixiviación ya no es factible debido a la vida del hongo

REFERENCIAS

1. Garcés Millas Ingrid, “**La Industria del Litio en Chile**”
<http://www.uantof.cl/salares/Litio%20y%20derivados.pdf>, Agosto 2014
2. Litio <http://www.acienciasgalilei.com/qui/elementos/li.htm>, Agosto 2014
3. Bastian Peter, “**Electrotecnia**”, Pág. 519, Ediciones AKAL, España 2001
4. Biswas A. K. y Davenport W. G., “**El cobre Metalurgia extractiva**”, Editorial Limusa, México 1993.
5. Askeland Donald R., “**Ciencia e ingeniería de los materiales**” tercera edición, Pág. 380, International Thomson Editores.
6. Thénard L.F., “**Tratado de química**”, Pág. 306, Imprenta de Busseuil y compañía.
7. Nordberg Gunnar, “**Metales: Propiedades químicas y toxicidad**”
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/63.pdf>, Septiembre 2014
8. Román Ortega Francisco, “**Diccionario de medio ambiente y materias afines**”, Pág. 146, FC Editorial, 1999.
9. Castillo Guillermo y Villafaña Claudia, “**Recuperación de Ni y co de laterita ferruginosa del estado de Cojedes a través de la biolixiviación con cultivos de *Aspergillus niger***”
<http://saber.ucv.ve/xmlui/bitstream/123456789/1424/1/Trabajo%20Especial%20de%20Grado.pdf>, Agosto 2014
10. Ballester A., Gonzalez F., y Blazquez M., “**Biolixiviación de menas naturales. Posibilidades actuales de utilización**”
<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/biohidro/Publicaciones%20del%20Grupo/Revista%20Metalurgia%201988,24,91.pdf>, Agosto 2014
11. Cantoni Norma, “**Reciclado, una solución al problema de la basura**”, Editorial Albatros, 2010.
12. El reciclaje <http://elreciclae.org/>, Agosto 2014
13. Manganeso <http://www.matweb.com/>, Septiembre 2014

14. Useche Y., Peña Venegas C., Cardona Vanegas G.. 2007. "***Aspergillus niger Tiegh (1867)***".
<http://www.siac.net.co/sib/catalogoespecies/especie.do?idBuscar=546&method=displayAAT>, Agosto 2014
15. Cuacas Gutiérrez Socorro Catalina, "**Biolixiviación de catalizadores industriales para la recuperación de níquel**"
16. Curso de celulares, <http://www.cursodecelulares.com/Baterias.pdf>, Septiembre 2014
17. Tecnología de las baterías,
<http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>, Septiembre 2014
18. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, y Área metropolitana del valle de Aburrá, "**Producción más limpia y buenas prácticas ambientales - fabricación y reciclaje de baterías**"
http://www.metropol.gov.co/ProduccionLimpia/Documents/CI%C3%BAster%20Transporte/Manual_PL_Fabricacion_Reciclaje_Baterias.pdf, Septiembre 2014
19. "**Manejo responsable de pilas y celulares usados**",
http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/biblioteca_/articulopilascalulares_12jun2008.pdf, Agosto 2014
20. SITRASA, "**Reciclaje de baterías en México**",
<http://www.recolectoresderesiduos.com.mx/pdf/8vo-foro/RECICLAJE-BATERIAS.pdf>, Agosto 2014
21. "**Diccionario de química**", Editorial Complutense, 1999.
22. Himkamp David L., "**Guía de productos químicos. Propiedades de los ácidos inorgánicos. Propiedades de los ácidos y anhídridos orgánicos.**"
http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo4/104_02.pdf, Octubre 2014
23. De Paula Mellado Francisco, "**Enciclopedia moderna: diccionario universal de literatura, ciencias, artes, agricultura, industria y comercio, Volumen 1**", Establecimiento

24. Michael T. Madigan, John M. Martinko, Jack Parker, “**Biología de los Microorganismos**”, octava edición, Prentice hall, España 1998

ANEXOS

A. Medición de pH

Tabla XVII. Valores de pH en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm

Día	Muestra 1.1	Muestra 1.2	Muestra 1.3	Promedio	Desv. Estándar
0	6.5	6.5	6.5	6.5	0
3	7.37	7.44	5.38	6.73	0.955
6	6.88	7.56	5.96	6.8	0.655
9	6.32	4.97	6.1	5.796	0.591
12	6.77	6.25	6.74	6.586	0.238
15	6.74	6.2	6.59	6.51	0.227
18	7.84	7.35	7.13	7.44	0.296
21	8	7.48	7.31	7.596	0.293

Tabla XVIII. Valores de pH en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación

Día	Muestra 1.4	Muestra 1.5	Muestra 1.6	Promedio	Desv. Estándar
0	6.5	6.5	6.5	6.5	0
3	7.28	7.57	7.81	7.553	0.216
6	7.35	7.4	7.68	7.476	0.145
9	7.08	7.27	7.61	7.32	0.219
12	6.98	7.3	7.49	7.256	0.210
15	6.97	7.26	7.44	7.223	0.193
18	6.93	7.49	7.31	7.243	0.233
21	7.53	7.6	7.26	7.463	0.146

Tabla XIX. Valores de pH en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm

Día	Muestra 2.1	Muestra 2.2	Muestra 2.3	Promedio	Desv. Estándar
0	6.5	6.5	6.5	6.5	0
3	6.8	6.96	7.66	7.14	0.373
6	7.49	7.59	7.85	7.643	0.151
9	7.7	7.9	7.95	7.85	0.108
12	7.92	7.93	8.09	7.98	0.077
15	5.79	7.92	6.02	6.576	0.954
18	7.29	7.96	6.92	7.39	0.430
21	7.13	7.85	7.15	7.376	0.334

Tabla XX. Valores de pH en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm

Día	Muestra 3.1	Muestra 3.2	Muestra 3.3	Promedio	Desv. Estándar
0	6.5	6.5	6.5	6.5	0
3	7.29	7.75	7.82	7.62	0.235
6	7.31	7.82	7.87	7.666	0.253
9	7.52	7.85	7.89	7.753	0.165
12	7.55	7.83	7.9	7.76	0.151
15	7.65	7.89	7.86	7.8	0.106
18	7.75	7.86	7.92	7.843	0.070
21	7.75	7.84	7.89	7.826	0.057

Tabla XXI. Valores de pH en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm

Día	Muestra 4.1	Muestra 4.2	Muestra 4.3	Promedio	Desv. Estándar
0	6.5	6.5	6.5	6.5	0
3	5.48	6.23	6.31	6.006	0.373
6	5.8	6.1	6.24	6.046	0.183
9	5.6	6.73	6.26	6.196	0.463
12	5.61	6.47	6.16	6.08	0.355
15	5.68	6.28	6.08	6.013	0.249
18	5.46	6.15	6.06	5.89	0.306
21	5.69	6.13	6.06	5.96	0.193

Tabla XXII. Valores de pH en la biolixiviación para la muestra 1

Día	Muestra 1
0	6.5
35	7.69
46	7.64
65	7.46
75	7.3
112	7.29
122	7.3
132	7.26
142	7.29
152	7.2

B. Medición de azúcar

Tabla XXIII. Valores de azúcar a 40 °C y 75 rpm

Día	Muestra 1.1	Muestra 1.2	Muestra 1.3	Promedio	Desv. Estándar
0	10	10	10	10	0
3	4.375	1.2	1.6	2.391	1.411
6	1.4	3.75	3.75	2.966	1.107
9	3.875	3.875	1.2	2.983	1.261
12	1.2	1.2	1.4	1.266	0.094
15	1.2	4	4	3.066	1.319
18	4	3.38	1.4	2.926	1.108
21	1.6	4.06	1.4	2.353	1.209

Tabla XXIV. Valores de azúcar a temperatura ambiente y sin agitación

Día	Muestra 1.4	Muestra 1.5	Muestra 1.6	Promedio	Desv. Estándar
0	10	10	10	10	0
3	1.2	1.2	1.2	1.2	0
6	3.875	4.125	1.2	3.066	1.323
9	3.875	3.75	1.2	2.941	1.232
12	4	3.75	1.4	3.05	1.171
15	3.75	1.2	3.875	2.941	1.232
18	4	1.4	1.2	2.2	1.275
21	1.4	1.2	4	2.2	1.275

Tabla XXV. Valores de azúcar a 40 °C y 100 rpm

Día	Muestra 2.1	Muestra 2.2	Muestra 2.3	Promedio	Desv. Estándar
0	10	10	10	10	0
3	1.6	4.125	1.2	2.308	1.294
6	1.6	3.875	1.2	2.225	1.178
9	1.4	4.25	1.6	2.416	1.298
12	4.25	4	1.4	3.216	1.288
15	1	4.25	1	2.083	1.532
18	3.875	3.625	1.4	2.966	1.112
21	3.875	4.06	4.25	4.061	0.153

Tabla XXVI. Valores de azúcar a 40 °C y 125 rpm

Día	Muestra 3.1	Muestra 3.2	Muestra 3.3	Promedio	Desv. Estándar
0	10	10	10	10	0
3	1.2	1.4	1.2	1.266	0.094
6	1.4	1.4	1.2	1.333	0.094
9	1.4	1.6	1.2	1.4	0.163
12	1.4	1.6	1.2	1.4	0.163
15	3.875	1.2	1.2	2.091	1.261
18	1.2	1.2	1.2	1.2	0
21	1.6	1.4	1	1.333	0.249

Tabla XXVII. Valores de azúcar a 45 °C y 100 rpm

Día	Muestra 4.1	Muestra 4.2	Muestra 4.3	Promedio	Desv. Estándar
0	10	10	10	10	0
3	1.2	1.2	1.6	1.333	0.188
6	1.2	1.2	1.6	1.333	0.188
9	1.4	1	1.6	1.333	0.249
12	1.4	1.2	1.6	1.4	0.163
15	1.4	1.2	1.2	1.266	0.094
18	1.4	1.2	1.2	1.266	0.094
21	1.4	1.6	3.89	2.296	1.129

Tabla XXVIII. Valores de azúcar para la muestra 1

Día	Muestra 1
0	10
35	1.4
46	1.2
65	1.2
75	1.6
112	1.6
122	2
132	1.8
142	2
152	2

C. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación

Tabla XXIX. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm

Día	Muestra 1.1	Muestra 1.2	Muestra 1.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	3.071	3.776	6.119	3.423	0.352
6	3.315	2.826	3.322	3.318	0.003
9	2.844	3.616	3.635	3.625	0.009
12	4.315	3.821	3.798	3.809	0.011
15	3.911	2.838	2.985	3.244	0.474
18	2.593	7.508	3.337	2.965	0.372
21	3.523	3.9	3.315	3.579	0.242

Tabla XXX. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación

Día	Muestra 1.4	Muestra 1.5	Muestra 1.6	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	3.309	3.489	3.158	3.318	0.135
6	2.476	3.432	5.068	3.658	1.070
9	2.636	2.991	3.658	3.095	0.423
12	2.905	2.721	3.354	2.993	0.265
15	2.219	3.135	2.09	2.481	0.465
18	2.678	6.67	3.877	3.277	0.599
21	3.636	3.27	2.709	3.205	0.381

Tabla XXXI. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm

Día	Muestra 2.1	Muestra 2.2	Muestra 2.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	5.934	3.929	3.793	3.861	0.068
6	2.652	2.298	3.607	2.852	0.552
9	2.483	2.231	2.556	2.423	0.139
12	1.753	1.992	2.523	2.089	0.321
15	5.608	2.249	5.63	4.495	1.588
18	3.757	1.612	2.556	2.641	0.877
21	3.249	5.745	2.544	3.846	1.373

Tabla XXXII. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm

Día	Muestra 3.1	Muestra 3.2	Muestra 3.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	4.336	2.652	3.146	2.899	0.247
6	2.916	2.629	2.629	2.724	0.135
9	2.629	2.68	2.393	2.567	0.125
12	2.91	2.702	2.393	2.668	0.212
15	2.378	6.647	2.45	2.414	0.036
18	3.849	3.079	2.517	3.148	0.545
21	3.18	1.899	2.781	2.62	0.535

Tabla XXXIII. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm

Día	Muestra 4.1	Muestra 4.2	Muestra 4.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	2.91	3.242	4.169	3.440	0.532
6	6.226	3.956	6.08	6.153	0.073
9	6.316	3.416	7.029	6.672	0.356
12	4.815	3.618	8.395	6.605	1.79
15	5.832	6.687	9.159	7.226	1.410
18	6.906	5.535	15.65	9.363	4.480
21	7.479	7.355	18.071	10.968	5.022

Tabla XXXIV. Porcentajes de recuperación de Cu en la biolixiviación para la muestra 1

Día	Muestra 1
0	0
35	23.129
46	15.054
65	20.69
75	26.765
112	18.847
122	18.808
132	20.831
142	25.152
152	38.422
366	62.713

D. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación

Tabla XXXV. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm

Día	Muestra 1.1	Muestra 1.2	Muestra 1.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	16.024	16.865	16.001	16.296	0.401
6	15.104	15.299	13.867	14.756	0.634
9	14.429	14.03	14.29	14.249	0.165
12	18.078	15.802	15.104	15.453	0.349
15	17.912	13.667	14.791	15.456	1.795
18	15.407	16.78	15.935	16.040	0.565
21	18.427	16.972	16.4	17.266	0.853

Tabla XXXVI. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación

Día	Muestra 1.4	Muestra 1.5	Muestra 1.6	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	17.048	14.589	17.829	17.438	0.390
6	15.48	16.966	18.892	16.223	0.743
9	16.712	15.099	19.374	15.905	0.806
12	15.861	15.208	19.158	15.534	0.326
15	14.157	14.987	16.912	15.352	1.153
18	15.842	17.081	19.507	17.674	1.832
21	17.629	17.181	19.105	17.405	0.224

Tabla XXXVII. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm

Día	Muestra 2.1	Muestra 2.2	Muestra 2.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	18.095	16.785	13.924	17.44	0.655
6	15.752	15.77	13.425	15.761	0.009
9	14.904	15.28	13.725	14.636	0.662
12	13.885	15.135	13.209	14.076	0.797
15	19.756	16.422	15.419	15.920	0.501
18	13.16	15.861	13.957	14.326	1.133
21	13.939	18.014	13.848	13.893	0.045

Tabla XXXVIII. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm

Día	Muestra 3.1	Muestra 3.2	Muestra 3.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	14.672	14.854	12.262	13.929	1.181
6	14.29	15.353	12.03	13.891	1.385
9	14.522	15.17	12.046	13.912	1.346
12	14.074	15.519	11.947	13.846	1.467
15	13.413	15.619	12.03	13.687	1.477
18	14.19	15.004	12.08	13.758	1.232
21	15.07	14.123	12.03	13.741	1.270

Tabla XXXIX. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm

Día	Muestra 4.1	Muestra 4.2	Muestra 4.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	11.448	12.827	17.829	12.137	0.689
6	11.814	13.758	20.637	12.786	0.972
9	12.046	13.858	18.892	12.952	0.906
12	12.595	13.974	20.487	13.284	0.689
15	12.193	14.422	20.936	13.307	1.114
18	14.8	15.569	22.415	15.184	0.384
21	13.974	15.984	24.98	14.979	1.005

Tabla XL. Porcentajes de recuperación de Li en la biolixiviación para la muestra 1

Día	Muestra 1
0	0
35	35.143
46	36.854
65	39.048
75	40.394
112	55.083
122	65.302
132	70.453
142	75.438
152	88.814
366	98.557

E. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación

Tabla XLI. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 40 °C y 75 rpm

Día	Muestra 1.1	Muestra 1.2	Muestra 1.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	0.367	0.569	0.442	0.459	0.083
6	0.268	0.142	0.177	0.195	0.053
9	0.361	0.312	0.249	0.307	0.045
12	0.46	0.422	0.676	0.519	0.111
15	0.45	0.332	0.236	0.339	0.087
18	0.238	0.377	0.22	0.278	0.070
21	0.303	0.637	0.292	0.410	0.160

Tabla XLII. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a temperatura ambiente y sin agitación

Día	Muestra 1.4	Muestra 1.5	Muestra 1.6	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	0.379	0.26	0.296	0.311	0.049
6	0.302	1.273	0.256	0.279	0.023
9	0.391	0.269	0.485	0.381	0.088
12	0.338	0.277	0.502	0.372	0.095
15	0.388	0.558	0.279	0.408	0.114
18	0.232	0.371	0.392	0.331	0.070
21	0.428	0.362	0.592	0.460	0.096

Tabla XLIII. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 40 °C y 100 rpm

Día	Muestra 2.1	Muestra 2.2	Muestra 2.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	1.094	0.366	0.211	0.288	0.077
6	0.04	0	0.004	0.014	0.017
9	0.003	0.059	0.01	0.024	0.024
12	0	0.066	0.005	0.023	0.030
15	0.847	0	0.548	0.465	0.350
18	0	0.033	0.001	0.011	0.015
21	0.084	0.114	0.032	0.076	0.033

Tabla XLIV. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 40 °C y 125 rpm

Día	Muestra 3.1	Muestra 3.2	Muestra 3.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	0.518	0.143	0.319	0.326	0.153
6	0.013	0.164	0.242	0.139	0.095
9	0.263	0.206	0.295	0.254	0.036
12	0.19	0.185	0.244	0.206	0.026
15	0.062	0.929	0.252	0.414	0.372
18	0.17	0.198	0.245	0.204	0.030
21	0.179	0.175	0.266	0.206	0.041

Tabla XLV. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación a 45 °C y 100 rpm

Día	Muestra 4.1	Muestra 4.2	Muestra 4.3	Promedio	Desv. Estándar
0	0	0	0	0	0
3	0.057	0.098	0.162	0.105	0.043
6	0.049	0.125	0.305	0.159	0.107
9	0.088	0.251	0.512	0.283	0.174
12	0.071	0.275	0.726	0.421	0.281
15	0.151	0.467	0.8	0.472	0.264
18	0.275	0.611	1.883	0.923	0.692
21	0.326	0.69	2.545	1.187	0.971

Tabla XLVI. Porcentajes de recuperación de Mn en la biolixiviación para la muestra 1

Día	Muestra 1
0	0
35	0.788
46	1.216
65	2.235
75	3.7
112	10.14
122	12.394
132	15.031
142	15.806
152	16.98
366	12.168

F. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido acético

Tabla XLVII. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido acético

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	0.508	0.609	0.438	0.528
40	0.325	0.477	0.421	0.39
60	0.48	0.536	0.339	0.435
80	0.351	0.584	0.443	0.441
100	0.41	0.469	0.424	0.466
120	0.457	0.618	0.477	0.5
140	0.432	0.573	0.314	0.528

G. Porcentajes de recuperación de Li en ácido acético

Tabla XLVIII. Porcentajes de recuperación de Li en ácido acético

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	18.638	17.317	17.077	12.982
40	11.894	17.093	21.831	12.757
60	18.389	17.55	15.125	12.757
80	18.04	17.766	16.13	12.782
100	17.01	17.683	16.213	13.248
120	16.902	17.758	16.395	13.488
140	19.103	19.303	15.773	13.787

H. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido acético

Tabla XLIX. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido acético

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	0.068	0.093	0.058	0
40	0.014	0.05	0.211	0
60	0.093	0.111	0	0
80	0.068	0.1	0.012	0
100	0.18	0.051	0.024	0
120	0.034	0.046	0.032	0
140	0.079	0.027	0	0

I. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido nítrico

Tabla L. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido nítrico

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	0.328	0.443	0.356	0.401
40	0.337	0.457	0.415	0.376
60	0.404	0.592	0.28	0.359
80	0.342	0.561	0.41	0.379
100	0.46	0.519	0.413	0.417
120	0.348	0.528	0.278	0.438
140	0.421	0.514	0.337	0.101

J. Porcentajes de recuperación de Li en ácido nítrico

Tabla LI. Porcentajes de recuperación de Li en ácido nítrico

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	14.651	10.249	15.939	18.489
40	14.859	10.274	17.4	19.444
60	15.274	10.515	16.744	19.859
80	15	10.623	17.052	20.1
100	15.656	10.149	16.703	18.804
120	15.133	10.249	15.731	19.71
140	15.208	8.006	16.886	19.992

K. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido nítrico

Tabla LII. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido nítrico

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	0.025	0	0	0
40	0.079	0	0	0
60	0.081	0	0	0
80	0.06	0	0	0
100	0.048	0	0	0
120	0.068	0	0	0
140	0.081	0	0	0

L. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido cítrico

Tabla LIII. Porcentajes de recuperación de Cu en ácido cítrico

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	1.567	1.213	0.913	0.862
40	1.649	1.348	0.949	0.769
60	1.525	1.14	1.053	0.963
80	1.775	1.275	1.014	0.93
100	1.727	1.3	1.042	0.851
120	1.784	1.258	1.107	0.738
140	1.784	1.253	1.157	0.75

M. Porcentajes de recuperación de Li en ácido cítrico

Tabla LIV. Porcentajes de recuperación de Li en ácido cítrico

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	21.686	18.729	18.356	11.345
40	21.612	19.452	17.583	11.869
60	22.102	19.585	18.165	12.043
80	23.04	20.067	18.422	12.118
100	22.135	19.801	17.724	8.139
120	22.426	21.047	17.027	11.777
140	21.994	20.573	16.778	12.583

N. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido cítrico

Tabla LV. Porcentajes de recuperación de Mn en ácido cítrico

Min	40 °C; 75rpm	40 °C; 100 rpm	40 °C; 125 rpm	45 °C; 100 rpm
0	0	0	0	0
20	0.125	0.039	0.207	0.023
40	0.197	0.041	0.139	0.044
60	0.154	0.042	0.134	0.051
80	0.173	0.041	0.114	0.071
100	0.165	0.045	0.15	0.062
120	0.158	0.044	0.171	0.005
140	0.192	0.039	0.154	0.037

O. Datos de curvas de calibración

Tabla LVI. Datos de curva de calibración de Cu

ppm	Absorción atómica
1	0.122
2	0.185
3	0.238
4	0.265
5	0.32

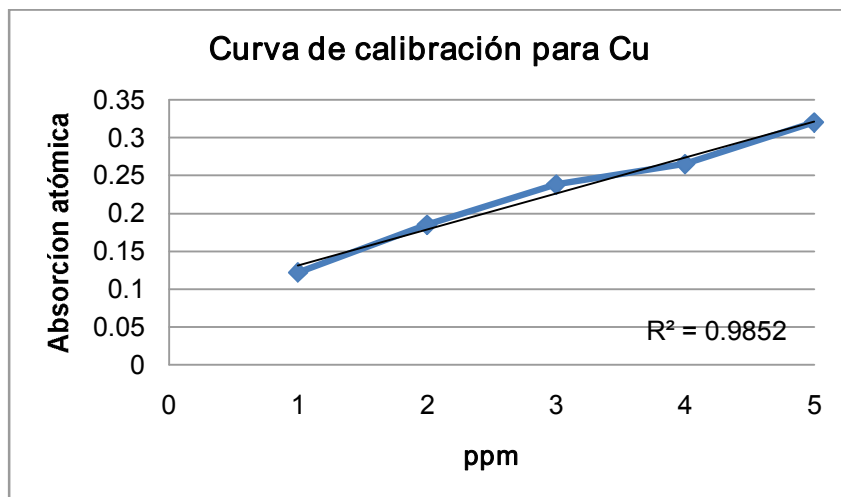


Figura 94. Curva de calibración para Cu

Tabla LVII. Datos de curva de calibración de Li

ppm	Absorción atómica
1	0.125
2	0.243
3	0.353
4	0.469
5	0.641

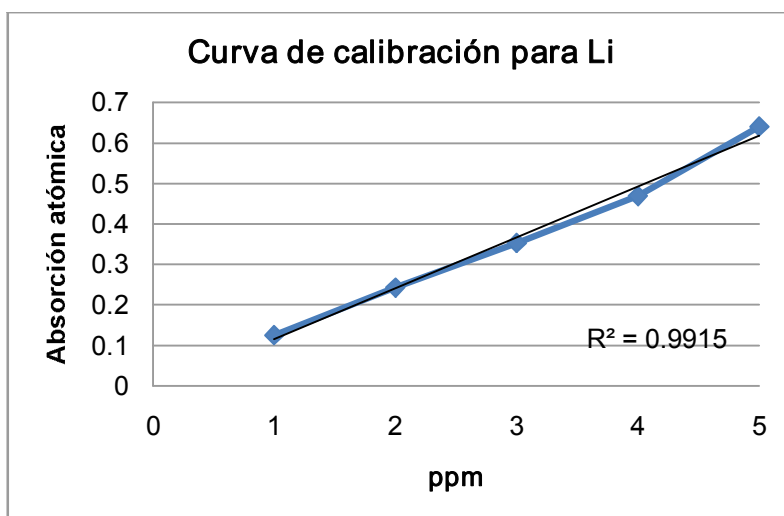


Figura 95. Curva de calibración para Li

Tabla LVIII. Datos de curva de calibración de Mn

ppm	Absorción atómica
0.5	0.036
1	0.068
1.5	0.101
2	0.137
2.5	0.161

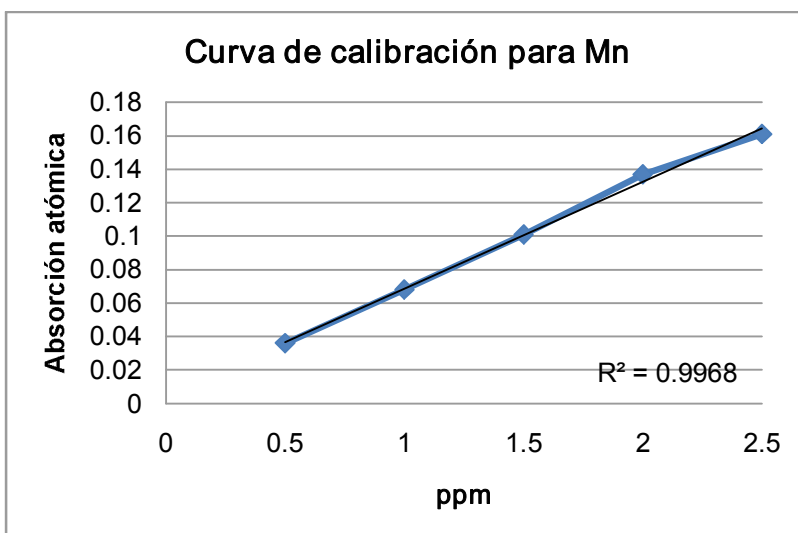


Figura 96. Curva de calibración para Mn