

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesores Patrocinantes:**  
Prof. Andrés Reghezza  
Prof. Eugenia Araneda  
**Ingeniero Supervisor**  
Juan Cornejo

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO METALÚRGICO DE DIFERENTES MEZCLAS DE POLVOS EN  
LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE POLVOS DE ECOMETALES LIMITED.**

**MONSERRAT ANTONIA ARELLANO ESCOBAR**

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de:

**Ingeniero Civil Metalúrgico**

Junio 30 2017

## AGRADECIMIENTOS

Al concluir esta etapa de mi vida, llena de sentimientos de todo tipo, quiero agradecer a innumerables personas por haber formado parte de ella. Primero que todo, al equipo de Ecometales, Santiago y Calama, por todo el apoyo técnico y la calidad humana de su gente, especialmente a los integrantes de la planta piloto, quienes me transmitieron sus conocimientos que hicieron posible ésta memoria. Mención especial para mi tutor Juan Cornejo, por haberme guiado durante el último año. Al profesor Andrés Reghezza, quien me dio la oportunidad de acercarme por primera vez al mundo profesional, además de su calidad como persona y por entregarme a lo largo de todo este proceso su apoyo y comprensión. La profesora Eugenia Araneda, quien ha contribuido en mi trabajo de manera incuantificable, resolviendo mis dudas y calmando mis angustias, además de prestarme su oficina.

Definitivamente sin la contención de mi familia nada de esto sería posible, mi madre como educadora quien ha plasmado todos sus métodos de enseñanza en la formación de sus hijos. Mi padre quien con su carácter exigente y constancia inmensurable ha logrado que cada día me auto supere. Mi hermano, quien ha sido víctima de mis semanas de certámenes y mis arranques de ira desencadenados por las frustraciones producto de la vida académica, gracias por aguantar y comprenderme tanto.

Agradecer a mis amigos del colegio, imposible no pensar en alguna rabia o pena de la cual no hayan sido testigo y verse en la obligación de darme un abrazo o ayudarme para solucionar el problema, también hemos compartido alegrías seguidas de celebraciones. Mis compañeros de carrera con quienes compartí más de una vez el sentimiento de desesperación en momento críticos de cada semestre, en los cuales nos sentimos al borde de un precipicio, situación constante, sobre todo en los meses de junio y noviembre.

A todas aquellas personas maravillosas y no tan maravillosas que conocí en estos últimos casi 7 años, ya que todos han aportado en mi crecimiento más de lo que piensan.

Por último, mis abuelos Carmen, Carlos y Juan, quienes me han inculcado los valores y principios más arraigados en mi ser. No tengo palabras para expresar lo agradecida que estoy de la vida por haberlos puesto en mi camino. Son el más claro ejemplo de trabajo, amor, fortaleza y virtud, el motor que cada día me impulsa a tomar las mejores decisiones. No hay elección que haga sin pensar en ustedes y el orgullo que deben sentir al ver que el día de hoy su nieta se convierte en ingeniero. Este es el humilde regalo que puedo ofrecerles para agradecerles su participación en mi formación como profesional y ser humano. Cada palabra de esta memoria la escribí pensando en la vuestra.

“Heme aquí, integra frente al Universo”

## SUMARIO

El objetivo de este trabajo es proponer mejoras para la Planta de Tratamiento de Polvos de Ecometales Limited, que trabaja con residuos procedentes de la Gerencia de Fundición de División Chuquicamata. Para esto, se realizó un estudio a través de un test de extracción máxima a nivel laboratorio en el que se analizaron las variables que influyen en la recuperación de cobre a lo largo del proceso (concentración de ácido, tiempo, agente lixivante, mezcla de polvos). Dichas pruebas consistieron en un proceso batch de tres etapas de lixiviación, en reactores de 5 L, cada etapa trabajó bajo distintas condiciones de concentración de ácido, tiempo y temperatura. Se estudiaron la recuperación y cinética de disolución de cobre y arsénico, al igual que la pérdida de masa de los polvos, se analizaron las recuperaciones logradas de la lixiviación de cada tipo de polvo ya sea con agua acidulada o agua en la etapa primaria, se estudió la influencia de los polvos de la Zona de Transferencia, uno de los polvos que ingresa a la planta, al disolver cobre y arsénico, se reevaluaron los tiempos de residencia empleados en cada reactor.

De los resultados, se observó que es posible disolver el cobre de manera casi total, puesto que se alcanzó entre un 90 y 95% de recuperación acumulada en todas las pruebas. Además, se observó que la lixiviación primaria alcanzó velocidades altas de disolución, ya sea de cobre, masa o arsénico, a diferencia de las etapas restantes. Esto se asocia a que la primera etapa cumple una función disolutiva, en cambio la segunda etapa incrementa muy pocos puntos a la recuperación global y la tercera tiene como rol lixiviar los compuestos refractarios asociados al cobre y arsénico. De acuerdo con esto, sería posible obviar la segunda instancia disolutiva. En cuanto a la solubilización de cada tipo de polvos, CPS, CT, HF y ZT, de forma aislada, se dedujo que es posible recuperar por sobre el 90% del cobre y 99% del arsénico, ya sea utilizando agua o agua acidulada como agente lixivante en la etapa primaria, lo que significa que los polvos están principalmente compuestos por especies asociadas a sales sulfatadas y/o óxidos. En cuanto a la presencia de polvos ZT en las mezclas a disolver no presentó mayores dificultades, ya que a pesar de la disminución de la recuperación y velocidad de lixiviación en la primera etapa, el ácido y la temperatura de la etapa terciaria lograron soslayar el efecto refractario que presentan estos polvos frente a lixiviación, alcanzando recuperaciones similares que al trabajar con polvos exclusivamente de la TT. Por lo tanto, fue posible lograr las mismas recuperaciones globales

incluso al trabajar con mezclas que contenían una alta proporción de polvos ZT. En lo que concernió al tiempo de reacción de cada etapa, se alcanzaron altos valores de recuperación, incluso el máximo en algunos casos, en la primera media hora. Esto abriría una oportunidad de mejora para la capacidad de tratamiento de la planta.

Por otra parte, es relevante el alto grado de pérdida de masa de polvos y disolución de arsénico total, ya que la P-AAA oxida el  $\text{As}^{+3}$  en  $\text{As}^{+5}$  para luego estabilizarlo y precipitarlo en forma de scorodita. Incluyendo las pérdidas de arsénico en la borra, la planta abate un 85% del arsénico total que entra, cumpliendo así con la normativa ambiental.



## ÍNDICE GENERAL

GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Antecedentes generales.....	3
2.1.1 Contextualización del proceso .....	3
2.1.2 Flujos de entrada a la planta.....	9
2.2 Marco teórico.....	13
2.1.3 Lixiviación .....	13
2.1.4 Lixiviación por agitación.....	14
2.1.5 Cinética química .....	15
2.1.6 Concentración de los reactivos .....	18
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	20
3.1 Pruebas de lixiviación.....	20
3.1.1 Equipos asociados.....	20
3.1.2 Materiales asociados.....	21
3.1.3 Insumos .....	21
3.1.4 Descripción general de la prueba de lixiviación en laboratorio.....	21
3.2 Descripción de las baterías de pruebas.....	24
3.2.1 Set 1.....	24
3.2.2 Set 2.....	25
3.2.3 Set 3.....	27
3.2.4 Set 4.....	28
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	30
4.1 Análisis químico elemental de polvos ZT, CT, HF y CPS .....	30
4.2 Set 1.....	30
4.2.1 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos CPS .....	30
4.2.2 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos CT .....	33
4.2.3 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos HF .....	36
4.2.4 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos ZT.....	38

4.3	Set 2.....	42
4.3.1	Resultados de pruebas M1, M2 y M3 .....	42
4.3.2	Resultados de pruebas M4, M5 y M6 .....	44
4.3.3	Resultados pruebas M7 y M8.....	47
4.4	Set 3.....	51
4.4.1	Resultados de pruebas C1, C2, C3, C4 y C5 .....	51
4.4.2	Resultados de pruebas C6, C7, C8, C9 y C10 .....	55
4.4.3	Resultados pruebas C11, C12, C13, C14 y C15 .....	58
2.1.7	Resultados de pruebas C16, C17, C18 y C19 .....	61
4.5	Set 4.....	64
4.5.1	Resultados P1, P2 y P3: .....	64
4.5.2	Resultados P5 y P6 .....	67
4.5.3	Resultados P7, P8 y P9 .....	70
4.6	Estudio de cinética .....	76
4.7	Comportamiento de pH y potencial.....	77
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		79
5.1	Conclusiones.....	79
5.2	Recomendaciones .....	80
6	REFERENCIAS.....	82
7	ANEXOS .....	83
7.1	Distribución de polvos.....	83
7.2	Tonelaje de Polvo .....	85
7.3	Desarrollo de la actividad.....	86
2.1.8	Lixiviación 1. ....	86
2.1.9	Lixiviación 2. ....	87
2.1.10	Lixiviación 3. ....	89
7.4	Mezcla de polvos utilizada en el segundo Set de pruebas.....	91
7.5	Set 1.....	91
7.6	Set 2.....	92
7.7	Set 3.....	93
7.8	Set 4.....	95
7.9	Estudio de la cinética.....	96
7.9.1	Lixiviación 1 de C1, C2, C3, C4 y C5 .....	96
7.9.2	Lixiviación 2, pruebas C1, C2, C3, C4 y C5 .....	97

7.9.3	Lixiviación 3, pruebas C1, C2, C3, C4 y C5 .....	98
7.9.4	Lixiviación 1, pruebas C6, C7, C8, C9 y C10 .....	99
7.9.5	Lixiviación 2, pruebas C6, C7, C8, C9 y C10 .....	100
7.9.6	Lixiviación 3, pruebas C6, C7, C8, C9 y C10 .....	101
7.9.7	Lixiviación 1, pruebas C11, C12, C13, C14 y C15 .....	102
7.9.8	Lixiviación 2, pruebas C11, C12, C13, C14 y C15 .....	103
7.9.9	Lixiviación 3, pruebas C11, C12, C13, C14 y C15 .....	104
7.9.10	Lixiviación 1, prueba C16, C17, C18 y C19.....	105
7.9.11	Lixiviación 2, pruebas C16, C17, C18 y C19 .....	106
7.9.12	Lixiviación 3, pruebas C16, C17, C18 y C19 .....	107
7.10	Comportamiento del pH y Potencial.....	108



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo de residencia actual por etapa de lixiviación. ....	5
Tabla 2. Dimensiones de los equipos. ....	7
Tabla 3. Parámetros generales de la PTP <sup>[2]</sup> . ....	7
Tabla 4. Condiciones experimentales estándar bajo las cuales se realizan los set de pruebas 1, 2 y 3. ....	25
Tabla 5. Condiciones experimentales bajo las cuales se realizan los set de pruebas 1. Proceso alternativo. ....	25
Tabla 6. Proporción de mezclas de polvos TT representativas del estudio de camiones. ....	26
Tabla 7. Composición de polvos para cada mezcla del Set 2 de pruebas. ....	26
Tabla 8. Diseño experimental de pruebas Set 3. ....	27
Tabla 9. Diseño experimental de pruebas Set 4. ....	28
Tabla 10. Condiciones experimentales bajo las cuales se realizó el set de pruebas 4. ....	28
Tabla 11. Análisis químico elemental por elemento de cada polvo que ingresa a la PTP. ....	30
Tabla 12. Análisis químico elemental de polvos producidos por el CPS de Paipote. ....	31
Tabla 13. Tabla resumen de las recuperaciones de cobre acumuladas reales y las recuperaciones de cobre acumuladas obtenidas del Set 1. ....	50
Tabla 14. Resumen de las constantes de velocidad cinéticas obtenidas a partir del Set 3. ....	77
Tabla 15. Horario estándar del Turno A de Valle de la Luna. ....	83
Tabla 16. Horario estándar del Turno B de Valle de la Luna. ....	84
Tabla 17. Composición detallada de las mezclas de polvos para el Set 2 de pruebas. ....	91
Tabla 18. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos CPS con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria. ....	91
Tabla 19. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos CT con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria. ....	92
Tabla 20. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos HF con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria. ....	92



Tabla 21. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos ZT con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria. ....	92
Tabla 22. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas M1, M2 y M3. ....	92
Tabla 23. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas M4, M5 y M6. ....	93
Tabla 24. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas M7 y M8. ....	93
Tabla 25. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C1, C2, C3, C4 y C5. ....	93
Tabla 26. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C6, C7, C8, C9 y C10. ....	94
Tabla 27. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C11, C12, C13, C14 y C15. ....	94
Tabla 28. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C16, C17, C18 y C19. ....	95
Tabla 29. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas P1, P2 y P3. ....	95
Tabla 30. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas P5 y P6. ....	95
Tabla 31. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas P7, P8 y P6. ....	95
Tabla 32. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del primer Set de pruebas. ....	108
Tabla 33. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del segundo Set de pruebas. ....	108
Tabla 34. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del tercer Set de pruebas. ....	109
Tabla 35. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del cuarto Set de pruebas. ....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de proceso actual etapa de lixiviación primaria – secundaria <sup>[2]</sup> .....	5
Figura 2. Diagrama de procesos actual Etapa Espesamiento – Filtrado <sup>[2]</sup> .....	6
Figura 3. Recuperación de la masa de cobre recuperada mensualmente en toneladas durante el 2016.....	8
Figura 4. Diagrama de Torta de la repartición anual de todos los Polvos. ....	9
Figura 5. Especificación de los Polvos TT. ....	10
Figura 6. Agitación durante la lixiviación primaria realizada en un reactor de vidrio de 5 L y un manto calefactor que no proporciona temperatura en este caso.....	22
Figura 7. Filtración de la borra resultante de una segunda lixiviación realizada con un Kitasato y una bomba de vacío. ....	23
Figura 8. Filtración de muestras tomadas con diferencia de media hora para medir la variación del potencial Redox y el pH durante una lixiviación primaria. ....	23
Figura 9. Diagrama de Flujo de pruebas de lixiviación.....	24
Figura 10. Disolución del cobre de polvos CPS a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	31
Figura 11. Disolución de masa de polvos CPS a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	32
Figura 12. Disolución del arsénico de polvos CPS a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	33
Figura 13. Disolución del cobre de polvos CT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	34
Figura 14. Disolución de masa de polvos CT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	35
Figura 15. Disolución del arsénico de polvos CT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	36
Figura 16. Disolución del cobre de polvos HF a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	36
Figura 17. Disolución de masa de polvos HF a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	37

Figura 18. Disolución del arsénico de polvos HF a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	38
Figura 19. Disolución del cobre de polvos ZT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	39
Figura 20. Disolución de masa de polvos ZT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	40
Figura 21. Disolución del arsénico de polvos ZT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria. ....	41
Figura 22. Imagen del análisis de polvos de Fundición realizado por QEMSCAN, se identifican múltiples fases (As-S, Cu-Fe-As-S, Fe-Sulfato, Cu(Fe)-Sulfato).....	41
Figura 23. Disolución del cobre de las mezclas M1, M2 y M3 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	43
Figura 24. Disolución de masa de las mezclas M1, M2 y M3 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	43
Figura 25. Disolución del arsénico de las mezclas M1, M2 y M3 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	44
Figura 26. Disolución del cobre de las mezclas M4, M5 y M6 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	45
Figura 27. Disolución de masa de las mezclas M4, M5 y M6 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	46
Figura 28. Disolución del arsénico de las mezclas M4, M5 y M6 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	46
Figura 29. Disolución del cobre de las mezclas M7 y M8 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	48
Figura 30. Disolución de masa de las mezclas M7 y M8 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	48
Figura 31. Disolución del arsénico de las mezclas M7 y M8 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.....	49
Figura 32. Disolución del cobre de las mezclas C1, C2, C3, C4 y C5 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	52
Figura 33. Disolución de masa de las mezclas C1, C2, C3, C4 y C5 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	53

Figura 34. Disolución del arsénico de las mezclas C1, C2, C3, C4 y C5 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	54
Figura 35. Disolución del cobre de las mezclas C6, C7, C8, C9 y C10 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	56
Figura 36. Disolución de masa de las mezclas C6, C7, C8, C9 y C10 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	57
Figura 37. Disolución del arsénico de las mezclas C6, C7, C8, C9 y C10 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	58
Figura 38. Disolución del cobre de las mezclas C11, C12, C13, C14 y C15 a lo largo de las 3 etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	59
Figura 39. Disolución de masa de las mezclas C11, C12, C13, C14 y C15 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.....	60
Figura 40. Disolución del arsénico de las mezclas C11, C12, C13, C14 y C15 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.....	61
Figura 41. Disolución del cobre de las mezclas C16, C17, C18 y C19 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	62
Figura 42. Disolución de masa de las mezclas C16, C17, C18 y C19 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	63
Figura 43. Disolución del arsénico de las mezclas C16, C17, C18 y C19 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo. ....	64
Figura 44. Comparación de las recuperaciones de cobre obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P1, P2, P3, M1, M2 y M3. ....	65
Figura 45. Comparación de las pérdidas de masa obtenida a lo largo de cada etapa de las pruebas P1, P2, P3, M1, M2 y M3. ....	66
Figura 46. Comparación de la recuperación de arsénico obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P1, P2, P3, M1, M2 y M3. ....	67
Figura 47. Comparación de la recuperación de cobre obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P5, P6, M5 y M6. ....	68
Figura 48. Comparación de las pérdidas de masa obtenida a lo largo de cada etapa de las pruebas P5, P6, M5 y M6. ....	69
Figura 49. Comparación de la recuperación de arsénico obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P5, P6, M5 y M6. ....	70

Figura 50. Comparación de la recuperación de cobre obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P7, P8 P9, M7 y M8. ....	72
Figura 51. Comparación de la pérdida de masa obtenida a lo largo de cada etapa de las pruebas P7, P8 P9, M7 y M8. ....	73
Figura 52. Comparación de la disolución de arsénico obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P7, P8 P9, M7 y M8. ....	74
Figura 53. Fluctuaciones del tonelaje de Polvos TT y ZT.....	85
Figura 54. Fluctuaciones de los tonelajes de los Polvos CPS, CT, HF y ZT.....	85
Figura 55. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.....	96
Figura 56. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	96
Figura 57. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	96
Figura 58. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.....	97
Figura 59. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	97
Figura 60. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	97
Figura 61. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	98
Figura 62. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	98
Figura 63. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	98
Figura 64. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	99
Figura 65. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	99
Figura 66. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	99
Figura 67. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	100
Figura 75. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	100
Figura 69. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	100
Figura 70. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	101
Figura 71. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.....	101
Figura 72. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	101

Figura 73. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	102
Figura 74. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno. ....	102
Figura 75. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	102
Figura 76. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	103
Figura 77. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno. ....	103
Figura 78. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	103
Figura 79. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	104
Figura 80. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno. ....	104
Figura 81. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	104
Figura 82. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	105
Figura 83. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno. ....	105
Figura 84. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	105
Figura 85. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	106
Figura 86. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno. ....	106
Figura 87. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	106
Figura 88. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero. ....	107
Figura 89. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno. ....	107
Figura 90. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos. ....	107

## NOMENCLATURA

ECL: Ecometales

PTP: Planta de tratamiento de polvos.

P-AAA: Planta Abatimiento de Arsénico y Antimonio.

PTMP: Planta de tratamiento de minerales en pilas

PLS: Pregnant Leaching Solution

DRIS-P: Depósito de residuos industriales sólidos Peligrosos.

DCHh: División Chuquicamata.

DVEN: División Ventanas.

RE-001: Reactor en el que ocurre la lixiviación primaria de polvos TT y ZT.

RE-004: Reactor stand by del RE-001. Se utiliza cuando no hay disponibilidad para descargar los polvos en el Silo y la descarga es directa desde el camión al reactor.

RE-002: Reactor en el que ocurre la primera parte de la lixiviación secundaria.

TK-2204: Estanque para repulpeo de polvos provenientes de DVEN, cuya pulpa es enviada al RE-002.

RE-003: Reactor en el que ocurre la segunda parte de la lixiviación secundaria.

TT-001: Espesador que realiza la separación S-L producto de la lixiviación primaria y secundaria.

RE-006: Reactor en el que ocurre la lixiviación terciaria.

TT-002: Espesador que realiza la separación S-L producto de la lixiviación terciaria.

TK-042: Estanque de almacenamiento que recibe el overflow del TT-002.

TT-003: Espesador que realiza la separación S-L producto de la lixiviación terciaria.

CT-025: Cajón de traspaso que recolecta el overflow del TT-003.

TK-323: Estanque de almacenamiento que recibe el underflow del TT-003.

BB-325A/B y BB-326A/B: Bombas que impulsan el underflow desde el TT-003 a TK-323

TT: Torre Tripartita

CT: Convertidor Teniente

CPS: Convertidor Pierce Smith

HF: Horno Flash

ZT: Zona de Transferencia

## CAPITULO 1

### GENERALIDADES

#### 1.1 INTRODUCCIÓN

EcoMetales Limited (ECL) es una filial 100% de Codelco, primera planta industrial en el mundo que estabiliza de manera segura el arsénico y otras impurezas como el antimonio asociadas a la producción de cobre, haciendo una contribución significativa a la minería sustentable en pro del medio ambiente y para la salud de los trabajadores.

Esta se provee de los residuos que generan las fundiciones de Codelco, tales como; polvos de fundición, efluentes de refinería y efluente de planta de ácido (EPAS), los cuales se usan como materia prima en su proceso. Para tratar dichas materias, ECL cuenta con una planta que se divide en dos líneas productivas: Lixiviación de polvos de fundición para la recuperación de cobre y Planta Abatimiento de Arsénico y Antimonio (P-AAA), que estabiliza estas impurezas a la forma de Escorodita (Patente N° 50423/2014/Chile) <sup>[1]</sup>.

Actualmente la planta procesa alrededor de 155 t/día de polvos de fundición, generando 120 a 130 t/día de residuos sólidos de los cuales sólo el 30% corresponde a escorodita y 70% a yeso. Estos residuos son dispuestos en un botadero o depósito de residuos industriales sólidos peligrosos (DRIS-P) <sup>[2]</sup>.

Se busca mejorar el proceso que se realiza en la PTP, con el fin de lograr un aumento de recuperación de Cu y As. Además, de optimizar la capacidad de tratamiento de la planta con el fin de lixiviar mayor tonelaje de polvos.

El presente trabajo se enfoca en evaluar las variables que intervienen en el proceso de lixiviación de polvos, a fin de aumentar la capacidad y recuperación de la PTP. Para ello se realizaron pruebas de lixiviación de los distintos polvos que llegan a la planta de ECL a escala laboratorio.



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo general

Estudiar de la factibilidad de optimización en la recuperación de cobre y arsénico, además del aumento de la capacidad de tratamiento al variar distintos parámetros del proceso de lixiviación de polvos a escala laboratorio.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el comportamiento metalúrgico y la cinética de disolución de cada uno de los distintos polvos de fundición procedentes (HF, CT, CPS y ZT) de la Fundición de la División Chuquicamata (DCH) mediante pruebas de lixiviación a escala laboratorio.
- Estudiar la recuperación de cobre y arsénico obtenida en el proceso de lixiviación de cada polvo que ingresa a la PTP, ya sea con agua acidulada o agua.
- Estudiar la recuperación de cobre al lixiviar mezclas de los polvos de fundición y del botadero ZT (Zona de Transferencia) conociendo las proporciones utilizadas y observar si existe concordancia con los resultados obtenidos de otros estudios de ECL.
- Estudiar si el tiempo de residencia empleado actualmente para el proceso es el óptimo en términos de disolución de cobre.
- Estudiar el comportamiento del proceso de ECL al variar la concentración de ácido en el agua acidulada utilizada en la primera etapa de lixiviación.
- Evaluar los resultados obtenidos para optimizar las condiciones de operación de la PTP, mejorando su capacidad de procesamiento.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes generales

##### 2.1.1 Contextualización del proceso

###### 2.1.1.1 Descripción de la Planta de EcoMetales Limited, Calama

ECL es una empresa filial de Codelco, que ofrece soluciones ambientales a la minería y procesos para la recuperación de metales, ubicada a 35 km de Calama, cercana a la DCH. Su función principal es el procesamiento de efluentes y residuos mineros con el objetivo de remover y estabilizar impurezas y recuperar metales de interés <sup>[1]</sup>. ECL cuenta con una planta que ejecuta dos procesos principales: Lixiviación de polvos de fundición provenientes de DCH y Ventanas y Abatimiento de arsénico y antimonio. De los que se obtienen: PLS (Pregnant Leaching Solution) alto en cobre y bajo en arsénico, que es recirculado a la Planta de Tratamiento de Minerales en Pila (PTMP) de DCH, y residuos de polvos de fundición (borras) y de arsénico estabilizado.

Actualmente, la PTP procesa diariamente alrededor 155 t, produciéndose 1 000 m<sup>3</sup> de PLS que es enviado a P-AAA y 50 t de borras, que son almacenadas en el DRIS-P.

Posterior al tratamiento en la P-AAA se recuperan al día 1.300 m<sup>3</sup> de PLS que son enviados a la Planta de Tratamiento de Mineral en Pila en DCH. Además, se obtiene como producto 130 t de escorodita <sup>[2]</sup>.

###### 2.1.1.2 Proceso de lixiviación

A continuación, se describe el proceso de disolución de los polvos para recuperar cobre.

### 2.1.1.2.1 Lixiviación primaria

En la Planta de Tratamiento de Polvos (PTP), cuyos diagramas se muestran en la Figura 1 y Figura 2, los polvos de fundición son recepcionados a través de camiones presurizados, que descargan mediante transporte neumático a un silo de acopio con capacidad para 500 t.

El silo, descarga a través de un disco fluidizador, y asegura el escurrimiento homogéneo de la carga, a un alimentador de tornillo que permite abastecer en forma regular al reactor de lixiviación RE-001. Adicionalmente, el reactor RE-004 puede ser alimentado directamente con polvos desde los camiones, sin necesidad de pasar por el silo.

En estos reactores, los polvos son mezclados con efluente de DCH y/o agua a razón de 200 m<sup>3</sup>/día. Además, a este reactor llega una corriente de recirculación de la lixiviación secundaria, permitiendo alcanzar una concentración de sólidos de 20% a la entrada del reactor. El tiempo de residencia en este reactor es de 2,5 horas a temperatura ambiente y la disolución de masa, para efectos de este estudio, llamada pérdida de masa, es del orden del 43%, lo que permite obtener una concentración de sólidos del orden del 10%. Si bien, en el diseño de esta planta se consideraba lixiviar con efluentes de refinería de DCH, actualmente sólo se lixivía con ácido sulfúrico y agua.

El producto de la primera etapa de lixiviación primaria (RE-001) es impulsado a una segunda etapa de lixiviación, pasando previamente la pulpa por un harnero vibratorio, lo que permite clasificar la fracción de partículas gruesas mayores o iguales a 2 mm que son descargadas a piso y retiradas del circuito para evitar embancamiento en los reactores. La pulpa pasante es alimentada en forma continua al reactor RE-002 al que se le adiciona una corriente de recirculación proveniente del espesador de borras. El tiempo de residencia en esta etapa es de 2,5 horas a temperatura ambiente y la pérdida de masa acumulada es del orden de 60%.

Por otra parte, los polvos de la Fundición recepcionados en maxisacos son alimentados a través de un tolván especialmente diseñado para esto y lixiviados en el reactor TK-2204 y posteriormente mezclados con la pulpa en el reactor RE-003.

La lixiviación secundaria cuenta con una segunda etapa realizada en el reactor RE-003 el que es alimentado por rebose a partir del reactor RE-002 y la pulpa del TK-2204, con el propósito de entregar mayor tiempo de residencia a la reacción de lixiviación, aportando así 2,5 horas adicionales. La temperatura durante la operación es del orden de 40-50 °C [2].

### 2.1.1.2.2 Espesamiento 1 - Lixiviación secundaria

Una vez realizada la lixiviación secundaria, se aprecia en la Figura 1 que el reactor RE-003 alimenta al espesador primario TT-001 para efectuar la separación sólido-líquido, donde el overflow corresponde al PLS con las especies Cu, As y Sb en solución, el cual es enviado a una piscina de clarificación para efectuar la sedimentación de las partículas ultrafinas cortocircuitadas en el proceso de espesamiento. Desde esta piscina, el PLS, es impulsado al estanque TK-024, y mezclado con agua y efluentes, para luego alimentar al estanque TK-163 y de esta forma abastecer a la P-AAA.

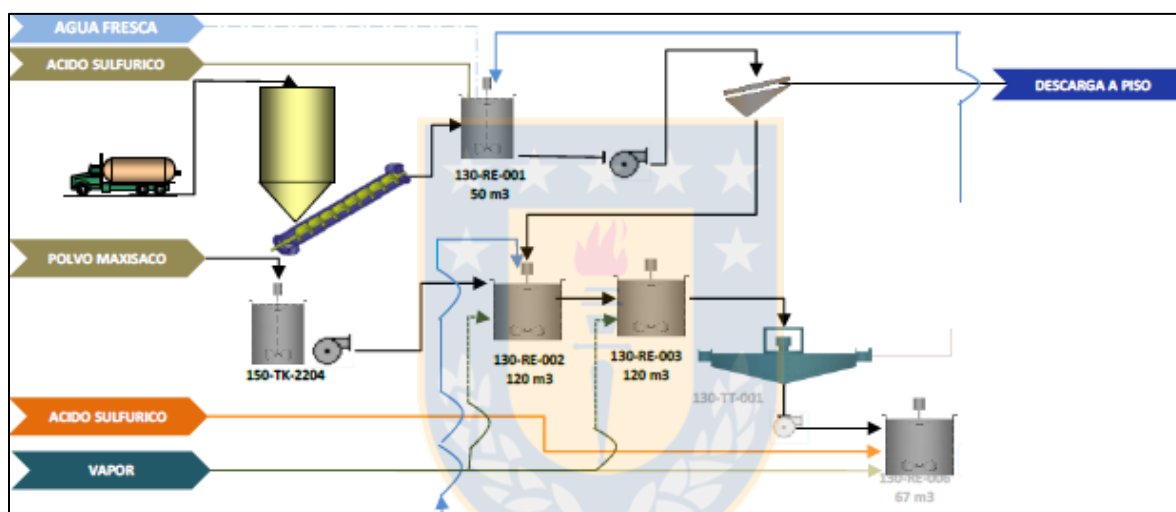


Figura 1. Diagrama de proceso actual etapa de lixiviación primaria – secundaria <sup>[2]</sup>.

El underflow de este espesador descarga en el reactor RE-006, realizándose la lixiviación terciaria mediante la adición de un golpe de ácido sulfúrico, considerando un tiempo de residencia de 4,5 h, a temperatura entre 60–70 °C mediante la inyección de vapor. La pérdida de masa acumulada al término de esta etapa alcanza el orden de 74% <sup>[2]</sup>.

El tiempo de residencia actualmente utilizado en PTP para la lixiviación se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Tiempo de residencia actual por etapa de lixiviación.

Lixiviación primaria	Lixiviación Secundaria	Lixiviación terciaria
Re-001	Re-002	Re-006
2,5 h	2,5 h	4,5 h

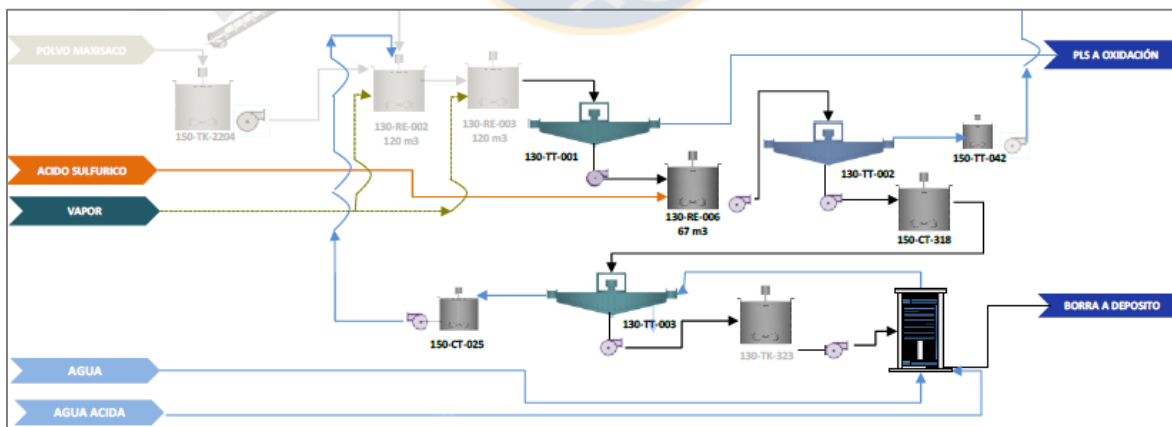
### 2.1.1.2.3 Espesamiento 2 y 3 – Filtrado

El objetivo de esta etapa de espesamiento y filtrado, que se aprecia en la Figura 2, es recuperar el PLS con las especies obtenidas en la lixiviación terciaria, junto con obtener una borra lo menos húmeda posible, con una solución de empape con la mínima concentración de Cu, As y Sb.

La pulpa lixiviada en el reactor RE-006 alimenta al espesador secundario TT-002. El overflow es recolectado en el estanque TK-042 y recirculado al reactor de la primera etapa de lixiviación RE-001.

El underflow es descargado en el cajón del espesador TT-003, diluyéndose con agua antes de realizar la tercera etapa de espesamiento. Luego de este último espesamiento, el overflow es recolectado en el cajón CT-025 para ser recirculado reactor RE-002. Por otro lado, el underflow es descargado en el estanque TK-323 para así alimentar la etapa de filtrado.

Desde este estanque, el underflow del tercer espesador es impulsado a través de las bombas hacia un filtro vertical Larox FP-330 en el que se efectúa un lavado con agua ácida y otro con agua neutra. Desde este filtro la solución recuperada es recirculada hacia el cajón de alimentación del espesador terciario, y la borra con una humedad del orden del 20%, es retirada y transportada hacia un depósito de confinamiento [2].



**Figura 2. Diagrama de procesos actual Etapa Espesamiento – Filtrado [2].**

Los distintos equipos que se encuentran en la PTP trabajan a distintas capacidades, según sea necesario. En Tabla 2 se describen las dimensiones del diseño de los reactores.

**Tabla 2. Dimensiones de los equipos.**

Equipo	Volumen Estanque m <sup>3</sup>	Nivel Llenado %	Volumen útil m <sup>3</sup>
RE-001	50	90	45
RE-002	120	85	102
RE-003	120	85	102
RE-004	50	80	40
RE-006	67	90	60,3
RE-010	50	90	45
TK-323	240	90	216
TK-338	26	90	23
TK-042	30	85	25,5
TK-2204	35	90	31,5

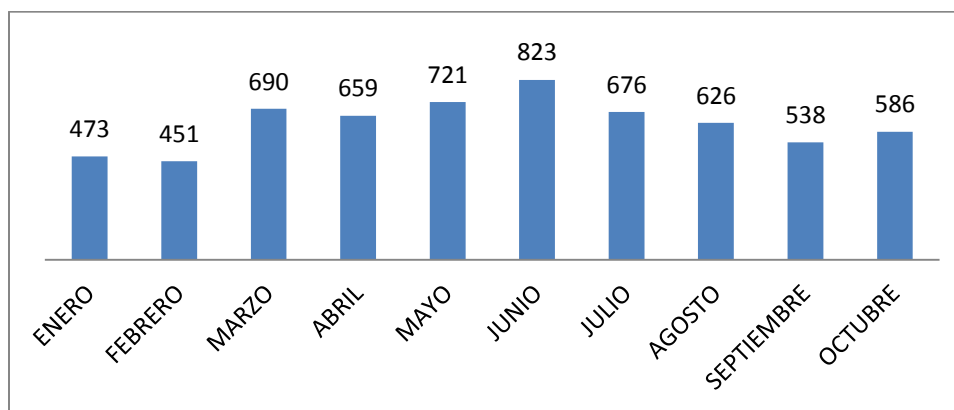
Los parámetros generales utilizados para el proceso en la PTP se indican en la Tabla 3 siguiente:

**Tabla 3. Parámetros generales de la PTP <sup>[2]</sup>.**

Utilización de la Planta	75%
Recuperación Global de As (sin EPAS)	83,90%
Alimentación Polvos	155 t/día
PLS enviado a AAA	314 881 m <sup>3</sup> /año
Masa de Borrás	1 200 t/año

### 2.1.1.3 Datos históricos

Durante el año 2016, la planta de ECL logró buenos resultados en sus recuperaciones de cobre. En los meses estudiados, de enero a octubre, se observó una fluctuación entre 450 y 820 t de cobre recuperadas, mientras que el promedio mensual fue 620 t. Por otro lado, la recuperación de cobre en la planta es de 87,8%. En la Figura 3 se observa como varió la recuperación mensual de cobre en el periodo considerado.



**Figura 3. Masa de cobre mensualmente recuperada en toneladas durante el 2016.**

#### **2.1.1.4 Tipos de polvos procesados**

Los polvos tratados por ECL, fueron retirados de la Torre Tripartita (TT) y de la Zona de Transferencia (ZT), ambos ubicados en DCH y corresponden a residuos producidos en la fundición o bien depositados en un sector de traspaso.

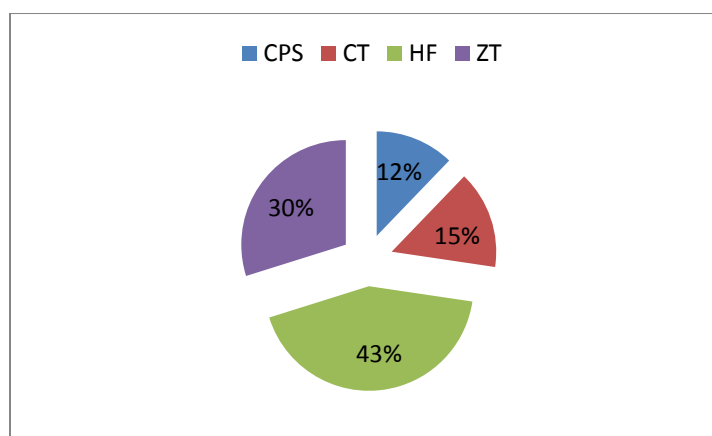
La TT recibe 3 tipos de polvos que se originan en distintos hornos de la fundición, Convertidor Pierce-Smith (CPS), Convertidor Teniente (CT) y Horno Flash (HF). La producción de cada uno de estos hornos depende del concentrado que tratan, las condiciones de operación, entre otras, por lo que no hay un flujo constante en la producción de cada polvo. El estudio de flujo de camiones con una distribución de masa de polvos conocida, se muestra en la Figura 54, Anexo 7.2.

#### **2.1.1.5 Tonelaje de Polvos**

Entre enero y octubre del 2016, se descargaron 32.496 t de polvos, distribuidos en polvos de origen TT y ZT. Por otro lado, se tiene que 22.800 t corresponden a polvos TT y 9.696 t a polvos ZT, es decir, el 70% de los polvos que ingresaron a lo largo del año provinieron directamente de la Torre Tripartita y el 30% restante de la ZT.

En las 40 semanas transcurridas, se observa que no hubo un flujo de entradas constantes de polvos TT ni de ZT. En estos últimos se observa que hubo siete semanas en las que su entrada fue prácticamente nula debido a problemas operacionales en la ZT. En tanto, los polvos TT llegaron durante todas las semanas, y aun así se observaron fuertes variaciones, puesto que los extremos que se presentan son 170 t/semana y 1.000 t/semana. (Ver Figura 53 Anexo 7.2).

Se observa en la Figura 4 que de las 32.496 t de polvos que han llegado a ECL para su procesamiento, casi la mitad corresponde a polvos HF, seguido a prácticamente un tercio de ZT y tal y como se mencionó anteriormente la llegada de CPS y CT es similar.



*Figura 4. Diagrama de Torta de la repartición anual de todos los Polvos.*

Según los resultados, durante este año los polvos TT representan un 70% de la masa llegada a la planta, mientras que la masa de los residuos provenientes de la ZT un 30%.

## 2.1.2 Flujos de entrada a la planta

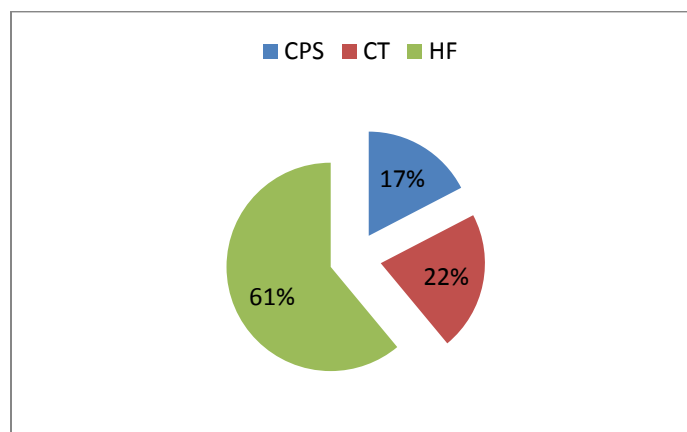
### 2.1.2.1 Composición de los polvos

Los polvos de la TT están compuestos por distintos tipos de polvos: CT, CPS y HF, cada uno de ellos con distinta gravedad específica 3,77; 3,51 y 3,90 g/mL, respectivamente. Los camiones transportan dicho polvo en distintas proporciones, las cuales no están definidas, por lo tanto, la composición de la masa de los camiones con polvos TT no es constante ni predecible. Esto impacta en la recuperación de cobre, puesto que, si cambia la interacción entre los polvos, la lixiviación pudiese no ser tan efectiva para la mezcla resultante en el silo (RE004 o RE010).

Los polvos descargados en la planta, en dicho periodo fueron 4.924 t de CPS, 3.961 t de CT, 13.914 de HF y 9.696 t de ZT. En términos de porcentajes, las masas que han ingresado a lo largo del año se traducen tal como lo explica la Figura 4, anteriormente. En ella se aprecia que



43% de la masa ingresada corresponde a HF, 30% a ZT, 15% a CT y 12% a CPS. Por otro lado, como se aprecia en la Figura 5, se puede especificar la masa de polvo tripartita que ha llegado a ECL.



**Figura 5. Especificación de los Polvos TT.**

La composición y calidad de los polvos depende entre otros factores de las variables que se utilizan en el manejo de los reactores, por lo tanto, es necesario describir el funcionamiento de los hornos y convertidores de la fundición.

#### **2.1.2.2 Ácido Sulfúrico**

Para el desarrollo de las pruebas se utilizó ácido sulfúrico de 93% de pureza, éste proviene de DCH.

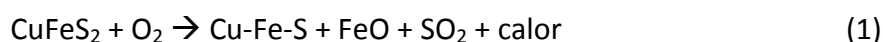
#### **2.1.2.3 Zona de Transferencia (ZT)**

La ZT es un depósito ubicado en DCH y está bajo el control de la Gerencia de Fundición. En este se depositan el 30% de los residuos producidos por la fundición. Producto de las condiciones a las cuales está expuesto el material, tales como oxidación por el contacto con la atmósfera y disolución como consecuencia de las lluvias y posterior cristalización, la mineralogía y granulometría original se ve alterada, pues éstas dependen de las condiciones atmosféricas y tiempo de almacenamiento del material.

#### 2.1.2.4 Convertidor teniente (CT)

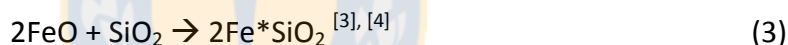
El CT es capaz de realizar la fusión y conversión dentro del mismo reactor. Se alimenta el concentrado, fundente (cuarzo) y aire enriquecido en oxígeno (35%), produciéndose reacciones de oxidación del hierro y azufre que son altamente exotérmicas. Dicha energía es utilizada para fomentar la fusión. Las toberas que inyectan el aire rico en oxígeno, son introducidas en el concentrado. La temperatura de operación es alrededor de 1.250 °C y su capacidad de tratamiento varía entre 1.600 y 1.800 t/día.

La principal reacción que ocurre durante la fusión es:



Una vez en estado líquido las sustancias, por diferencia de densidades, la escoria compuesta de hierro y sílice permanece sobre el metal blanco, que posee una ley de cobre de 70-75%. También se produce una emisión de gases (8-10% de SO<sub>2</sub>) y polvos metalúrgicos.

Las reacciones que ocurren para dar paso a la formación de la escoria (5-8%) son:

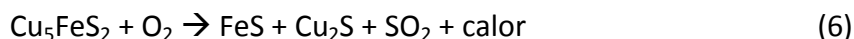
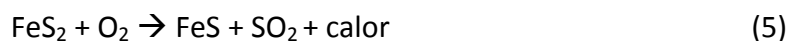
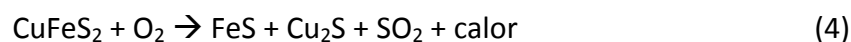


#### 2.1.2.5 Horno Flash (HF)

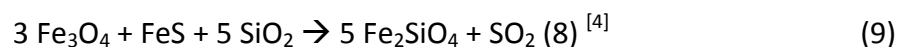
Es un horno que a partir de concentrados de cobre sulfurado, fundente (cuarzo) y aire enriquecido de oxígeno (45-60%) es capaz de entregar como producto final una escoria (1,5-2,5% de Cu) y un eje (60% de Cu) fundido, además de gases ricos en SO<sub>2</sub> (18-22%) y polvos de fundición. El reactor funciona de modo continuo y su escalamiento es sumamente sencillo, el rango del flujo de alimentación seca varía desde 50 a 350 t/h. Para lograr la fusión se utilizan quemadores de concentrado que se ubican en el techo de la torre de reacción.

A nivel energético, el horno es autógeno, puesto que utiliza el calor producido en las reacciones de la alimentación y el oxígeno. La escoria resultante tiene una temperatura alrededor de los 1.300 °C y el eje cerca de 1.230 °C.

Del contacto del concentrado y el oxígeno alimentado, se producen las siguientes reacciones:



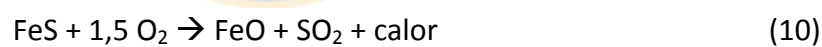
Además, se forma escoria y magnetita a lo largo del proceso, gracias a las siguientes reacciones:



### 2.1.1.2 Convertidor Pierce-Smith (CPS)

Se trata de un reactor capaz de convertir el metal blanco a partir de mate proveniente del CT y el eje del HF con aire soplado rico en oxígeno (29%), además de sílice. Al igual que el Convertidor Teniente, las toberas, una vez introducidas en el mate, proceden a la oxidación del hierro y azufre restante. A diferencia del convertidor nombrado anteriormente, el proceso de este es Batch, es decir, que a lo largo de su funcionamiento no se carga material de forma continua. La temperatura de trabajo, 1.250 °C, se logra mantener gracias a las reacciones de oxidación del hierro y azufre.

Estas son:



El principal producto de este convertidor es cobre blíster, escoria (que es enviada a otro tratamiento para recuperar el cobre) y gases que en su mayoría corresponde a SO<sub>2</sub>. La capacidad del reactor es entre 300 y 700 t/día.

Una vez realizado el proceso se obtiene cobre blíster, escoria, junto a residuos de magnetita, y gases.

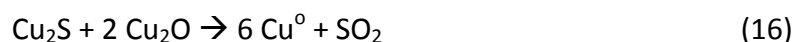
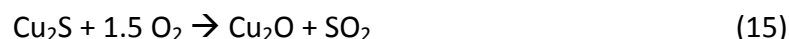
La reacción que ocurre a nivel más importante es:



Las reacciones de formación de la escoria son:



Después de la remoción del hierro, ocurre la etapa de coppermaking y sus reacciones son:



## 2.2 Marco teórico

### 2.1.3 Lixiviación

La lixiviación es la disolución de los constituyentes de un mineral en una solución mediante un proceso de reacciones química y electroquímica y de transporte de materia. En términos generales, consiste en la remoción de una o varias sustancias solubles, mediante la acción de un agente lixivante que disuelve la sustancia o metal de interés, permitiendo su recuperación desde el mineral.

La lixiviación constituye la operación principal de la ruta hidrometalúrgica para el tratamiento de minerales oxidados de cobre y es aplicable sólo en ciertos casos, que en general, dependen del tipo de mineral, la ley de cobre, la disponibilidad del agua, terreno, etc.

Existen diversos procesos de lixiviación, y la elección de uno de ellos va a depender principalmente de la ley del mineral, la mineralogía, la granulometría, el tipo de contacto entre la solución lixivante y el mineral a tratar, entre otros y en general, se clasifican en lixiviación de lecho fijo o por percolación, lixiviación agitada o en reactores y lixiviación bacteriana <sup>[6]</sup>.

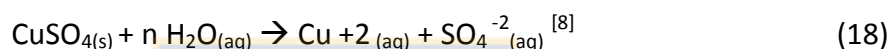
La lixiviación es fundamentalmente un proceso de transferencia de masa sólido-líquido. La lixiviación puede ser llevada a cabo en condiciones ambientales o a temperaturas elevadas y/o bajo presión. Las condiciones del proceso dependerán de las reacciones químicas que están teniendo lugar. El objetivo en todos los casos es obtener iones metálicos o complejos que puedan ser extraídos selectivamente desde la solución <sup>[7]</sup>.

Los polvos producidos por los tres reactores de la fundición, descritos anteriormente, son en su gran mayoría elementos oxidados y sales sulfatadas. Por ende, son dos tipos de lixiviaciones las que tienen lugar en el proceso:

- Disolución de sales
- Disolución ácida

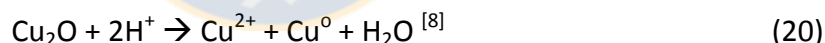
### 2.1.3.1 Disolución de sales

Se aplica principalmente a sales minerales que se disuelven fácilmente en agua. En la naturaleza es difícil encontrar yacimientos con minerales de este tipo, pero, la mena puede ser sometida a algún proceso previo que transforme los minerales a sales solubles en agua (productos de tostación). Por ejemplo:



### 2.1.3.2 Disolución ácida

Se aplica a gran parte de los óxidos metálicos existentes en la naturaleza. Generalmente se utiliza ácido sulfúrico por su bajo costo, disponibilidad, fácil manipulación y características químicas. También se utiliza ácido clorhídrico, ácido nítrico y mezclas entre ellos. Por ejemplo:



El objetivo del proceso de lixiviación es obtener una solución que contenga iones metálicos o complejos iónicos con los metales de interés, para ser extraídos selectivamente desde la solución en la siguiente etapa de recuperación.

La solución descrita anteriormente se conoce como PLS y puede tener origen en diferentes unidades de lixiviación (pilas, bateas, reactores, etc.). Esta es rica en cobre proveniente de minerales de cobre lixiviables.

### 2.1.4 Lixiviación por agitación

La lixiviación por agitación está limitada al tratamiento de aquellas menas o fracciones de menas que debido a sus características mineralógicas o granulometría no pueden ser tratadas efectivamente por lixiviación en pilas o lixiviación en bateas. En el caso del cobre se aplica a menas de ley relativamente alta que no responden bien a la lixiviación en un lecho de material, como es el caso de menas con diseminación muy fina o que generan demasiados finos durante la reducción de tamaño y por lo tanto forman lechos de baja porosidad, o menas que presentan una alta desintegración en contacto con las soluciones de lixiviación. También se usan para tratar colas de flotación de minerales mixtos y puede emplearse para lixiviar concentrados o calcinas de tostación. En este proceso la disolución se efectúa en forma discontinua (batch) o continua manteniendo las partículas en suspensión en el solvente. Esto generalmente se realiza en estanques agitados y los sólidos se dispersan mediante la rotación de un impulsor o inyección de aire <sup>[7]</sup>.

## **2.1.5 Cinética química**

### **2.1.5.1 Definición**

La cinética de lixiviación de minerales es un área de la fisicoquímica que determina las velocidades y mecanismos de una reacción de disolución de los metales de interés. La información que entrega la cinética permite diseñar equipos y procesos más eficientes. Además, permite predecir la velocidad de extracción según condiciones como la temperatura, concentración del agente lixivante, tiempo de residencia, etc.

La disolución de los minerales de cobre, consiste básicamente en una descomposición de minerales oxidados y una reacción óxido-reducción (reacción electroquímica) cuando se trata de sales sulfatadas, los productos de estas reacciones son solubles en agua.

La velocidad de la reacción está compuesta por la rapidez de formación de los productos y la de descomposición de los reactivos. Depende de diversos factores, tales como la concentración, el estado físico y la superficie de contacto de los reactivos y productos, temperatura, presencia de un catalizador, tiempo de residencia y granulometría del material. Se considera que el primero, tiene mayor importancia.

Es necesario tener en consideración que para conocer la velocidad de la reacción se debe estudiar la variación de la concentración de uno de los reactivos o de los productos a lo largo del tiempo.

Para la reacción general:



Se cumple:

$$v = - \frac{dC_A}{dt} \quad 1)$$

$v$ : Rapidez media de la reacción.

$\frac{dC_A}{dt}$ : Disminución de la concentración del reactivo A en un tiempo.

Por otro lado, la velocidad y la estequiometría se relacionan de la siguiente manera para la reacción general:

$$v = - \frac{1}{a} \frac{dC_A}{dt} = - \frac{1}{b} \frac{dC_B}{dt} = \frac{1}{c} \frac{dC_C}{dt} = \frac{1}{d} \frac{dC_D}{dt} \quad 2)$$

Se cumple que la velocidad de la aparición de un producto es la misma que la desaparición del reactivo, por lo tanto, la velocidad de una reacción es proporcional a concentración de reactivos y que la constante de proporcionalidad  $k$  recibe el nombre de constante de velocidad. Se define entonces, la ley de velocidad que expresa la relación de la velocidad de una reacción con la constante de velocidad y la concentración de los reactivos, elevados a alguna potencia, denominados órdenes parciales de reacción. Para la reacción general:

$$v = k [A]^\alpha [B]^\beta \quad 3)$$

donde

$[A], [B]$ : concentración de los reactivos.

$k$ : constante cinética.

$\alpha, \beta$ : coeficiente cinético.

Conociendo  $k$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ , se puede utilizar la ecuación 3) para calcular la velocidad de la reacción dada las concentraciones de A y B.

Los exponentes  $\alpha$  y  $\beta$  especifican las relaciones entre las concentraciones de A, B y la velocidad de reacción. Al sumarlos, se obtiene el orden de reacción global, que se define como la suma de los exponentes a los que se elevan todas las concentraciones de reactivos que aparecen en la Ley de velocidad. Para la ecuación 3), el orden de reacción global es  $\alpha+\beta$ . De manera alternativa puede decirse que la reacción es de orden  $\alpha = 0$  en A, de orden  $\beta = 0$  en B y de orden  $(\alpha+\beta) = 0$  global.

Una reacción de primer orden es una reacción cuya velocidad depende de la concentración de los reactivos elevada a la primera potencia. En una reacción de primer orden del tipo:



La velocidad es:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} \quad (4)$$

A partir de la Ley de velocidad se tiene que:

$$v = k[A] \quad (5)$$

Al combinar las dos ecuaciones para la velocidad, se obtiene:

$$k[A] = -\frac{d[A]}{dt} \quad (6)$$

Mediante cálculos, es posible demostrar que:

$$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kt \quad (7)$$

donde

$[A]$ : concentración de A para  $t=t$

$[A]_0$ : concentración de A para  $t=0$

Al re ordenar se obtiene la recta del tipo  $y = mx + b$  donde la pendiente corresponde a la constante de velocidad,  $k$ :

$$\ln[A] = -kt + \ln[A]_0 \quad (8)$$

$\ln[A]$ : y



$-k: m$

$\ln[A]_0: b$

Una reacción de segundo orden es una reacción cuya velocidad depende de la concentración de uno de los reactivos, elevada a la segunda potencia, o de la concentración de dos reactivos diferentes, cada uno elevado a la primera potencia. El tipo más sencillo comprende sólo una clase de molécula como reactivo que en términos generales puede representarse por la reacción (24).

donde:

$$v = -\frac{d[A]}{dt} \quad 9)$$

A partir de la Ley de velocidad:

$$v = k[A]^2 \quad 10)$$

Otro tipo de reacción de segundo orden es:



Y la Ley de velocidad:

$$v = k[A][B] \quad 11)$$

La reacción es de primer orden respecto de A y de primer orden respecto de B, por lo que tiene orden global 2.

Por medio de cálculos, se obtiene la siguiente expresión para las reacciones de segundo orden del tipo "A → producto" <sup>[9]</sup>:

$$\frac{1}{[A]} = \frac{1}{[A]_0} + kt \quad 12)$$

### 2.1.6 Concentración de los reactivos

La teoría cinética molecular de los gases establece que las moléculas de los gases chocan fuertemente unas contras otras, por lo tanto las reacciones químicas suceden como resultado de las colisiones entre las moléculas de los reactivos. En términos de la teoría cinética la velocidad de una reacción es directamente proporcional al número de colisiones moleculares

por segundo o a la frecuencia de las colisiones moleculares lo que explica la dependencia de la velocidad de reacción con la concentración.

$$v \propto \frac{\text{número de colisiones}}{s} \quad 13)$$

De esto se desprende que al aumentar la cantidad de reactivo aumenta el número de colisiones moleculares y, por ende, la cinética de la reacción.<sup>[9]</sup>

#### 2.1.6.1.1 Tiempo de lixiviación

El tiempo necesario para una disolución debe ser aceptable, ya que tiene una repercusión en los costos económicos. Por ende, la cinética de disolución determina el tiempo óptimo de residencia en el reactor. El objetivo es un proceso rápido, pero además con recuperaciones elevadas.



## CAPÍTULO 3

### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Para proponer opciones de mejoras en la PTP de ECL, se estudió el comportamiento disolutivo de los polvos provenientes de DCH en un proceso de lixiviación, por lo que se diseñaron cuatro baterías de prueba a escala laboratorio, conformadas entre ocho y veinte pruebas de lixiviación, las que a su vez se subdividieron en tres pruebas cada una. Las condiciones de trabajo del diseño estándar de la pruebas fueron fijadas de acuerdo a requerimientos definidos anteriormente por la Planta Piloto, sin embargo algunas de estas variables fueron modificadas, tales como: tiempo de residencia, concentración del ácido sulfúrico y composición de mezclas de polvos; con el fin de observar el comportamiento disolutivo del cobre y así comprobar si hubo una mejora en la recuperación de éste, un aumento en la capacidad de tratamiento, una disminución de costos y/o una mejora en la mantención de los equipos.

Para evaluar la eficiencia del proceso se realizaron balances de masa y los análisis químicos del proceso en términos generales y de cada etapa. Para estudiar la factibilidad de mejoras, se realizó el cálculo de recuperación por etapa y acumulada.

A continuación, se presenta una descripción del equipamiento, montaje experimental, metodología y condiciones en la que fueron realizadas las pruebas.

#### 3.1 Pruebas de lixiviación

El equipamiento, materiales e insumos utilizados en este tipo de pruebas fueron:

##### 3.1.1 Equipos asociados.

- Manto calefactor con regulador.
- pH-metro Schott con sensor y rectificador de temperatura.
- Medidor de potencial RedOx con electrodo combinado de Ag/AgCl.
- Termocupla.
- Filtro al vacío (bomba de vacío).

- Balanzas de 500 g y 6.000 g.
- Agitadores mecánicos, con hélices de cuatro aspas de 45°.
- Motor de agitación desde 0 a 700 rpm a 50 Hz con conexión a 220 V.

### 3.1.2 Materiales asociados.

- Reactores cilíndricos de 5 Litros cerrados con tapa de vidrio y entradas.
- Embudo Buchner de 9 y 18,5 cm.
- Matraz Kitazato de 5 L.

### 3.1.3 Insumos

- Polvos de fundición de origen CT, HF, CPS y ZT.
- Ácido de planta.
- Agua acidulada a 3 g/L.
- Agua.

### 3.1.4 Descripción general de la prueba de lixiviación en laboratorio

El diseño de las pruebas de lixiviación realizadas en el laboratorio de la Planta Piloto de ECL correspondió a un test de extracción máxima, cuyo objetivo fue conocer la cantidad máxima de cobre posible de recuperar desde los polvos.

Para realizar todas las lixivaciones de una prueba se procedió a tarar el reactor cerrado con el agitador y la termocupla, este se montó en un manto calefactor, que inicialmente brindó solamente estabilidad al reactor; y posteriormente, se instaló el equipo de agitación mecánica. Una vez organizado todo el material, se agregó el agua y luego el ácido sulfúrico según las cantidades requeridas para lograr la concentración deseada y completar los 5 L de pulpa. Cuando el agua acidulada estuvo homogenizada producto de la agitación, se agregaron los polvos provenientes de la fundición. En ese momento se dio por iniciada la primera etapa de lixiviación, por lo tanto, con una probeta se extrajeron 25 mL de pulpa del reactor que fue filtrada para medir el potencial Redox y el pH del PLS obtenido. Paralelamente se registró la

temperatura del proceso. Estas mediciones se realizaron cada 30 minutos. Luego de concluida la esta primera lixiviación, según el diseño de las pruebas, se procedió a la separación sólido-líquido con ayuda de un Kitasato y una bomba de vacío. Fue necesario masar el sólido obtenido para posteriormente calcular el porcentaje de humedad de la borra.

Por otro lado, del queque resultante de la filtración se retiraron 50 g que se repulpearon con agua acidulada y posteriormente con agua desmineralizada para ser llevados al horno secado durante 1,5 h. Finalmente, la muestra fue pulverizada y enviada a análisis químico, además, con ayuda de un picnómetro se obtuvo la gravedad específica de dicha muestra. Con estos datos se calcularon las cantidades de agua y ácido necesarias para la lixiviación siguiente.

El procedimiento descrito anteriormente se repitió al iniciar cualquier lixiviación, la única diferencia que se presentó fue que una de las entradas de la primera lixiviación fueron polvos, mientras que en la segunda y tercera fueron borras húmedas producto de la lixiviación anterior.

En las Figuras de 6 a 8 se muestran distintos momentos del desarrollo de las pruebas.



**Figura 6. Agitación durante la lixiviación primaria realizada en un reactor de vidrio de 5 L y un manto calefactor que no proporciona temperatura en este caso.**

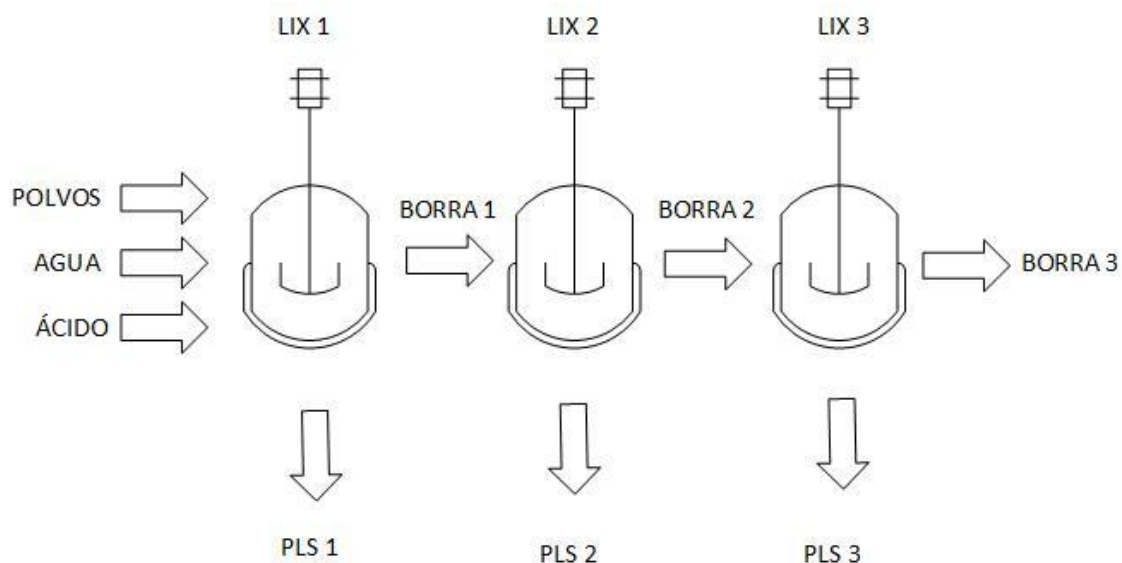


**Figura 7. Filtración de la borra resultante de una segunda lixiviación realizada con un Kitasato y una bomba de vacío.**



**Figura 8. Filtración de muestras tomadas con diferencia de media hora para medir la variación del potencial Redox y el pH durante una lixiviación primaria.**

En la Figura 9 se muestra esquemáticamente el diseño de las pruebas de lixiviación a escala de laboratorio. En el Anexo 7.3 se explica detalladamente la metodología experimental empleada en cada una de las pruebas.



**Figura 9. Diagrama de Flujo de pruebas de lixiviación.**

Una de las diferencias importantes que existe entre la Planta Industrial y las pruebas de laboratorio es el descarte de PLS. Puesto que, en el laboratorio se descarta el PLS obtenido por cada etapa, en cambio, en la PTP se recircula el PLS de la última etapa y la pulpa resultante de la primera lixiviación se somete a una segunda lixiviación, después de una clasificación de tamaño.

## 3.2 Descripción de las baterías de pruebas

### 3.2.1 Set 1

El primer set de pruebas consistió en lixiviar por separado los polvos constituyentes de la TT, es decir, solubilizar los polvos CPS, CT y HF, además de los ZT provenientes del botadero. Cada una de estas pruebas se realizó en un proceso alternativo, sustituyendo el agente lixivante de la primera etapa por agua, sin embargo, las condiciones de acidez de la etapa secundaria y terciaria, se mantuvieron.

Las condiciones experimentales rigieron para los sets de pruebas 2 y 3.

**Tabla 4. Condiciones experimentales estándar bajo las cuales se realizan los sets de pruebas 1, 2 y 3.**

Condiciones	Lix 1	Lix 2	Lix 3
Temperatura °C	ambiente	ambiente	70
Tiempo de residencia h	2,5	2,5	4,5
Velocidad de agitación rpm	300	300	300
% sólido	20%	Sin ajuste	Sin ajuste
Acidez g ácido/L agua	60	100	300

Las condiciones experimentales por las cuales se rigen las lixivaciones de la primera batería de prueba están definidas en las

Tabla 4 y Tabla 5, dicho proceso se realizó con el fin de observar el efecto de la acidez del agente lixivante utilizado a lo largo de la etapa primaria ya sea de manera particular en la primera disolución y a nivel de las recuperaciones globales.

**Tabla 5. Condiciones experimentales bajo las cuales se realizan los sets de pruebas 1. Proceso alternativo.**

Condiciones	Lix 1	Lix 2	Lix 3
Temperatura °C	ambiente	ambiente	70
Tiempo de residencia h	2,5	2,5	4,5
Velocidad de agitación rpm	300	300	300
% sólido	20%	Sin ajuste	Sin ajuste
Acidez g ácido/L agua	0	100	300

### 3.2.2 Set 2

Según el estudio realizado de la composición y masas de los polvos transportados por los camiones provenientes de DCH, se definieron distintas mezclas representativas de los polvos alimentados al silo. Como los residuos provenientes de la TT no tienen una proporción definida, se diseñaron tres mezclas representativas en base a los flujos ingresados, como se observa en la Tabla 6.

Apoyándose en los resultados obtenidos del set anterior, se diseñó un segundo set de pruebas para comprobar si la interacción entre los distintos tipos de polvos incide al momento de disolver el cobre.



**Tabla 6. Proporción de mezclas de polvos TT representativas del estudio de camiones.**

		CPS (%)	CT (%)	HF (%)
TT1	MÍNIMO	18%	19%	64%
TT2	MÁXIMO	17%	25%	58%
TT3	PROMEDIO	17%	22%	61%

Por otro lado, estas tres mezclas, fueron combinadas con polvos ZT en distintas razones de masa. En una primera instancia, las mezclas se compusieron de 50% de polvos ZT y 50% de polvos TT. El objetivo era observar los efectos producidos en la lixiviación frente a una importante presencia de polvos del botadero, ya que podrían implicar dificultades en el proceso.

Las últimas tres pruebas fueron diseñadas a partir de los resultados obtenidos en el análisis de la llegada de los camiones, dado que la media anual de los flujos que ingresaron reveló que un 30% de polvos correspondieron a ZT y el 70% restantes a polvos TT, estas mezclas son representativas de PTP.

**Tabla 7. Composición de polvos para cada mezcla del Set 2 de pruebas**

N° PRUEBA	D.POLVOS
M1	100% TT1
M2	100% TT2
M3	100% TT3
M4	50% TT1 - 50% ZT
M5	50% TT2 - 50% ZT
M6	50% TT3 - 50% ZT
M7	70% TT1 - 30% ZT
M8	70% TT2 - 30% ZT

La distribución de las mezclas utilizadas en cada prueba de este Set, se muestra detalladamente en el Anexo 7.4 en la Tabla 17.

La segunda batería de pruebas de lixiviación se rige bajo las mismas condiciones experimentales, que se utilizó para llevar a cabo el primer set de pruebas, que está en Tabla 4.

### 3.2.3 Set 3

Se observó el comportamiento disolutivo de los polvos haciendo variar el tiempo empleado en cada etapa del proceso. De ahí se realizaron pruebas de baja duración, desde 0.5 h por etapa, mientras que el proceso de duración más prolongada corresponde a la prueba estándar como se describe en la

Tabla 4. El objetivo fue evaluar la influencia del tiempo de lixiviación en la recuperación, y comprobar si es necesario mantener el diseño estándar de pruebas y así lograr una buena recuperación

Nuevamente se utilizaron mezclas de polvos basados en el estudio de flujos transportados por los camiones, sin embargo, en este set de pruebas se seleccionó sólo una mezcla de polvos TT por representar el promedio, la que luego se combinó en distintas proporciones con polvos ZT.

**Tabla 8. Diseño experimental de pruebas Set 3.**

n° de prueba	D. polvos	Lix 1	Lix 2	Lix 3
		Residencia h	Residencia h	Residencia h
C1	TT: 100%	0,5	0,5	0,5
C2	TT: 100%	1	1	1
C3	TT: 100%	1,5	1,5	2
C4	TT: 100%	2	2	3
C5	TT: 100%	2,5	2,5	4,5
C6	ZT: 100%	0,5	0,5	0,5
C7	ZT: 100%	1	1	1
C8	ZT: 100%	1,5	1,5	2
C9	ZT: 100%	2	2	3
C10	ZT: 100%	2,5	2,5	4,5
C11	TT: 50%, ZT:50%	0,5	0,5	0,5
C12	TT: 50%, ZT:50%	1	1	1
C13	TT: 50%, ZT:50%	1,5	1,5	2
C14	TT: 50%, ZT:50%	2	2	3
C15	TT: 50%, ZT:50%	2,5	2,5	4,5
C16	TT: 70%, ZT: 30%	0,5	0,5	0,5
C17	TT: 70%, ZT: 30%	1	1	1
C18	TT: 70%, ZT: 30%	1,5	1,5	2
C19	TT: 70%, ZT: 30%	2	2	3
C20	TT: 70%, ZT: 30%	2,5	2,5	4,5

### 3.2.4 Set 4

Las siguientes pruebas se realizaron con el objetivo de verificar si la disminución de la concentración del agua acidulada utilizada en una primera etapa repercute en las recuperaciones cuando los distintos polvos interactúan entre ellos en una mezcla. La distribución de polvos que se utilizaron se describe en la Tabla 9.

**Tabla 9. Diseño experimental de pruebas Set 4.**

N° PRUEBA	D.POLVOS
P1	100% TT1
P2	100% TT2
P3	100% TT3
P4	50% TT1 - 50% ZT
P5	50% TT2 - 50% ZT
P6	50% TT3 - 50% ZT
P7	70% TT1 - 30% ZT
P8	70% TT2 - 30% ZT
P9	70% TT3 - 30% ZT

En la Tabla 10 se observa que las pruebas se realizaron disminuyendo la concentración del agua acidulada a la mitad en la etapa primaria en relación al diseño estándar.

**Tabla 10. Condiciones experimentales bajo las cuales se realizó el set de pruebas 4.**

Condiciones	Lix 1	Lix 2	Lix 3
Temperatura °C	ambiente	ambiente	70
tiempo de residencia h	2,5	2,5	4,5
Velocidad de agitación rpm	300	300	300
% sólido	20%	Ajuste	Ajuste
Acidez g ácido/L agua	30	100	300

La eficiencia de las lixiviaciones realizadas en laboratorio se evaluó a partir de la cuantificación de los resultados obtenidos en cada etapa del proceso y de manera global, en cuanto a la recuperación de cobre y arsénico, pérdida de masa, velocidad de disolución del cobre, arsénico y masa. Los que se obtuvieron conforme a las siguientes fórmulas:

$$\%Rec_{Cu} = \frac{\text{masa de Cu}_{\text{en solución que sale del circuito}}}{\text{masa de Cu}_{\text{contenida en los polvos que ingresan al circuito}}} * 100 \quad 14)$$

La recuperación de cobre es la razón entre la cantidad de cobre que originalmente está en estado sólido y es removido por efecto del agente lixivante queda en solución a lo largo de una etapa y la masa de cobre total que se encuentra en los polvos antes de cualquier tratamiento.

$$\%Rec_{As} = \frac{\text{masa de As}_{\text{en solución que sale del circuito}}}{\text{masa de As}_{\text{contenida en los polvos que ingresan al circuito}}} * 100 \quad 15)$$

La recuperación de arsénico es la razón entre la cantidad de arsénico que originalmente está en estado sólido y es removido por efecto del agente lixivante queda en solución a lo largo de una etapa y la masa de arsénico total que se encuentra en los polvos antes de cualquier tratamiento.

$$\%Pérdida\ de\ masa = \frac{\text{masa total}_{\text{en solución que sale del circuito}}}{\text{masa total}_{\text{polvos que ingresan al circuito}}} * 100 \quad 16)$$

La pérdida de masa es la razón entre la cantidad de masa total de polvos que originalmente está en estado sólido y por efecto del agente lixivante queda en solución a lo largo de una etapa y la masa total de polvos antes de cualquier tratamiento.

$$v_{\text{disolución del elemento de interés}} = \frac{\text{masa total}_{\text{disuelta del elemento de interés}}}{\text{tiempo total}_{\text{disolución del elemento de interés}}} \quad 17)$$

La velocidad de disolución de alguna especie es la razón entre la masa total del elemento de interés que se disuelve por efecto del agente lixivante durante una etapa y el tiempo total de dicha etapa.

$$\%Rec_{\text{teórica}} = \sum \text{masa}_{\text{total de polvos}} * \%Rec_{\text{polvo}} * \% \text{tipo de polvo}_{\text{en mezcla}} \quad 18)$$

La recuperación teórica es la sumatoria de la multiplicación de la masa de polvo total con la que se trabaja, la recuperación que se obtuvo de la lixiviación de cada polvo por separado y la cantidad en porcentaje del polvo en la mezcla.



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 4.1 Análisis químico elemental de polvos ZT, CT, HF y CPS

En la Tabla 11 se observa la composición química elemental de los distintos polvos que ingresan a la PTP de ECL. El análisis presenta el total del elemento que se encuentra en los polvos. Se aprecia que los polvos ZT y HF son de una alta ley de cobre (23 y 22% respectivamente), mientras que los provenientes de los convertidores tienen una ley del rango de 5%. La situación inversa ocurre en lo que concierne al arsénico, puesto que los polvos CT y CPS presentan mayor ley (18 y 21%, respectivamente), mientras que los HF y ZT presentan entre 6 y 8% de arsénico total.

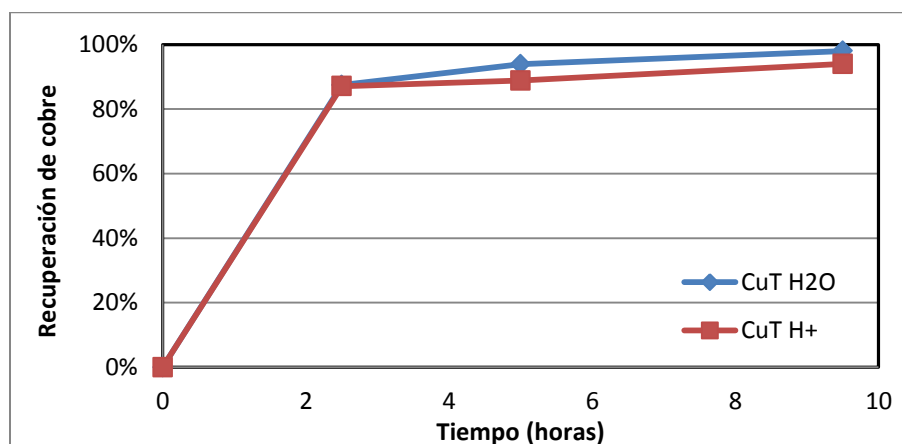
**Tabla 11. Análisis químico elemental por elemento de cada polvo que ingresa a la PTP**

	ZT	CT	HF	CPS
Analito	%	%	%	%
Cu	23,21	5,15	22,34	4,38
Fe	12,35	0,98	12,85	0,41
As	7,9	17,54	5,97	20,85
Sb	0,3	1,27	0,22	0,83
Bi	0,19	0,76	0,11	0,9
G.E g/mL	3,58	3,77	3,9	3,51

#### 4.2 Set 1

##### 4.2.1 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos CPS

En la Figura 10 se muestra la disolución de cobre total obtenida de la lixiviación de polvos CPS, la diferencia entre las curvas es la acidez que se emplea para lixiviación primaria. La curva azul grafica un proceso en que la lixiviación primaria se realizó con agua, en cambio la curva roja representa un proceso con una lixiviación primaria de medio acidulado. Se observa que el comportamiento de la primera lixiviación alcanza el 87% de recuperación, en ambas pruebas. La cinética de la reacción de disolución de cobre también resulta ser las misma, 17,88 g/h, y se considera rápida, en relación a las velocidades observadas en las etapas posteriores.



**Figura 10. Disolución del cobre de polvos CPS a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.**

El análisis químico elemental de los polvos CPS utilizados no coincide con el análisis de elementos típicos de estos polvos que se observa en la Tabla 12.

**Tabla 12. Análisis químico elemental de polvos producidos por el CPS de Paipote.**

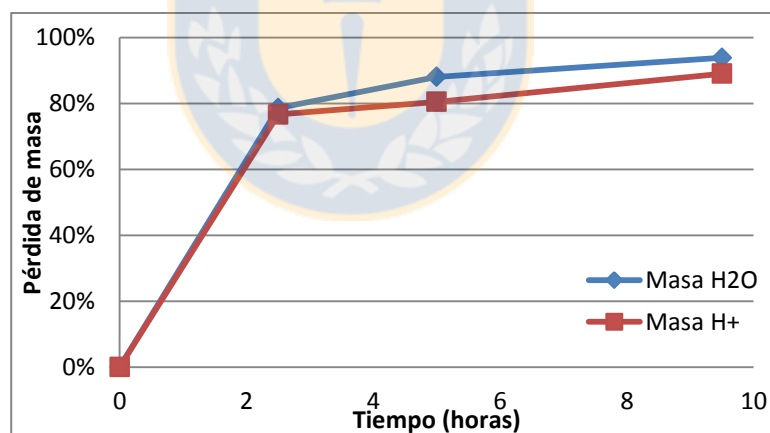
Analito	%
Cu	33,95
Fe	4,52
As	0,85
Bi	0,1
Sb	0,032

En cuanto a los resultados de la segunda lixiviación realizada, después de la lixiviación con agua se aprecia que hay un aumento de 7 puntos en términos de recuperación global, desde 87% a 94%. En cambio, cuando a la etapa siguiente a la lixiviación primaria realizada con agua acidulada, se observa que la disolución de cobre total aumenta sólo 2 puntos porcentuales, desde 87% a 89%, considerándose menos efectiva. Además, las velocidades de disolución presentan valores distintos, la cinética resultante para la prueba CPS + Agua es 1,32 g/h, mientras que para CPS + Agua Acidulada es de 0,36 g/h.

Producto del cambio de las variables de temperatura y concentración del reactivo lixivante en la última etapa se logra mantener una cinética de disolución similar a la de la etapa

precedente, aun cuando ha disminuido la cantidad de cobre a disolver. La lixiviación primaria realizada con agua, al final del proceso, logra obtener una recuperación global de cobre prácticamente completa, 98%. En cambio, aquella realizada con agua acidulada durante sus 3 etapas alcanza una recuperación de 94%. Aunque la diferencia de recuperación es importante entre ambos procesos, es necesario considerar que la presencia de polvos CPS en la PTP es sólo de un 12%, aquel con menor incidencia de masa.

De la Figura 11, se infiere que la pérdida de masa global a lo largo del proceso presenta 5 puntos porcentuales de diferencia, puesto que uno alcanza 89% y el otro 94%, siendo más efectiva cuando se usa agua como agente lixivante en una primera instancia. Las velocidades de disolución de la primera etapa son 367 y 358 g/h para CPS + Agua y CPS + Agua Acidulada respectivamente, mientras que aquellas asociadas a la disolución secundaria son lentas en relación a la etapa precedente (44 y 18 g/h), considerándose como una etapa poco eficiente, un fenómeno similar ocurre en la etapa final del proceso.

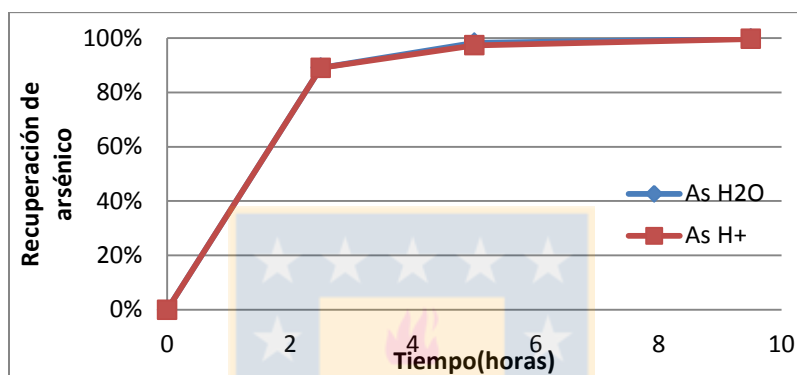


**Figura 11.** Disolución de masa de polvos CPS a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

Para el arsénico, se aprecia en la Figura 12 que hay una rápida descomposición durante la etapa primaria, alcanzando en ambos casos un 89% de recuperación en las primeras 2,5 h. En relación a las cinéticas resultante en las siguientes etapas, en ambos casos se logra una velocidad de 87 g/h, independiente del agente lixivante utilizado. En la segunda etapa, la recuperación entre ambas pruebas presenta una diferencia de un punto, alcanzando la



disolución casi total de los compuestos, ya que CPS + Agua logra disolver el 98% del arsénico y CPS + Agua Acidulada 97%. El aumento a lo largo de la lixiviación secundaria es menor a 10 puntos porcentuales, en consecuencia, se obtienen velocidades de reacción de lixiviación lentas en relación a la etapa anterior, además éstas son similares, 9 g/h para CPS + Agua y 8 g/h para CPS + Agua Acidulada. Finalmente, producto de la lixiviación terciaria se logra una disolución completa del arsénico proveniente de los polvos CPS, en ambos casos.



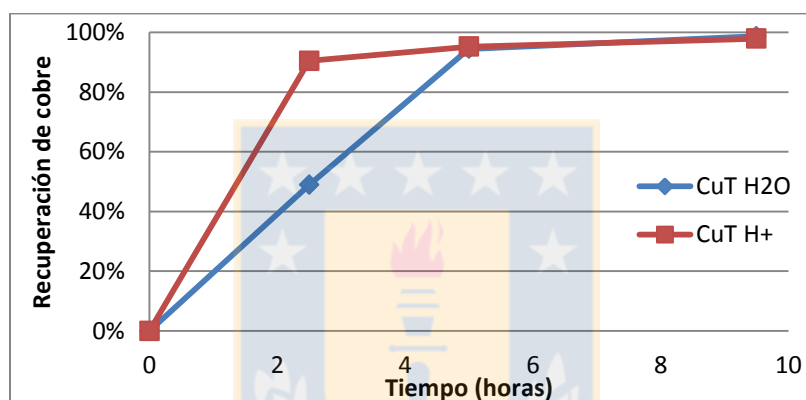
**Figura 12.** Disolución del arsénico de polvos CPS a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

Se deduce entonces, que la masa, el cobre y el arsénico contenidos en este tipo de polvos son de fácil disolución y presentan tendencias similares.

#### 4.2.2 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos CT

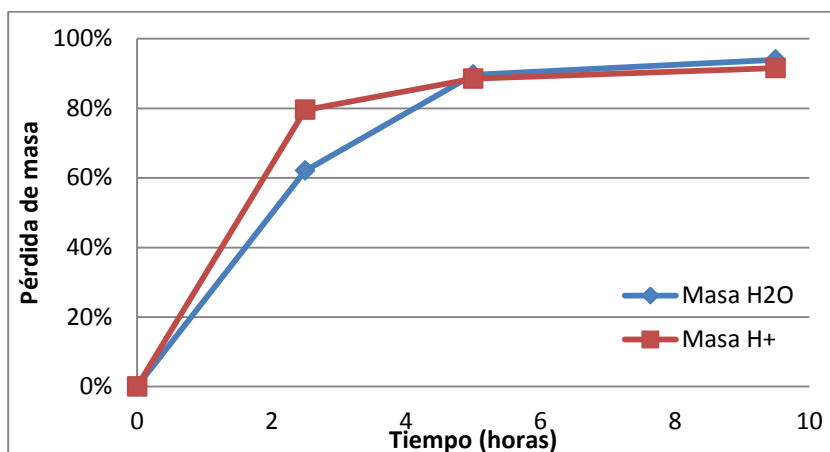
De las recuperaciones obtenidas de las lixiviaciones de los polvos CT con agua y con agua acidulada en una primera instancia, plasmadas en la Figura 13, se infiere que al solubilizar los polvos CT con agua la recuperación de cobre total es baja, del orden de 50%. En cambio, en presencia de agua acidulada se alcanza una disolución de cobre de alrededor 90%. Además, la velocidad de lixiviación de la prueba realizada con agua acidulada es más rápida (22 g/h) que aquella realizada con agua (12 g/h) Se observa, que producto de una segunda lixiviación las recuperaciones de cobre alcanzan valores elevados, con un punto porcentual de diferencia entre sí, para CT + Agua un 94% y para CT + Agua Acidulada un 95%. La diferencia de un punto porcentual en la recuperación global entre ambas pruebas se mantiene al finalizar el proceso, puesto que la prueba CT + Agua alcanza 99% y CT + Agua Acidulada un 98%. Además, se

considera despreciable, ya que se podría asociar a un mal manejo de los equipos e insumos al momento de la realización de la prueba o bien al análisis químico de las borras. Se observa que la curva roja presenta velocidades más lentas en las dos últimas etapas en relación a la primera lixiviación, pues gran parte del cobre queda en solución en una primera instancia. En cambio, la prueba realizada con agua en una primera instancia, logra mantener constante la cinética durante la segunda etapa en relación a la experimentada en la lixiviación primaria. Es importante tener en consideración la importancia de la primera lixiviación en medio acidulado, ya que se podría dar paso a una mejora en el diseño de las pruebas.



**Figura 13. Disolución del cobre de polvos CT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.**

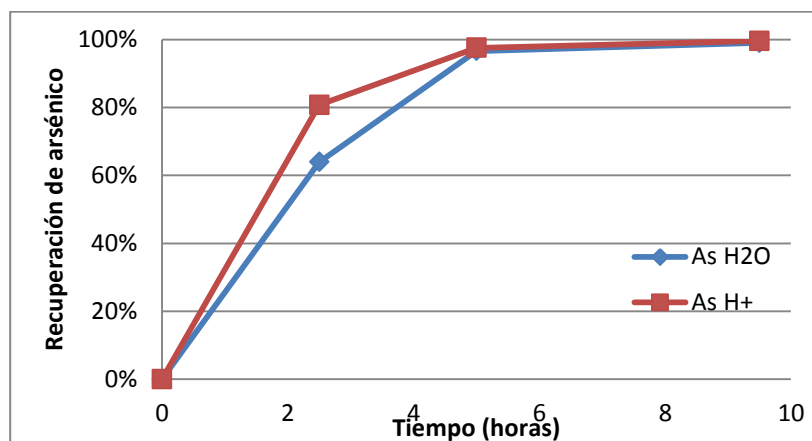
Por otra parte, los resultados de la pérdida de masa observados en la Figura 14 muestran que en la etapa primaria hay una pérdida de masa mayor al utilizar agua acidulada. La velocidad de reacción asociada a ésta prueba es más rápida en relación a su par con agua, 372 g/h, mientras que la cinética de la prueba que utiliza agua como agente lixivante es 291 g/h. De todos modos, al finalizar la segunda etapa se observa que el grado de disolución es prácticamente igual en ambos casos. Finalmente, la tercera lixiviación entrega como resultado una disminución considerable de la masa en los dos procesos y con una diferencia de 2 puntos porcentuales, pues la curva azul alcanza un 94% de pérdida de masa y la roja un 92%.



**Figura 14.** Disolución de masa de polvos CT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

Se aprecia en la Figura 15 que el arsénico presenta un comportamiento de carácter disolutivo más marcado en la lixiviación primaria realizada con agua acidulada alcanzando alrededor del 80%. En cambio, al disolver los polvos con agua, se observa que cerca del 65% es solubilizado. Esto se traduce en una diferencia en las cinéticas de lixiviación, puesto que la curva azul presenta una velocidad de 53 g/h, mientras que la roja una de 87 g/h. En una segunda etapa, ambas lixiviaciones alcanzan una recuperación de arsénico prácticamente total (97 y 98%). La lixiviación terciaria logra la disolución del 100% del arsénico y para la prueba CPS + Agua Acidulada un 99%.

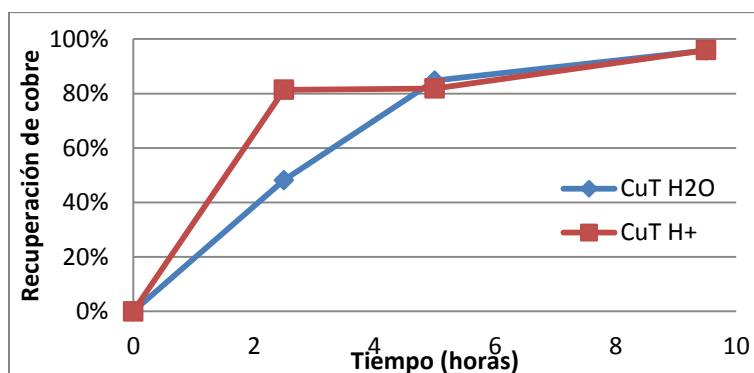
Éstos resultados indican que estos polvos podrían estar principalmente en forma de compuestos oxidados, puesto que se presentan más afines a disolverse frente al ácido que al agua. De todos modos, la disolución global para el cobre, masa o arsénico es similar.



**Figura 15.** Disolución del arsénico de polvos CT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

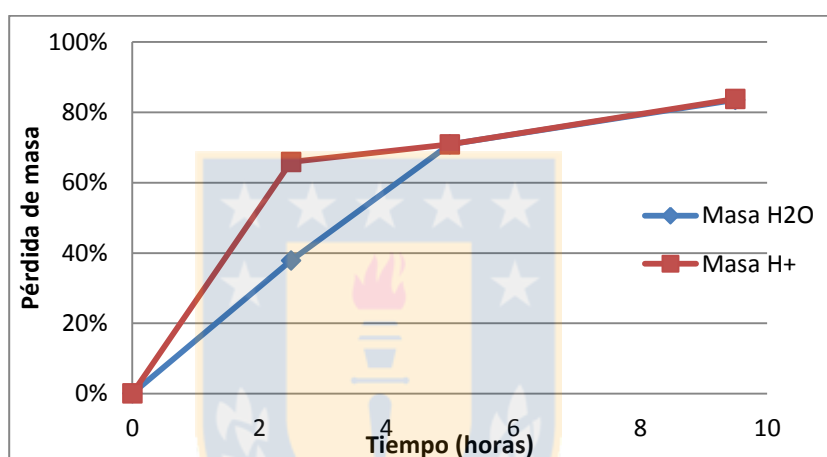
#### 4.2.3 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos HF

En la Figura 16, se observa que los polvos disueltos con agua en una primera instancia, representados por la curva azul, logran una recuperación del orden del 50% del cobre total. En cambio, aquellos disueltos con agua acidulada recuperan cerca del 80%, es decir, que en una primera etapa el agua acidulada es mucho más efectiva para solubilizar el cobre. Además, la velocidad de disolución que resulta al utilizar agua es mucho menor en comparación a la obtenida en la disolución (51 g/h vs 85 g/h). Al finalizar la segunda etapa, se observa que la recuperación obtenida es similar en ambos procesos, para HF + Agua se logra un 85% y para HF + Agua Acidulada un 82%. Por último, producto de la etapa final se aprecia que ambos procesos logran la misma recuperación.



**Figura 16.** Disolución del cobre de polvos HF a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

A partir de la Figura 17 se aprecia que la lixiviación primaria realizada con agua acidulada logra prácticamente doblar la pérdida de masa en comparación a la lixiviación primaria realizada con agua. Se observa gráficamente que la velocidad de lixiviación considerando la masa total es más rápida cuando esta se realiza con ácido sulfúrico, alcanzando una cinética de 310 g/h, mientras que aquella realizada con agua alcanza una velocidad de 178 g/h. Sin embargo, al terminar la segunda etapa ambos procesos logran alcanzar la misma pérdida de masa de polvos, 71%. Al finalizar la prueba, se logra la misma pérdida de masa, en ambos casos (84%).

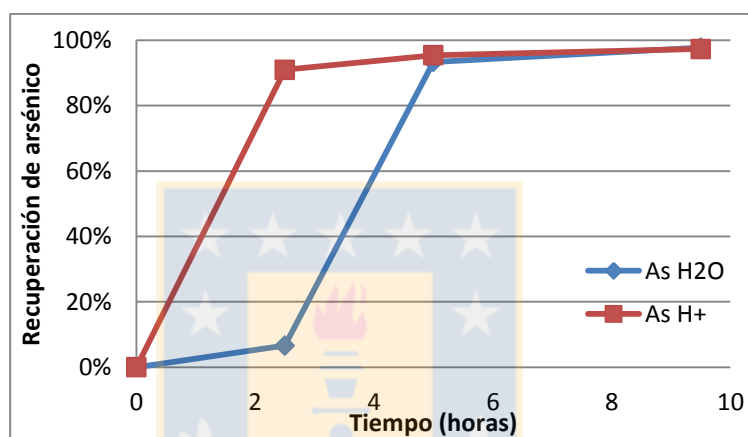


**Figura 17. Disolución de masa de polvos HF a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.**

Se observa en la Figura 18, que al solubilizar el arsénico con agua durante la primera lixiviación hay una recuperación del orden de 5%, este resultado se considera como poco confiable, ya que está muy por fuera de la tendencia que muestran todos los polvos. Esto podría asociarse a un mal manejo de equipos, pérdida de masa durante el procedimiento, como a errores de análisis químicos en laboratorio O bien, se podría asociar a compuestos de arseniatos, ya que estos son insolubles en agua. Sin embargo, se deduce que el comportamiento del arsénico es similar al observado para el cobre y la masa, en términos de la poca efectividad de la lixiviación primaria llevada a cabo con agua. Las velocidades de disolución que resultan distan entre ellas, estas son 2 g/h vs 26 g/h. Una vez finalizada la etapa secundaria se obtiene una recuperación similar en ambos procesos, con una diferencia de dos puntos porcentuales, la curva azul alcanza un 93% de disolución del arsénico total y la curva roja un 95%. La etapa

terciaria para el proceso tradicional logra una recuperación global de arsénico de 97%, mientras que para el alternativo un 98%

Según lo expuesto anteriormente, los residuos producidos por el HF son en gran parte óxidos, ya que su disolución es más rápida en agua acidulada que en agua. De todos modos, en términos globales, cualquiera sea el agente lixiviante utilizado, la recuperación final resulta ser la misma.



**Figura 18.** Disolución del arsénico de polvos HF a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

#### 4.2.4 Resultados de las pruebas de lixiviación de polvos ZT

La curva azul de la Figura 19 representa la recuperación de cobre total obtenidas de las tres lixiviaciones hechas a los polvos de la ZT, siendo la primera con agua. En cambio, la curva roja representa las recuperaciones de cobre total de las tres etapas disolutivas, en las cuales se ocupa como agente lixiviante agua acidulada en diferentes concentraciones. Se observa que hay una disolución de menos del 50% del cobre total en una primera instancia con agua, mientras que con agua acidulada es posible disolver un 70% del cobre presente originalmente en los polvos. Por consiguiente, la cinética de disolución representada por la curva azul es más lenta que aquella representada por la roja, 51 g/h vs 76 g/h, respectivamente.

Al finalizar la segunda etapa del proceso, se aprecia que hay un aumento de la cantidad del cobre disuelto en el proceso representado por la curva azul, alcanzando un 75%. Por otro

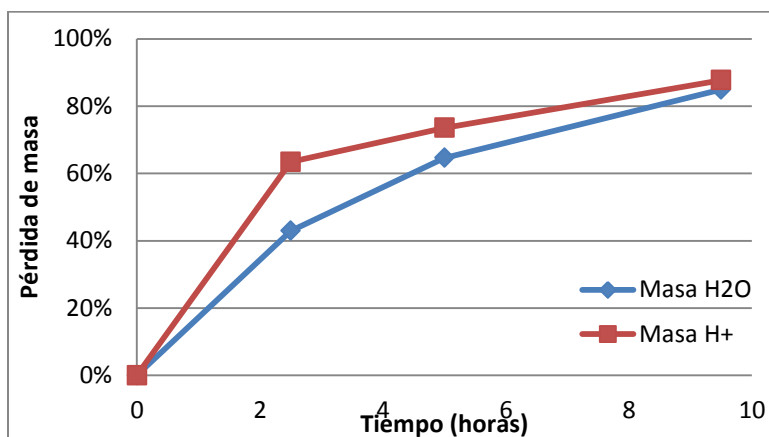
lado, la curva roja logra una recuperación de 82%, gracias al agua acidulada se observa que hay una disminución en la diferencia de recuperación de cobre al comparar ambos procesos.

La última etapa entrega una recuperación global de cobre de 92 y 95%, los mejores resultados se obtienen al tratar estos polvos con agua acidulada en todo momento, lo que indicaría que el cobre de los polvos ZT estaría compuesto por solubles oxidados.



**Figura 19. Disolución del cobre de polvos ZT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.**

En la Figura 20 se observa que hay una mayor pérdida de masa al utilizar agua acidulada en la etapa primaria, por ende, la velocidad de reacción de la lixiviación es mayor, 297 g/h, que al utilizar agua, ya que la cinética de disolución es 201 g/h. Durante la segunda etapa del proceso, se aprecia un aumento en la pérdida de masa, en ambos casos, aunque más significativo al tratar la borra resultante de la lixiviación con agua. En una última instancia, ambos procesos llegan a resultados similares, resultando ser levemente más eficiente en términos de pérdida de masa aquel proceso que utiliza agua acidulada en todas las etapas.

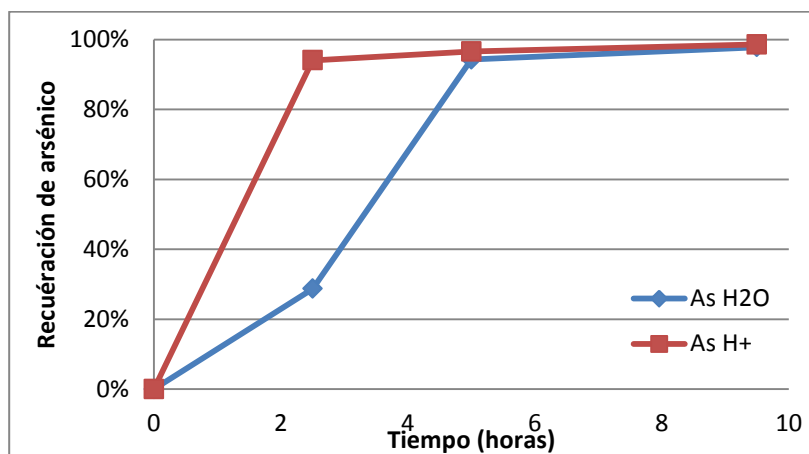


**Figura 20.** Disolución de masa de polvos ZT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

En cuanto al arsénico es posible notar que la disolución es mucho más eficiente cuando se realiza con agua acidulada la etapa primaria. Según la Figura 21, la recuperación de la lixiviación con agua acidulada es cerca de tres veces mayor a aquella realizada con agua. Por lo tanto, las velocidades resultantes de la etapa primaria son distintas: 35 g/h vs 11 g/h. Sin embargo, en una disolución secundaria se alcanzan recuperaciones de arsénico similares, 94% para el proceso alternativo y 97% para el proceso estándar. Se observa que la curva azul logra una cinética de más rápida que en la etapa precedente, 24 g/h, mientras que la curva roja presenta una velocidad prácticamente nula, 1 g/h. La lixiviación final logra una recuperación global casi total de 98 y 99% en ambos casos.

Se deduce que los polvos de la ZT contienen el cobre, el arsénico y la mayoría de sus compuestos probablemente en forma de óxidos. Por lo tanto, se observa que la recuperación de estos elementos es levemente más efectiva al trabajar durante las tres etapas con agua acidulada.





**Figura 21.** Disolución del arsénico de polvos ZT a lo largo de las tres etapas de lixiviación con distintos agentes lixiviantes para la etapa primaria.

En la Figura 22 se observa un análisis realizado con QEMSCAN de polvos de fundición, se sabe que los polvos tienen una mineralogía compleja debido a las condiciones de temperatura y presión que se presentan durante su génesis. Por lo consiguiente, al estudiar la composición de los polvos de fundición es posible observar que hay distintos compuestos ocluidos en una misma partícula, tal y como se observa en la siguiente imagen.



**Figura 22.** Imagen del análisis de polvos de Fundición realizado por QEMSCAN, se identifican múltiples fases (As-S, Cu-Fe-As-S, Fe-Sulfato, Cu(Fe)-Sulfato).

A partir de esto, se deduce que el ácido sulfúrico logra lixiviar inicialmente los compuestos que están en las capas externas de la partícula, logrando así exponer a una disolución a los compuestos ocluidos. Por ende, el agua acidulada asegura en cierto grado la exposición de los compuestos ocluidos en la partícula de polvo para una posterior lixiviación. Esto explica por qué la etapa primaria con agua acidulada, la mayoría de las veces es más eficaz al disolver cobre, masa total y arsénico que aquella que se realiza con agua. Como así también

explica que en presencia de otro tipo de compuestos (arseniato) las respuestas sean comparativamente diferente y menor.

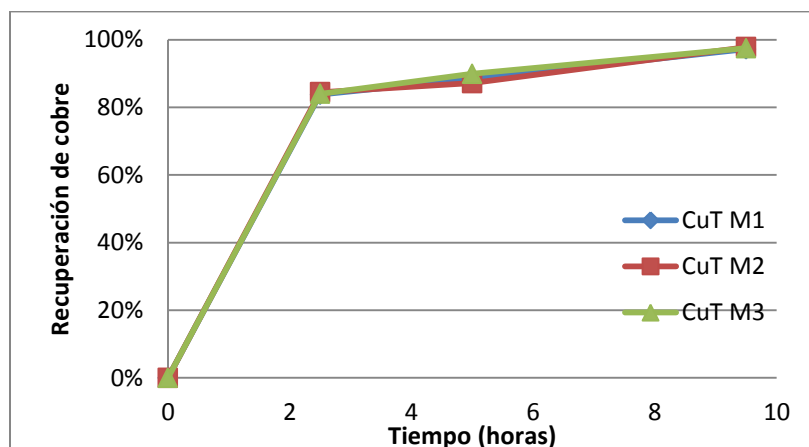
Se observa que, al trabajar con agua acidulada en una primera instancia, la velocidad de lixiviación que se logra en la segunda etapa disminuye considerablemente. En cambio, al utilizar como agente lixivante agua para la etapa primaria, se observa que la velocidad de disolución se mantiene constante. Esto se debe a que el ácido sulfúrico logra solubilizar en una primera instancia mayor cantidad, ya sea de cobre, masa o arsénico, que el agua. Por lo tanto, el trabajo para el agua acidulada de la segunda lixiviación es menor, puesto que gran parte de los polvos ya están disueltos. Sin embargo, cuando se utiliza agua, no es posible disolver una gran cantidad de compuestos, por ende, la etapa secundaria al contener ácido, logra lixiviar el remanente de cobre, arsénico y polvo en general.

### 4.3 Set 2

#### 4.3.1 Resultados de pruebas M1, M2 y M3

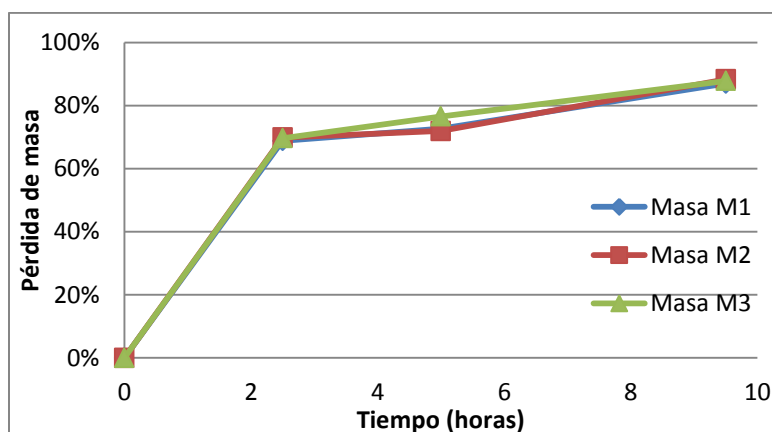
Se observa en la representación gráfica de la Figura 23, que al lixiviar las mezclas M1 (18% CPS, 19% CT y 64% HF), M2 (17% CPS, 25% CT y 58% HF) y M3 (17% CPS, 22% CT y 61% HF), se repite un mismo comportamiento disolutivo. Esta similitud se debe a que las muestras mezclas son prácticamente iguales. En el primer tramo de la curva, la pendiente es más elevada, en relación a las pendientes de las dos etapas siguientes, éstas fluctúan entre 66 y 69 g/h. Además, se observa que las tres pruebas logran el mismo porcentaje de recuperación en una primera instancia de solubilización, 84%. Al concluir la segunda etapa de lixiviación del proceso, se deduce que las disoluciones de cobre disminuyen su velocidad, en relación a la etapa precedente. Esto se traduce en un aumento de pocos puntos en la recuperación total del cobre, hay un aumento de 4, 3 y 6 puntos porcentuales para M1, M2 y M3 respectivamente, las tres curvas alcanzan valores similares. La lixiviación terciaria logra disolver mayor cantidad de cobre, incrementando 9, 11 y 7 punto para M1, M2 y M3 respectivamente. En relación a la etapa precedente, se asocia esta mejoría a un aumento de la concentración del ácido en solución y de la temperatura. Por consiguiente, se logra mantener las velocidades de solubilización entre 3 y 5

g/h, de forma tal que al terminar el proceso se obtiene una disolución casi total del cobre en todas las pruebas.



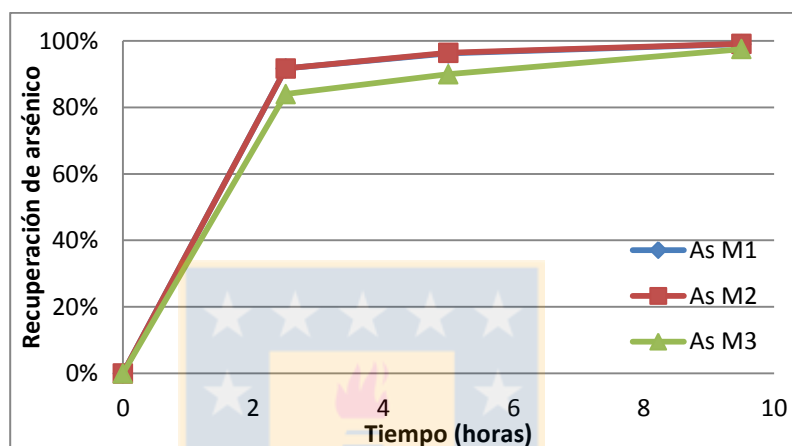
**Figura 23.** Disolución del cobre de las mezclas M1, M2 y M3 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.

En la Figura 24 se puede observar, que lixiviación primaria produce una pérdida de masa efectiva y similar en las 3 mezclas, puesto que alcanzan valores del rango de 70%, la cinética resultante varía entre 324 y 335 g/h. Se aprecia que la lixiviación secundaria, no presenta la misma eficiencia que la etapa anterior, ya que hay un aumento mínimo en la recuperación, cercana 5 puntos porcentuales. Por ende, hay una disminución importante en las velocidades, en relación a la etapa anterior, éstas fluctúan entre 10 y 32 g/h. Para la última etapa las recuperaciones globales que se logran están entre un 87 y 88%.



**Figura 24.** Disolución de masa de las mezclas M1, M2 y M3 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.

Se aprecia en la Figura 25 que la lixiviación primaria para las tres mezclas alcanza valores de disolución por sobre el 90%, las velocidades asociadas varían entre 40 y 42 g/h. No obstante, durante una segunda etapa la recuperación aumenta muy pocos puntos, traduciéndose en una cinética muy lenta en relación a la lograda durante la primera etapa (entre 1 y 2 g/h). Por último, la tercera etapa, presenta la misma tendencia que la anterior, se logra una solubilización total del arsénico.



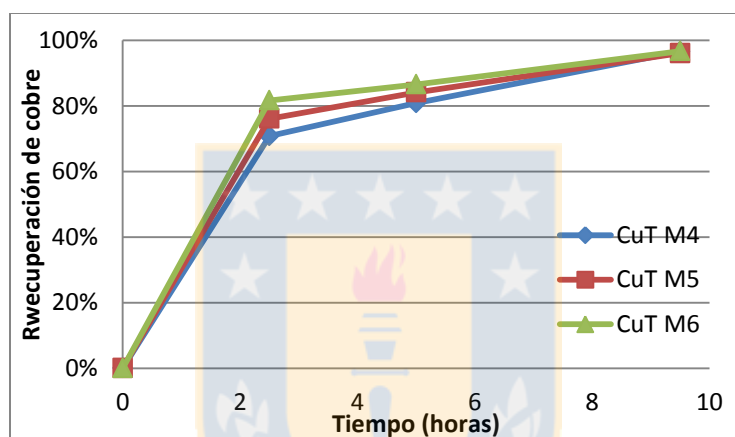
**Figura 25. Disolución del arsénico de las mezclas M1, M2 y M3 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.**

Según el primer set de pruebas realizadas, se deduce que los polvos provenientes de la fundición se componen de elementos oxidados sensibles a la disolución frente a un medio ácido. La concentración del agua acidulada empleada en la lixiviación secundaria, parece no ser suficiente para disolver el cobre, masa total y arsénico restante de la etapa anterior. De todos modos, la etapa siguiente, gracias al cambio en las variables de concentración de reactivos y temperatura logra suplir la deficiencia de la etapa intermedia.

#### 4.3.2 Resultados de pruebas M4, M5 y M6

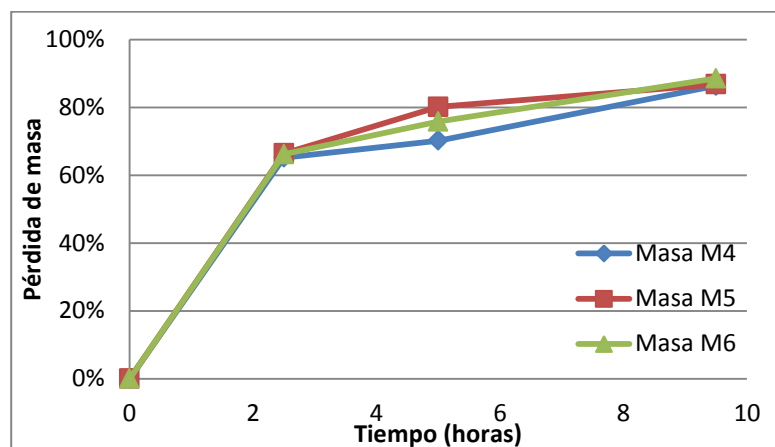
Se puede apreciar en la Figura 26, que las tendencias de las curvas que representan las lixiviaciones de las mezclas M4 (9% CPS, 10% CT, 32% HF y 50% ZT), M5 (9% CPS, 12% CT, 20% HF y 50% ZT) y M6 (9% CPS, 11% CT, 30% HF y 50% ZT) son similares, puesto que las mezclas son similares. Durante la primera instancia disolutiva, las tres curvas logran solubilizar gran cantidad

del cobre total, entre el 70 y 80%. Los resultados de esta primera etapa, muestran una dispersión cercana a 10 puntos porcentuales y velocidades de reacción que fluctúan entre 70 y 81 g/h. Por otro lado, como resultado de una segunda lixiviación, se aprecia que la cinética de las disoluciones de cobre disminuye considerablemente, en relación a las observadas en la primera etapa, alcanzando una velocidad de disolución entre 5 y 10 g/h. Como resultado las recuperaciones son bajas. Sin embargo, al concluir esta etapa se aprecia que la dispersión en las recuperaciones de las solubilizaciones globales de cobre en ese punto del proceso, entre las tres curvas es de 5 puntos porcentuales, con resultados similares para las tres mezclas.



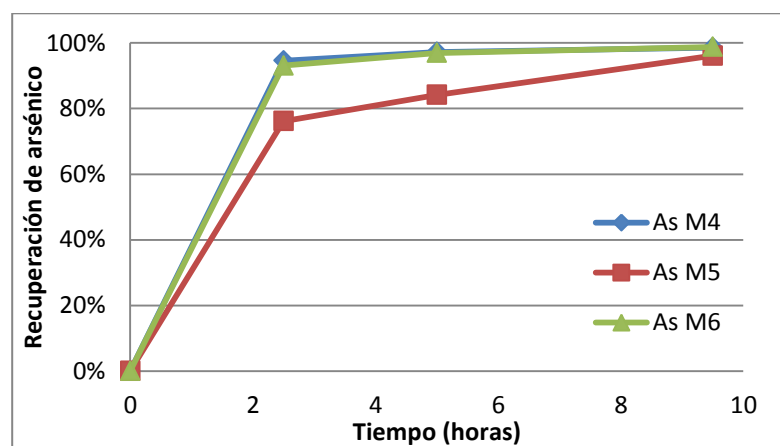
**Figura 26. Disolución del cobre de las mezclas M4, M5 y M6 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.**

A partir de los resultados de la Figura 27, se observa que la pérdida de masa de M4, M5 y M6 son prácticamente las mismas, por ende, las velocidades de reacción son similares, estas fluctúan entre 311 y 315 g/h. En cambio, la lixiviación secundaria resulta ser menos efectiva para solubilizar los compuestos, por lo tanto, se observan velocidades lentas en comparación a la etapa precedente, estas varían entre 24 y 66 g/h. No obstante, entre las tres pruebas se observa que hay una diferencia de diez puntos porcentuales. Sin embargo, al finalizar el proceso, esta diferencia disminuye producto de la tercera lixiviación, puesto que a nivel global se alcanza una disolución de casi el total de la masa, la cual fluctúa entre 86 y 89%.



**Figura 27.** Disolución de masa de las mezclas M4, M5 y M6 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.

Al estudiar la disolución del arsénico a lo largo del proceso, se aprecia en la Figura 28 que la primera lixiviación lo solubilizar casi en su totalidad, entre el 93 y 95%, lo que se traduce en que las velocidades de las tres lixiviaciones primarias son más rápidas que las asociadas a las etapas siguientes (entre 35 y 41 g/h). Sin embargo, este comportamiento se ve truncado a lo largo de la segunda etapa, puesto que sólo se logra aumentar un máximo de cuatro puntos porcentuales. Esto a su vez significa que las velocidades de disolución de los compuestos de arsénico son muy bajas, entre 1 y 2 g/h. Finalmente, la última etapa logra una disolución total, aunque ésta no presenta una alta eficiencia, ya que el arsénico queda en solución producto de la etapa primaria.



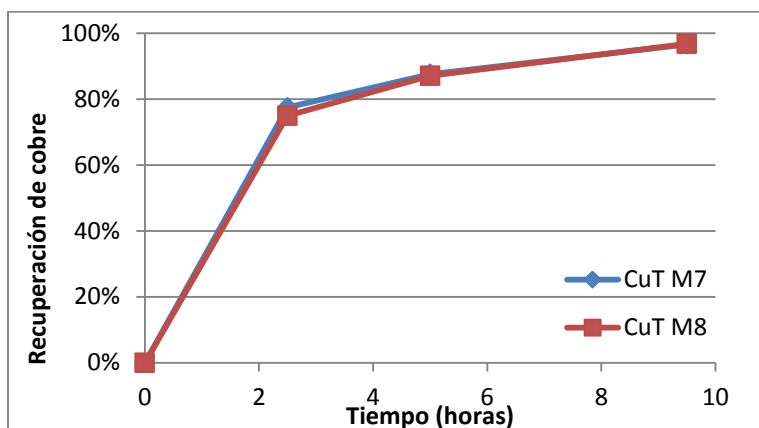
**Figura 28.** Disolución del arsénico de las mezclas M4, M5 y M6 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.

A diferencia de las pruebas anteriores, para las mezclas M4, M5 y M6, se tiene que la mitad de su masa contiene polvos provenientes de la ZT, por lo tanto, la granulometría de ésta se ve afectada, ya que son polvos más gruesos. La disolución se dificulta, pues el área de contacto disminuye al igual que las velocidades de descomposición de las especies que forman los polvos.

Se observa que hay una disolución más lenta durante las lixiviaciones primarias y recuperaciones más bajas, en relación a otras pruebas del mismo set. Además, el comportamiento de la lixiviación secundaria es similar en relación a las pruebas M1, M2 y M3, es decir, esta no es muy eficiente al momento de solubilizar, cobre y masa total. Aunque al concluir el proceso, se aprecia que la lixiviación terciaria logra mejorar la disolución global de masa total y cobre. El cobre alcanza recuperaciones similares a las pruebas que trabajan exclusivamente con polvos de fundición. Según los resultados del primer set de pruebas se infiere que el tratamiento de los polvos del botadero es más eficaz cuando se realiza con agua acidulada en todas sus etapas, revelando que el cobre se encuentra en su mayoría como un oxidado soluble.

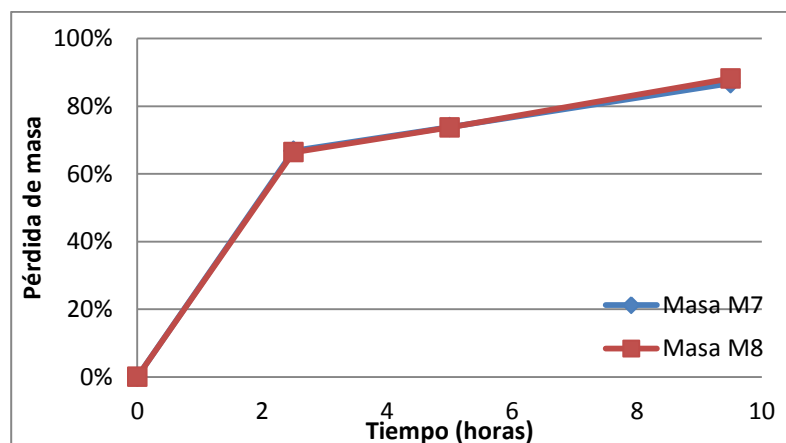
#### **4.3.3 Resultados pruebas M7 y M8**

Las recuperaciones de cobre de las lixiviaciones de las mezclas M7 y M8 compuestas por 70%TT (13% CPS, 14% CT y 45% HF para M7 y 12% CPS, 17% CT y 43% HF para M8) y 30% ZT, están representadas por Figura 29. A partir, de esta gráfica se puede observar que la lixiviación primaria en ambos casos tiene un comportamiento similar, entre 75 y 80% del cobre de las mezclas queda en solución. Esto significa que las velocidades de descomposición son similares y más rápidas en relación a las cinéticas asociadas a las etapas posteriores, pues fluctúan entre 65 y 70 g/h. La segunda etapa disolutiva disminuye la diferencia en la recuperación que existe entre ambas curvas, se observa una velocidad de lixiviación más lenta en relación a la anterior, 9 y 10 g/h. La última etapa del proceso, permite a disolver casi todo el cobre restante en ambas pruebas.



**Figura 29.** Disolución del cobre de las mezclas M7 y M8 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.

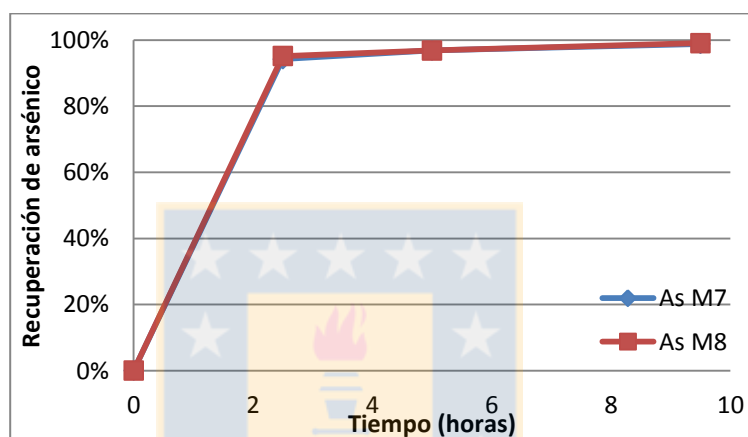
En cuanto a la masa, se aprecia de la Figura 30, que la lixiviación primaria parece ser efectiva logrando disolver 2/3, entre ambas pruebas hay sólo un punto de diferencia. Las velocidades de disolución que resultan son 312 y 315 g/h. Como resultado de la segunda etapa, hay un leve aumento en la disolución del total de los polvos y ambas pruebas se han solubilizado casi en un 75%. La velocidad de disolución disminuye considerablemente, alcanzando una lixiviación de 33 y 34 g/h. Por último, al finalizar el proceso se aprecia que hay sobre 10 puntos porcentuales de recuperación productos de la última lixiviación. Casi el 90% de la masa queda descompuesta, las cinéticas resultantes se mantienen en relación a la etapa anterior y fluctúan entre 34 y 38 g/h.



**Figura 30.** Disolución de masa de las mezclas M7 y M8 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.



En cuanto al arsénico se observa en la Figura 31 que producto de la primera lixiviación queda disuelto el 95% de cobre, se le asocian velocidades más rápidas de disolución de los compuestos: 37 y 41 g/h, en comparación con las dos etapas siguientes. La lixiviación secundaria no solubiliza prácticamente al arsénico, por lo tanto, se la cinética es más lenta, en relación a la lograda anteriormente, alrededor de 1 g/h. Además, la recuperación aumenta sólo dos y tres puntos porcentuales. La lixiviación final, termina de disolver el arsénico remanente de las etapas anteriores, quedando su totalidad en solución.



**Figura 31. Disolución del arsénico de las mezclas M7 y M8 a lo largo de las tres etapas de lixiviación bajo condiciones estándar de lixiviación.**

Se deduce que la presencia de polvos ZT, no presenta obstáculos para la lixiviación global. Se aprecia que durante la disolución primaria la cantidad de cobre es menor en relación a las pruebas llevadas a cabo con polvos de la TT, pero las etapas siguientes lixivian el cobre, alcanzando la misma recuperación que al tratar polvos de la TT. Se puede inferir que la interacción de los polvos ZT con los TT no presenta mayores complejidades.

De acuerdo a los resultados obtenidos en un primer set de pruebas se pudo calcular los resultados ponderados y predictivos para el segundo set de pruebas. En la Tabla 13 se observa la comparación de dichos resultados y los obtenidos una vez realizadas las pruebas del segundo set, se logra apreciar que son prácticamente iguales. Se infiere que no hay una interacción entre los polvos que dificulte la lixiviación.

**Tabla 13. Tabla resumen de las recuperaciones de cobre acumuladas reales y las recuperaciones de cobre acumuladas obtenidas del Set 1.**

	Rec. Acumulada Cu real	Rec. Acumulada Cu teórica
M1	97%	97%
M2	98%	96%
M3	97%	96%
M4	97%	96%
M5	96%	96%
M6	97%	96%
M7	97%	97%
M8	97%	96%

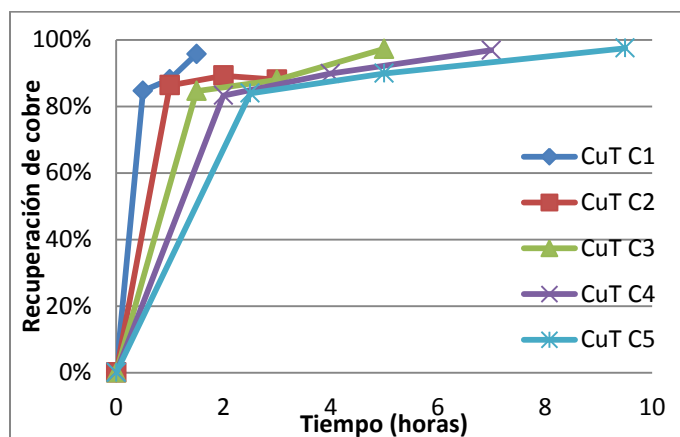
En resumen, se observa que la etapa primaria es la más eficiente y de cinética más rápida en relación a la secundaria y terciaria, ya sea para solubilizar masa, cobre o arsénico. En todas las instancias se aprecia que la recuperación de cualquiera de los elementos estudiados resulta ser por sobre el 60%. Esto se explica a que los polvos se encuentran más expuestos que durante las etapas posteriores, los compuestos presentes en los polvos son altamente solubles. La lixiviación secundaria a lo largo del proceso se considera poco efectiva, puesto que son pocos puntos porcentuales los que se recuperan. La última disolución producto de su alta concentración y temperatura, logra mantener una cinética de solubilización favorable para disolver el cobre asociado a compuestos refractarios a la lixiviación y que en las etapas anteriores no se pudieron lixiviar. Además, se deduce que prácticamente todo el cobre y el arsénico se encuentran en su forma de oxidado soluble, ya que presenta un buen comportamiento disolutivo frente al ácido sulfúrico, casi total. Otros elementos deben estar en forma de sulfuros, ya que la disolución de masa total presenta recuperaciones más bajas. El constante aumento del ácido es lo que mantiene una disolución a una velocidad constante.

## 4.4 Set 3

### 4.4.1 Resultados de pruebas C1, C2, C3, C4 y C5

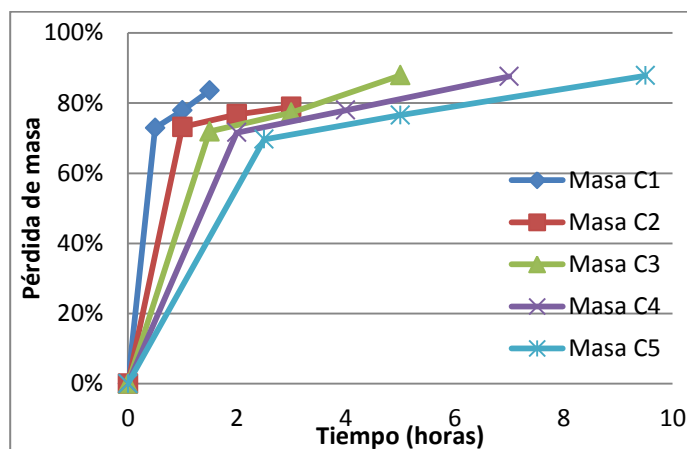
Las mezclas utilizadas para las pruebas cinéticas C1, C2, C3, C4 y C5, mezclas compuestas exclusivamente por polvos originarios de la TT (17% CPS, 22% CT y 61% HF), presentan la misma composición de polvos, variando sólo el tiempo de residencia en el reactor. Se observa en la Figura 32 que al finalizar la primera lixiviación, todas las pruebas alcanzan una recuperación de cobre del rango del 85%, independiente del tiempo que permanezca sometido a la solubilización.

Se aprecia que, en cualquiera de las cinco pruebas, la cinética de reacción de la etapa primaria es más alta en relación a las etapas siguientes. Un fenómeno similar al observado durante las baterías de pruebas anteriores se repite durante la segunda etapa de disolución, una baja efectividad en la solubilización de los compuestos. Todos los valores de recuperación de cobre obtenidos están alrededor del 90%, producto de la lixiviación secundaria. Por ende, las velocidades de reacción también se ven afectas y disminuyen considerablemente, en relación a la etapa precedente, estas fluctúan entre 12 y 4 g/h. La última lixiviación logra aumentar la recuperación considerablemente en todas las pruebas, alcanzando disoluciones que fluctúan entre el 96 y 97% de descomposición del cobre. La prueba que presenta menores tiempos de residencia, alcanza un 1% menos en relación a C3, C4 y C5, esta diferencia no es del todo relevante. Por otro lado, C2 parece tener un comportamiento anómalo, puesto que la recuperación de cobre pareciera disminuir en esta última etapa, esto se refleja en la cinética de reacción, ya que esta es levemente negativa (-2 g/h). Los resultados podrían deberse, por un lado, a un análisis erróneo como una mala realización de la prueba.



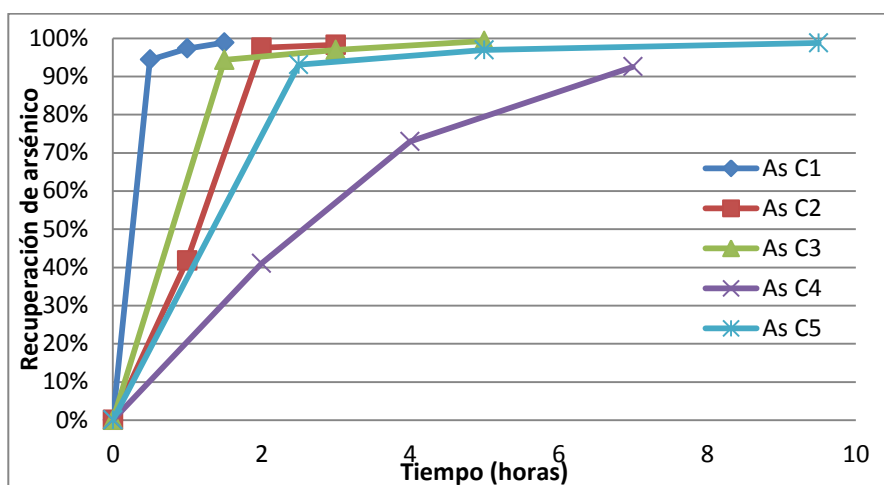
**Figura 32.** Disolución del cobre de las mezclas C1, C2, C3, C4 y C5 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

Se observa en la Figura 33, que la pérdida de masa en la etapa primaria es prácticamente la misma en todas las pruebas, existiendo una dispersión de 3 puntos porcentuales, los extremos coinciden en que la prueba de menor tiempo es aquella con un mayor porcentaje de polvos disueltos. En cambio, se observa que la prueba que presenta una mayor duración, alcanza menor disolución de la masa total. Las pérdidas de masa fluctúan entre un 70 y 75%, independientemente del tiempo de lixiviación. La lixiviación secundaria parece ser poco eficiente, ésta logra adicionar entre 4 y 7 puntos porcentuales a la pérdida global de masa en cualquiera de las pruebas realizadas. Finalmente la última etapa de lixiviación alcanza un 88% en C3, C4 y C5, en cambio se distingue que la última etapa para C1 se logra solubilizar un menor porcentaje de masa en relación a las otras pruebas, esto se puede explicar al menor tiempo de residencia. La borra está expuesta al ácido durante un intervalo de tiempo acotado siendo insuficiente para disolver una cantidad importante de los compuestos refractarios que conforman el residuo que se está lixiviando. Por otro lado, se aprecia que hay un comportamiento extraño en la última lixiviación de la prueba C2, ya que hay una disolución muy baja. Dado lo visualizado en cuanto a la recuperación de cobre, se puede deducir que esta prueba presenta resultados cuestionables. Estos se deben a la variabilidad intrínseca del proceso y el análisis químico, por ende se descarta esta prueba.



**Figura 33.** Disolución de masa de las mezclas C1, C2, C3, C4 y C5 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

En lo que respecta al arsénico, se observa en la Figura 34 que éste se disuelve rápidamente a lo largo de la primera etapa, sin importar su duración, en un rango de 95% para C1, C3 y C5. Por otro lado, las pruebas C2 y C4, logran disolver alrededor del 40% del arsénico, lo cual se podría explicar como errores experimentales o analíticos. De las baterías de pruebas anteriores, se ha observado que la segunda etapa, para las pruebas C1, C2 y C3 resulta ser poco efectiva, hay un aumento en la recuperación global de 3 y 4 puntos porcentuales, alcanzando entre 97 y 98% de recuperación. En el caso de C2, hay un aumento brusco en la lixiviación del arsénico, ya que este se disuelve prácticamente en su totalidad, 98%. Por otra parte, en la prueba C4 también se visualiza un aumento considerable en la solubilización de arsénico, pero no alcanza a duplicar el porcentaje de la etapa precedente, 73%. La lixiviación secundaria, logra un aumento de la disolución de arsénico prácticamente nulo en C1, C3 y C5, aun así se logran disolver los compuestos de arsénico. El comportamiento de C2 y C4 resulta extraño si se observa el patrón que se repite a lo largo de todos los sets de pruebas en lo que concierne al arsénico. Aun así éste se disuelve prácticamente en su totalidad (99%) al finalizar el proceso.



**Figura 34.** Disolución del arsénico de las mezclas C1, C2, C3, C4 y C5 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

En las cinco pruebas se observa que la lixiviación primaria logra porcentajes similares de disolución, que varían entre 83 a 86% para el cobre, entre 70 a 73% para la pérdida de masa y 41 y 94% para el arsénico. Es decir, que los polvos TT presentan una fácil lixiviación en corto tiempo. La disolución realizada por la etapa 2, independientemente del tiempo de residencia, es pobre, aumenta muy pocos puntos porcentuales, entre 4 y 7 para la masa, entre 3 y 7 para el cobre y entre 3 y 56 para el arsénico. Se menciona anteriormente que las pruebas C2 y C4 presentan resultados anómalos, los que explican la poca homogeneidad entre los balances de arsénico. La lixiviación terciaria logra confirmar la importancia de la concentración de ácido en solución y de la temperatura al momento de disolver los elementos, puesto que, aunque el tiempo de lixiviación sea bajo, la recuperación es la misma en todas las pruebas.

Las buenas recuperaciones en todo rango de tiempo se pueden explicar por la composición mineralógica de los polvos, ya que se dedujo de los resultados del Set 1 de pruebas, que los polvos TT están compuestos, en su mayoría, por especies oxidadas solubles y presentan buena descomposición ante agua acidulada.

Se observa que el cobre, la masa y el arsénico presentan una velocidad de disolución rápida en una primera etapa, en comparación con las etapas siguientes. Esto se debe a que hay menos reactivo presente (entiéndase cobre, masa y arsénico) y las borraras están húmedas cambiando las condiciones de una lixiviación óptima, como es en una primera instancia. Por último, se aprecia que producto de la concentración de cobre y el aumento de la temperatura, la velocidad de disolución es similar a la de la etapa anterior.

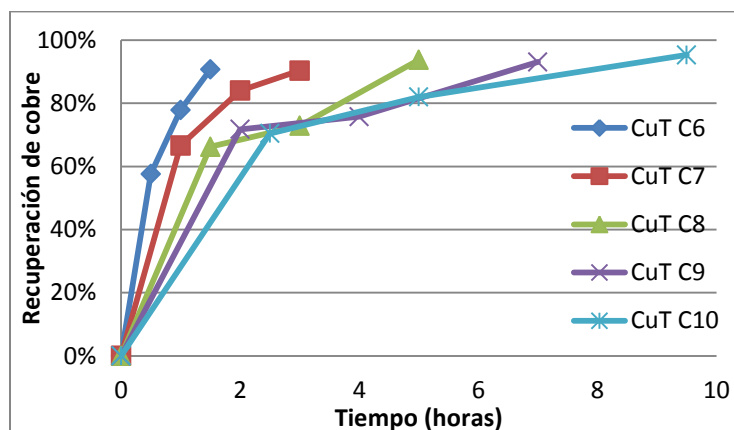
Se consideran poco confiables los resultados de C2 y C4, ya que la masa, el cobre y el arsénico se comportan de forma anómala en comparación con las otras pruebas. Para C2 el balance de cobre no es consistente y la solubilización de la masa no se rige según el patrón obtenido de los resultados anteriores. Para C4 se observa que el comportamiento del arsénico es muy distinto al de las otras cuatro pruebas que trabajan con la misma mezcla.

#### **4.4.2 Resultados de pruebas C6, C7, C8, C9 y C10**

A partir de la Figura 35 se observa que las lixiviaciones polvos ZT, muestran un comportamiento distinto en cuanto a las recuperaciones de cobre en comparación a los resultados de la lixiviación de los polvos de la TT, puesto que no son homogéneos, como resultado de la etapa primaria, se aprecia que hay una dispersión de alrededor 15 puntos porcentuales entre las cinco pruebas. Hay una dependencia del tiempo de lixiviación sobre la recuperación de cobre. También, se observa que existe una tendencia que la recuperación es directamente proporcional respecto del tiempo de residencia de los polvos en el reactor. Se verifica que la velocidad de reacción en todas las pruebas a lo largo de esta etapa es más rápida en relación a las etapas siguientes. Para una segunda lixiviación, se distingue que las pruebas C6 y C7 presentan aumentos bruscos en sus recuperaciones de cobre, alcanzando cerca de 20 puntos porcentuales extra en relación a la etapa precedente.

Estos resultados difieren con los obtenidos anteriormente (Set 1 y 2, y pruebas cinéticas con TT), ya que las recuperaciones obtenidas de la segunda etapa son bajas. Como resultado de las pruebas C8, C9 y C10 durante la etapa intermedia del proceso, se verifica el comportamiento anteriormente descrito, bajos puntos de recuperación. Por ende, se observa una leve disminución en la dispersión de las recuperaciones alcanzadas al concluir la etapa secundaria de las cinco pruebas. En cambio, se logra apreciar que, al finalizar la última etapa del proceso, las recuperaciones globales de cobre alcanzadas por todas las pruebas fluctúan entre 90 y 95%. Se infiere que la solubilización del cobre en los polvos ZT depende del tiempo de lixiviación, puesto que se observa que hay una diferencia del rango de cinco puntos entre C6 y C10. También se aprecia que la recuperación final obtenida es más baja frente a la lixiviación de las mezclas

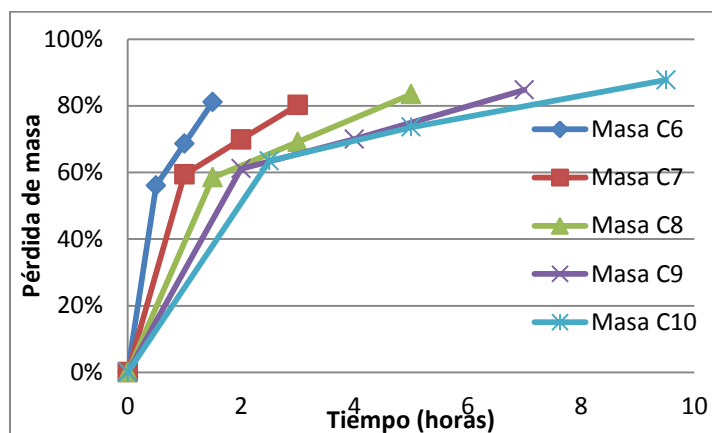
compuestas por polvos TT, esto puede asociarse a la granulometría como también a las especies mineralógicas al que está asociado el cobre.



**Figura 35. Disolución del cobre de las mezclas C6, C7, C8, C9 y C10 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.**

Se infiere a partir de los resultados mostrados en la Figura 36, que la pérdida de la masa en la etapa primaria logra resultados más similares en relación a los obtenidos en la disolución de cobre, con una dispersión de 7 puntos porcentuales. Se deduce que las velocidades de descomposición de la masa son rápidas, en relación a las próximas etapas. Producto de una lixiviación secundaria, se mantiene la misma diferencia porcentual entre los resultados acumulados de las pruebas en términos de disolución obtenida en la etapa primaria. Esta vez, el comportamiento de la segunda lixiviación frente a la pérdida de masa de los polvos tiene un carácter menos disolutivo, alcanzando alrededor de un 70% de pérdida de masa. La última etapa de lixiviación alcanza recuperaciones que fluctúan entre el 80 y 88%, la dispersión es un poco más marcada que la observada en la etapa anterior. Sin embargo, estos valores son similares a lo observado anteriormente en otras pruebas, aunque se distingue una dependencia del tiempo para una mayor disolución.





**Figura 36.** Disolución de masa de las mezclas C6, C7, C8, C9 y C10 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

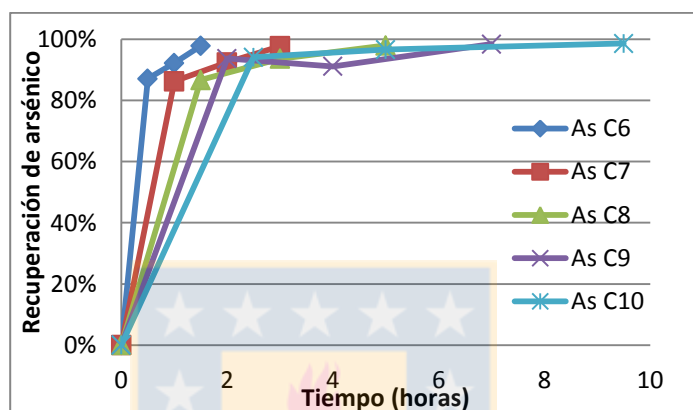
Respecto al arsénico, se distingue en la Figura 37 que las recuperaciones producto de la lixiviación primaria presentan 8 puntos porcentuales de dispersión, ya que los resultados fluctúan entre 86 y 94%. En general, se observa que se repite el fenómeno que relaciona un mayor tiempo de residencia con una recuperación más alta. Todos los resultados están sobre el 85%, considerándose como valores importantes, que a su vez están asociados a velocidades de reacción de disolución rápidas, en relación a las etapas siguientes de cada prueba.

De la segunda etapa de lixiviación se infiere que las velocidades de solubilización del arsénico son más bajas, en relación a la etapa precedente. Se observa que la cinética asociada a la prueba C9 es negativa, lo que implica que hay un error en el balance (este resultado se descarta). Además, se aprecia que hay un aumento mínimo en la recuperación acumulada, también es posible apreciar que la dispersión de los resultados disminuye a 5 puntos porcentuales, pues las recuperaciones varían entre 92 y 97%. Se repite el fenómeno anteriormente descrito de la relación entre el aumento del tiempo de lixiviación y la descomposición de compuestos de arsénicos.

Como resultado de la última etapa de disolución, las recuperaciones son similares y el arsénico queda prácticamente todo disuelto (entre 98 y 99%). La tercera lixiviación no aporta gran cantidad de puntos porcentuales, puesto que las etapas previas, sobre todo la primaria disuelve la mayor parte del arsénico.

Se verifica que se repite la relación entre la disolución final y el tiempo de duración del proceso. Las recuperaciones son directamente proporcionales al tiempo de lixiviación para el cobre y la pérdida de masa, puesto que el arsénico alcanza una disolución casi total en

cualquiera de los casos. El comportamiento de la pérdida de masa y del arsénico es similar al que se observa en la lixiviación de los polvos TT, alcanzando recuperaciones similares. El tiempo de residencia influye en el grado de recuperación acumulada de cobre, logrando una diferencia importante. Además, la lixiviación terciaria iguala recuperaciones entre todas las pruebas, es decir, que la etapa final es muy efectiva e importante para el proceso, porque logra disolver el cobre remanente hasta alcanzar el equilibrio.



**Figura 37.** Disolución del arsénico de las mezclas C6, C7, C8, C9 y C10 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

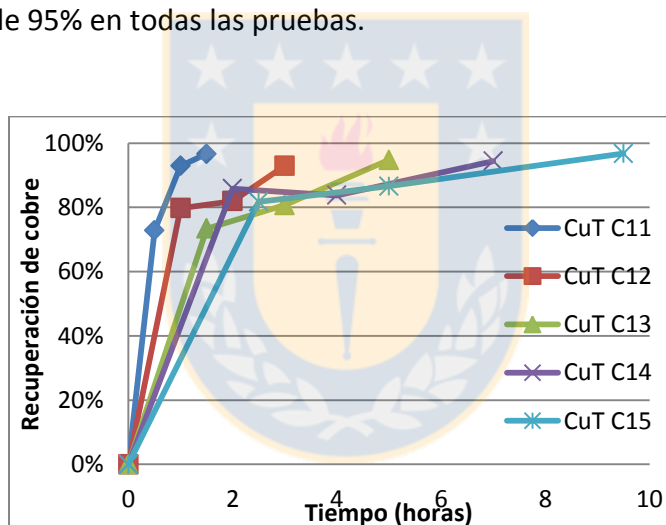
Al comparar el comportamiento de los polvos ZT con los TT, se observa que hay una dispersión considerable en los resultados de las recuperaciones en todas las pruebas y en todas las etapas. Por ende, se infiere que los polvos ZT parecen tener un carácter más refractario en relación a los TT, aun así, su recuperación es alta al igual que la ley del material.

#### 4.4.3 Resultados pruebas C11, C12, C13, C14 y C15

En la Figura 38 se observa que los resultados de las recuperaciones acumuladas de cobre producto de la lixiviación primaria de las pruebas C11, C12, C13, C14 y C15 (mezclas compuestas por 9% CPS, 11% CT, 30% y 50%ZT) no son similares, puesto que se observan diferencias de 13 puntos, ya que las recuperaciones de cobre fluctúan entre 73 y 86%. Aun así, no se distingue que haya una relación entre el tiempo y la disolución de cobre. Esta diferencia puede asociarse a una mala homogenización al momento de preparar las mezclas de polvos, ya que la granulometría de los ZT es más gruesa. De todos modos, se puede considerar que la primera

etapa es efectiva respecto de la disolución de los compuestos solubles de cobre, ya que todas las pruebas alcanzan valores por sobre 75% de la lixiviación del cobre original.

En una segunda etapa se aprecia que hay un aumento de las recuperaciones acumuladas, pero no se observa concordancia entre el tiempo empleado para la lixiviación durante la etapa y el porcentaje de cobre disuelto. Puesto que la segunda etapa de la prueba C11, de tiempo acotado de solubilización, presenta mejor recuperación que la C15, que ocupa un intervalo más prolongado. También se aprecia que los resultados presentan una dispersión de alrededor 10 puntos porcentuales, puesto que las recuperaciones de cobre fluctúan entre 81 y 93%. Se observa que la cinética resultante de la prueba C14 es de pendiente negativa, por lo que es descartada. La última etapa logra recuperaciones acumuladas de cobre similares entre si disminuyendo la dispersión al rango de 5 puntos porcentuales. Además, se alcanza una disolución del rango de 95% en todas las pruebas.



**Figura 38.** Disolución del cobre de las mezclas C11, C12, C13, C14 y C15 a lo largo de las 3 etapas de lixiviación variando el tiempo.

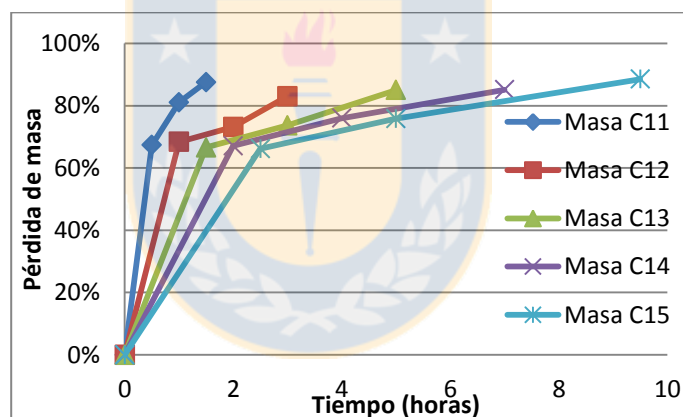
Según lo expuesto en relación a las pruebas C6, C7, C8, C9 y C10 se deduce que la dispersión e imprevisibilidad de los datos son producto del efecto causado por los polvos ZT, ya que estos al provenir de un depósito al aire libre, son residuos de distintos procesos que han sufrido cambios de temperatura, envejecimiento, entre otros. De todos modos, se considera que la recuperación de cobre para estas pruebas es alta, casi idéntica a los polvos TT.

Es posible observar en Figura 39, que la dispersión de las pérdidas de masa en la etapa primaria de lixiviación es de aproximadamente 2 puntos porcentuales. Además, no existe

relación entre el tiempo de la etapa y el grado de disolución de la masa, por lo tanto, dicha diferencia en términos de pérdida de masa entre las cinco pruebas se asocia a errores intrínsecos del desarrollo de las pruebas.

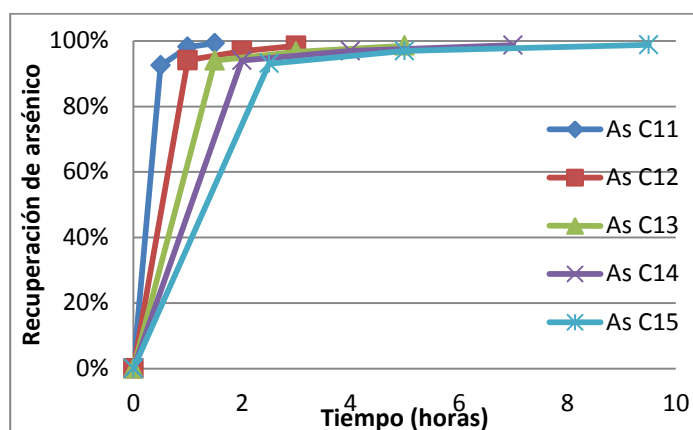
Al igual que en la mayoría de las pruebas anteriormente realizadas, la lixiviación secundaria presenta un aumento de no más de 15 puntos en la recuperación acumulada. No se observa un patrón que relacione el tiempo y la pérdida de masa. Al comparar la cinética que resulta de esta etapa, se aprecia que es más lenta en relación a la lograda en una lixiviación primaria.

Las cinco pérdidas de masa globales muestran una disminución importante en la dispersión de los datos, pues varían entre 83 y 89%. No existe una relación entre el tiempo y las pérdidas de masa. Al comparar estos valores con los resultados de pruebas anteriores, se verifica que hay similitudes, puesto que todos se sitúan en el rango de 80%.



**Figura 39. Disolución de masa de las mezclas C11, C12, C13, C14 y C15 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.**

Por otro lado, producto de la lixiviación primaria, se observa a partir de la Figura 40 que casi el total del arsénico queda en solución. Los resultados obtenidos presentan una baja dispersión, cuyos valores varían entre 92 y 94%, no se observa una dependencia entre el tiempo y la recuperación del arsénico. En la segunda etapa de solubilización se observa que las velocidades son más lentas en comparación con la primera. No obstante, se aprecia que, al finalizar, casi todo el arsénico está disuelto en el PLS. Por último, la lixiviación terciaria disuelve parte del arsénico restante, alcanzando la solubilización prácticamente total, 99% en todos los casos



**Figura 40.** Disolución del arsénico de las mezclas C11, C12, C13, C14 y C15 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

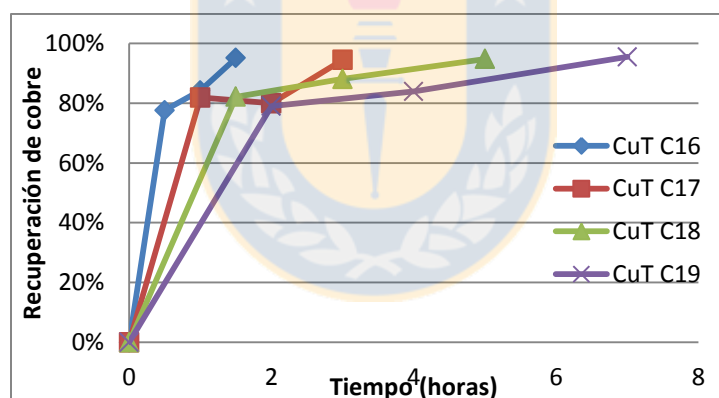
Se puede apreciar que los polvos ZT al ser mezclados con los TT, en razón 50% y 50% respectivamente, sí provocan un efecto en el proceso de lixiviación negativo, puesto que la cinética de disolución se ve afectada lo que limita la mejora del diseño del proceso, también se observan mayores dispersiones en los resultados de las recuperaciones entre las distintas pruebas. Para la pérdida de masa y recuperación de cobre, se aprecia que la lixiviación secundaria es más eficiente, puesto que logra más puntos porcentuales de recuperación que en otras pruebas. No así, las recuperaciones globales, siguen dentro del rango entre el 93 y 97%, lo que se considera un buen resultado, solamente que con un grado de dispersión considerable. Aunque dicha dispersión no es producto de la variación en los tiempos de residencia, por ende, se puede considerar que una alta presencia de polvos originarios del botadero se traduce en una lixiviación de resultados inciertos. Se distingue, que el arsénico es muy disoluble, independientemente del tiempo que se utilice para el proceso, se alcanza la recuperación total. El arsénico se comporta muy soluble independiente de cualquier variación de parámetros.

### 2.1.7 Resultados de pruebas C16, C17, C18 y C19

En la Figura 41 se puede observar que hay una buena respuesta de las mezclas que combinan 12% CPS, 16% CT, 43% HF y 30% ZT al momento de ser lixiviadas. Producto de la lixiviación primaria hay una dispersión en las recuperaciones de cobre de no más de cuatro puntos porcentuales. Sin embargo, se aprecia que no están ligados a la relación tiempo vs

disolución, puesto que la prueba de menor duración (C16) tiene un punto de diferencia en su grado de solubilización que aquella que se realizó con el tiempo de residencia más alto (C19). Mientras que las pruebas C17 y C18, con un tiempo de residencia intermedio, alcanzan recuperaciones más altas. Al finalizar la lixiviación secundaria se observa que los resultados de esta etapa son similares, la dispersión que se presenta poco significativa. Por otra parte, se observa que la velocidad de reacción de C17 en la segunda etapa es negativa, por ende, los resultados no son confiables y se descartan. Como se menciona anteriormente, esto puede estar ligado a una mala manipulación al momento de masar y/o a un error en análisis de las borras.

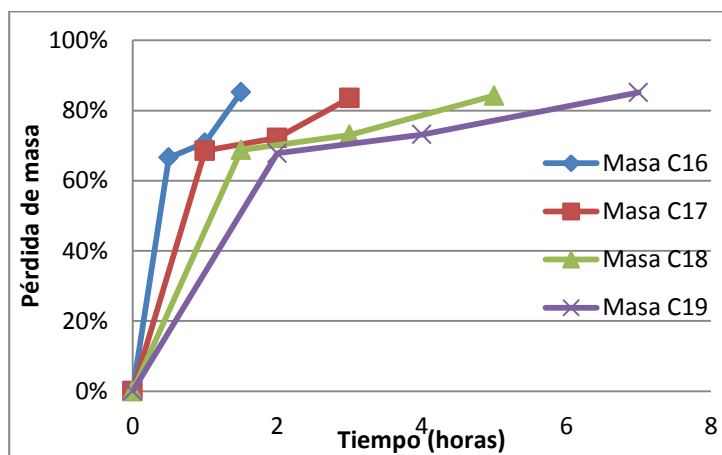
Por último, se observa que en la última etapa de lixiviación hay un aumento en la recuperación de cobre, logrando su lixiviación casi total. Se distingue que en esta etapa los resultados son similares, presentando una diferencia de 1 punto porcentual (que puede ser asociado a error experimental y/o analítico) independientemente del tiempo empleado.



**Figura 41.** Disolución del cobre de las mezclas C16, C17, C18 y C19 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

De la Figura 42 se aprecia que al lixiviar en una primera instancia la masa total de polvos, la variable tiempo no juega un rol fundamental, los resultados son similares pues fluctúan entre 67 y 69% de pérdida de masa total. Se considera que la cinética de las reacciones de disolución primaria de polvos es rápida, en relación a las velocidades de las etapas siguientes. Por otro lado, la segunda etapa entrega un aumento de muy pocos puntos en términos de pérdida de masa. La lixiviación terciaria presenta una mayor eficacia, al aumentar por sobre 10 puntos porcentuales la disolución de los polvos, esto producto de la temperatura y el aumento de la

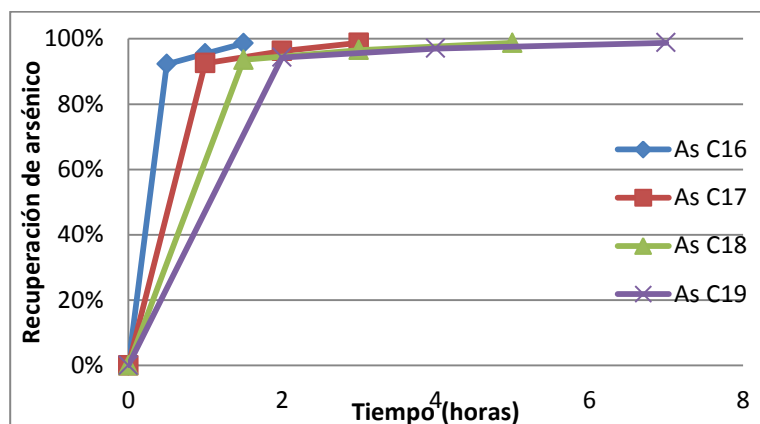
concentración de ácido. Se observa que indistintamente del tiempo de lixiviación la pérdida de masa total de polvos es similar en todos los casos (84 y 84%).



**Figura 42. Disolución de masa de las mezclas C16, C17, C18 y C19 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.**

Por otro lado, para el arsénico, se aprecia en la Figura 43 que en una primera instancia queda prácticamente todo en solución, existiendo una leve influencia del tiempo, ya que se observa que en una etapa más corta hay un 92% de disolución, mientras que en la más prolongada, 94%. No obstante, se puede considerar que se trata de una diferencia muy poco significativa.

Para una disolución secundaria, se observa que las recuperaciones de arsénico fluctúan entre 95 y 97%. La disolución es mínima y por ende, el arsénico disuelto en la etapa intermedia es muy bajo. Finalmente, la lixiviación terciaria logra que todas las recuperaciones sean del, 99%, independientemente del tiempo que se emplee para el proceso global, lo que confirma que las especies que contienen arsénico son muy solubles.



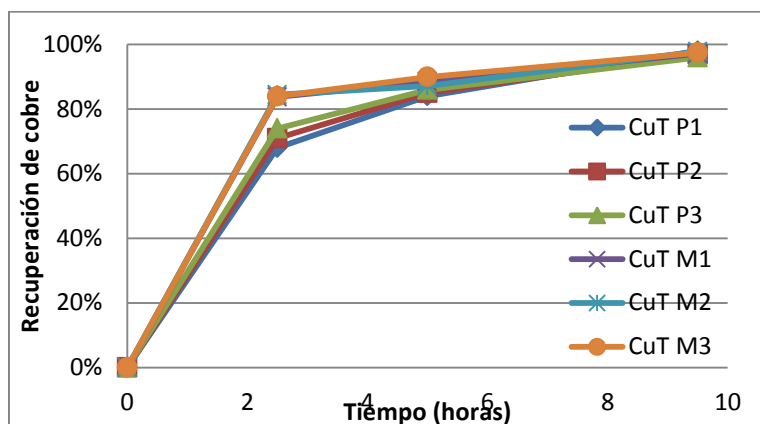
**Figura 43.** Disolución del arsénico de las mezclas C16, C17, C18 y C19 a lo largo de las tres etapas de lixiviación variando el tiempo.

## 4.5 Set 4

### 4.5.1 Resultados P1, P2 y P3:

La Figura 44 muestra que los polvos TT alcanzan una alta recuperación al concluir la etapa de lixiviación primaria en las tres pruebas. También se aprecia una dispersión del rango de 5 puntos, ya que las recuperaciones de cobre fluctúan entre 68 y 74%. Al comparar los resultados de M1, M2 y M3, se distingue que las recuperaciones alcanzadas son más bajas, ya que la concentración de ácido sulfúrico también lo es. Por otra parte, se observa que las cinéticas de disolución de los compuestos que contienen cobre son similares entre sí, pues P1, P2 y P3 presentan velocidades de lixiviación de 48, 48 y 50 g/h, respectivamente. Además, se observa que éstas son más rápidas en relación a las próximas dos etapas. Aun así, la cinética primaria de éstas pruebas es un poco más lenta que la resultante de M1, M2 y M3.





**Figura 44. Comparación de las recuperaciones de cobre obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P1, P2, P3, M1, M2 y M3, la condición de operación que varía entre un set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

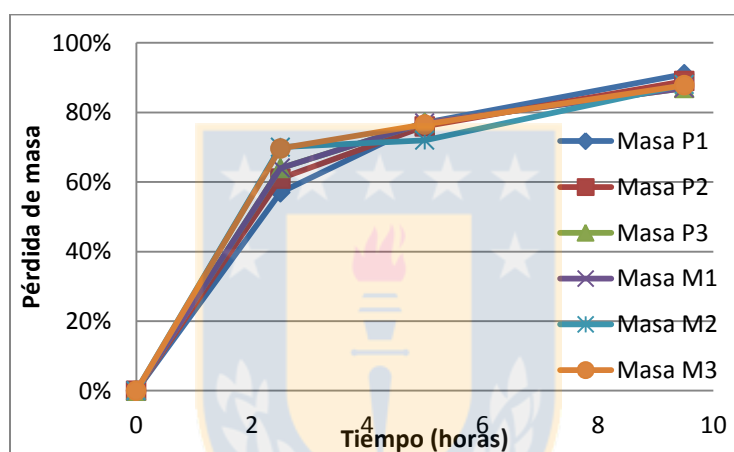
Al finalizar la etapa secundaria de lixiviación la dispersión entre las recuperaciones de las pruebas disminuye, alcanzando 2 puntos porcentuales de diferencia, siendo esta etapa más eficaz, para P1, P2, P3; puesto que hay un aumento entre 10 y 15 puntos porcentuales en relación a sus equivalentes del Set 2. Esto se debe a que la diferencia de la concentración del agua acidulada entre la lixiviación primaria y secundaria es mayor en el Set 4. Por lo tanto, la primera instancia de disolución no fue tan efectiva como lo fue en el Set 2. Sin embargo la segunda etapa es capaz de disolver el cobre remanente que la lixiviación primaria dejó en la borra. Se alcanza un grado de disolución similar a las obtenidas en la segunda batería de pruebas. La tercera etapa de lixiviación alcanza una disolución prácticamente total para el cobre, manteniéndose la dispersión de 2 puntos. Además, se observa que la recuperación global logra resultados similares a obtenidos en el Set 2.

Respecto a la masa tratada, se observa en la Figura 45, que ésta disminuye considerablemente producto del ataque con ácido en todas las pruebas. Además, existe una dispersión de 7 puntos. Lo que implicaría que la cinética de las reacciones de disolución son más rápidas, en relación a las resultantes de las etapas siguientes. Al comparar estos resultados con los obtenidos en las pruebas M1, M2 y M3, se aprecia que hay una disolución de menor.

Por lo tanto, al aumentar la concentración del agua acidulada en una segunda instancia, hay una recuperación de masa similar entre las pruebas, puesto que la dispersión que se alcanza es de 2 puntos porcentuales. Al compararla con la etapa anterior, ésta logra un aumento en la

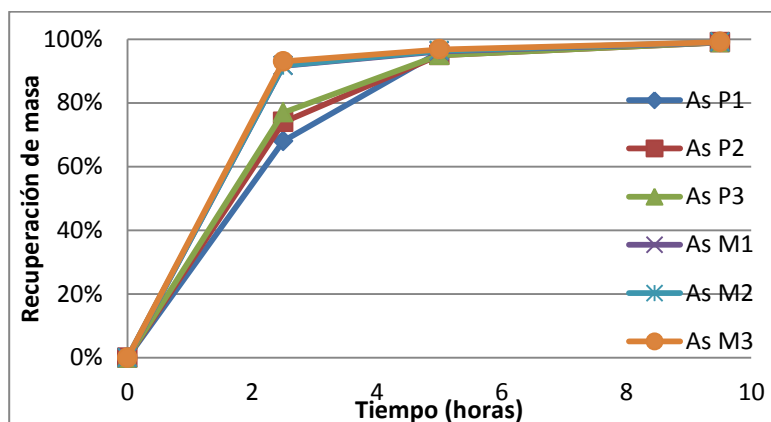
recuperación acumulada entre 15 y 20 puntos, alcanzando una pérdida de masa del orden entre 70 y 80%. Por consiguiente, se puede considerar una lixiviación eficiente, en comparación con las pruebas análogas del Set 2.

La última lixiviación resulta igualmente efectiva, ya que se logra incrementar entre 10 y 15 puntos porcentuales la pérdida de masa. Los valores finales obtenidos son similares a los observados en el Set 2 (del rango de 90%), por lo que se deduce que sólo la lixiviación primaria se ve afectada, no así la recuperación de la etapa secundaria ni tampoco la global.



**Figura 45. Comparación de las pérdidas de masa obtenida a lo largo de cada etapa de las pruebas P1, P2, P3, M1, M2 y M3, la condición de operación que varía entre un set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

El comportamiento del arsénico en la primera etapa de lixiviación del proceso es muy disolutivo, lo que puede ser observado en la Figura 46, aunque la concentración de ácido sea baja. Las velocidades de disolución de arsénico para P1, P2 y P3 en la etapa primaria son menores en relación a las cinéticas de la primera etapa de la segunda batería de pruebas, puesto que M1, M2 y M3 varían entre 42 y 40 g/h. Además, hay una dispersión mayor en las pruebas P1, P2 y P3, 7 puntos porcentuales. La que se ve suavizada al finalizar la segunda etapa de lixiviación, puesto que se observa que resulta un punto de dispersión entre las tres pruebas. Se concluye que esta etapa es eficiente, pues aumenta entre 20 y 30 puntos porcentuales de recuperación. La lixiviación terciaria termina de disolver el poco arsénico restante.



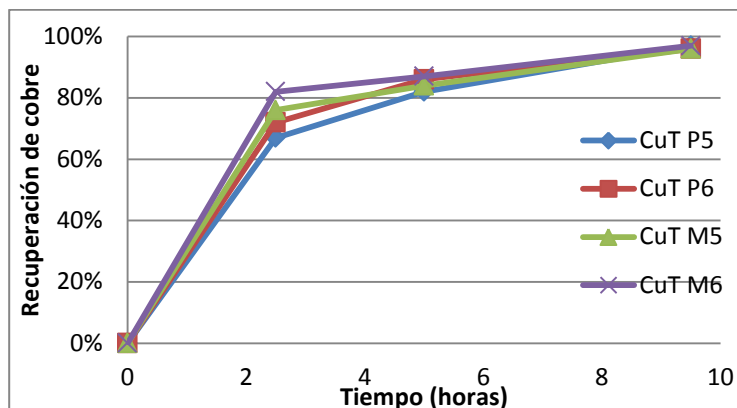
**Figura 46.** Comparación de la recuperación de arsénico obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P1, P2, P3, M1, M2 y M3, la condición de operación que varía entre un set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.

#### 4.5.2 Resultados P5 y P6

En la Figura 47 se puede observar que la disolución de cobre es alta, lo que significa que las especies asociadas al cobre son solubles en agua, pues incluso trabajando con una baja concentración de agua acidulada se logra alcanzar altas recuperaciones, del rango de 70%, y velocidades de disolución rápidas a lo largo de la lixiviación primaria, para P5 (9% CPS, 12% CT, 29%HF y 50% ZT) y P6 (9% CPS, 11% CT, 30%HF y 50% ZT) se logran cinéticas de disolución de 52 y 57 g/h. De todos modos, son velocidades más lentas en relación a las alcanzadas en el segundo set. Entre ambas pruebas, P5 y P6 se logra apreciar una dispersión de 5 puntos. Al comparar los resultados obtenidos en esta etapa con los equivalentes del Set 2, se infiere que producto de la baja concentración de ácido sulfúrico, la disolución de cobre es menor. Sin embargo, al concluir la lixiviación secundaria hay un aumento del rango de 15 puntos porcentuales en la disolución de cobre. Comparando los resultados de la segunda lixiviación de M5 y M6 alcanzan un 84 y 87% de disolución respectivamente, en tanto, P5 y P6 logran una recuperación de 82 y 86% de cobre, las recuperaciones para ambos sets de pruebas al finalizar la segunda etapa son similares. Finalmente, como consecuencia de la lixiviación terciaria, se verifica que las recuperaciones globales de cobre alcanzan la disolución casi total 96 y 97%.

En consecuencia, se considera que la última etapa del proceso es eficaz, puesto que logra disolver los compuestos refractarios asociados al cobre entregando entre 10 y 15 puntos

más de recuperación global. Al ser comparados con M5 y M6, se verifica que es posible lograr la misma recuperación aun cuando la lixiviación primaria trabaje en condiciones menos ácidas.

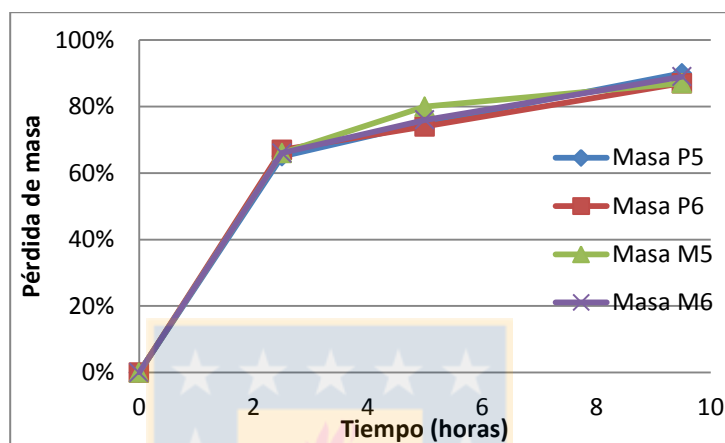


**Figura 47. Comparación de la recuperación de cobre obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P5, P6, M5 y M6, la condición de operación que varía entre un Set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

A lo largo del proceso, se aprecia según la Figura 48 que hay una pérdida de masa importante producto de la lixiviación primaria, a P5 y P6 se le asocian velocidades de solubilización de 306 y 310 g/h, y una dispersión mínima entre los resultados de pérdida de masa obtenidos para una primera instancia, fluctúan entre 65 y 67%. El grado de pérdida de masa en las presentes pruebas es prácticamente el mismo que el obtenido en las pruebas análogas del Set 2. Una vez más, se observa que es posible lograr resultados de recuperación globales disminuyendo la concentración de ácido en la primera etapa de lixiviación, pues como se menciona anteriormente con agua es posible disolver los compuestos asociados a varios elementos. Además, se deduce que los resultados obtenidos son confiables, ya que se observa un patrón que se repite a lo largo de todas las pruebas.

Producto de la lixiviación secundaria, hay un aumento cercano a los 10 puntos, alcanzando una disolución alrededor de  $\frac{3}{4}$  de la masa total, haciéndola una etapa poco eficiente, ya que no logra disolver mayor cantidad de masa en relación a la etapa precedente. Al comparar estas recuperaciones con las de M5 y M6, se aprecia que son muy similares a aquellas obtenidas en P5 y P6. En cuanto a la dispersión, es la misma que se obtuvo en una primera instancia (4 puntos).

En la última etapa de lixiviación, al concluir el proceso prácticamente toda la masa se ha disuelto, alcanzando alrededor de 15 puntos extra en esta etapa. Estas recuperaciones son muy similares a las resultantes de M5 y M6. Por ende, la pérdida de masa se comporta de igual forma que en el Set 2, sin tener incidencia la concentración del ácido sulfúrico en la lixiviación primaria.



**Figura 48. Comparación de las pérdidas de masa obtenida a lo largo de cada etapa de las pruebas P5, P6, M5 y M6, la condición de operación que varía entre un Set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

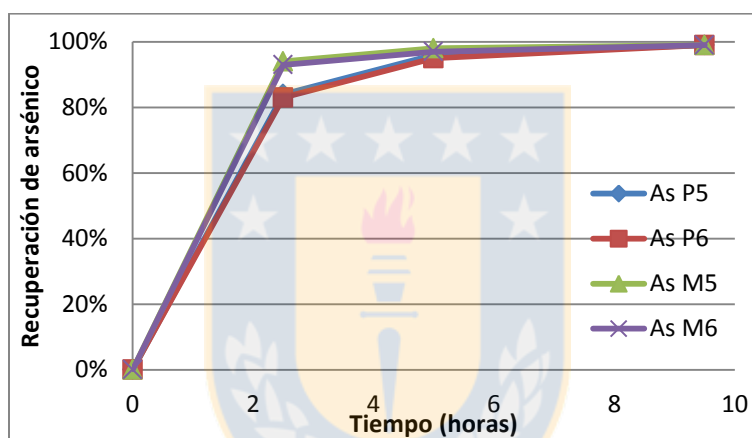
El comportamiento del arsénico frente a la lixiviación primaria de baja concentración de ácido, como se observa en la Figura 49 es muy disolutivo, puesto que aproximadamente el 85% de total queda solubilizado, producto de la primera etapa. Esto podría deberse a que el arsénico se encuentra en forma de especie altamente solubles. Apreciándose una dispersión mínima, de un punto, de lo que se deduce que las cinéticas de reacción son más altas en relación a las dos etapas siguientes, ambas alcanzan 48 g/h.

Al comparar estos datos con los resultantes de las pruebas del Set 2, se infiere que hay cerca de 10 puntos menos de recuperación, producto de la concentración del ácido.

En una segunda lixiviación se aprecia un aumento del rango de 10 puntos porcentuales, considerándose una baja recuperación y por ende una etapa poco eficiente, puesto que alcanza una recuperación de 95%. Además, se observa que la dispersión es de 1 punto porcentual, al igual que en la etapa anterior. Sin embargo, al finalizar la segunda lixiviación, prácticamente todo el arsénico está disuelto y los resultados obtenidos en la última etapa son esperables, de

acuerdo a todo lo presentado. Aun así, se aprecia que las recuperaciones obtenidas en el Set 2 son muy similares a los obtenidos en esta batería de pruebas.

La etapa terciaria evidencia el logro de una disolución total de las especies que contienen arsénico, sin embargo, no es exclusiva de esta etapa, ya que la solubilización se ha realizado en las etapas previas. El arsénico no se solubiliza por completo producto de la primera etapa, porque puede encontrarse ocluido y a lo largo de las etapas posteriores las capas que lo recubren han sido disueltas. Una vez más, se concluye que no hay influencia en la recuperación global al disolver el arsénico, puesto que la etapa secundaria logra lixiviar el arsénico remanente.



**Figura 49. Comparación de la recuperación de arsénico obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P5, P6, M5 y M6, la condición de operación que varía entre un Set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

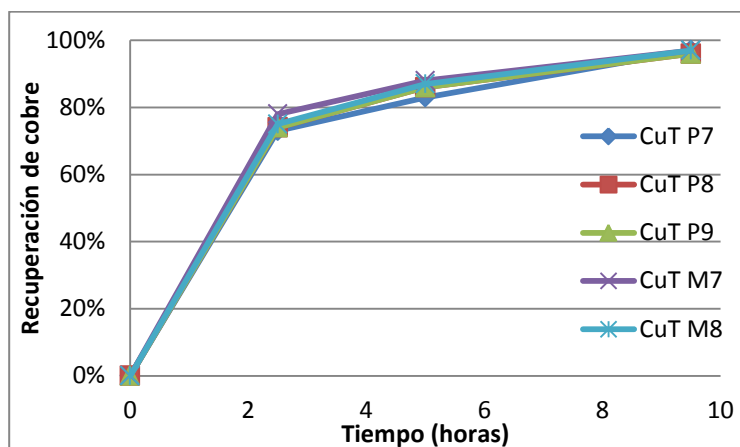
A partir del comportamiento observado en todas las pruebas descritas anteriormente, la baja recuperación de la segunda etapa se explicaría porque las dos primeras etapas del proceso son de carácter disolutivo. Por ende, la lixiviación secundaria se considera como prolongación de la primera. En cambio, la tercera lixivía las especies refractarias, pues es un proceso que entrega condiciones específicas de temperatura, pH y potencial.

#### 4.5.3 Resultados P7, P8 y P9

Al observar los resultados de la lixiviación primaria de las mezclas P7 (13% CPS, 14% CT, 45% HF y 30% ZT), P8 (12% CPS, 17% CT, 41% HF y 30% ZT) y P9 (12% CPS, 16% CT, 43% HF y

30% ZT) en la Figura 50, se aprecia que hay una lixiviación importante de cobre en los tres casos, alrededor de 75% del cobre pasa a la solución. Se observa que no hay una mayor dispersión de los resultados de recuperación obtenidos, puesto que los tres puntos que simbolizan el término de la etapa están ubicados a la misma altura. Al observar las recuperaciones obtenidas en las pruebas P7 y P8, se observa una similitud con M7 y M8. Además, la pronunciada pendiente que se obtiene de la disolución, revela que la velocidad de reacción es rápida si se compara con la cinética resultante en las etapas siguientes.

En la segunda etapa de lixiviación de cobre se observa que la eficiencia de esta disminuye y la velocidad de disolución tiende a ser más lenta que en la etapa precedente. Se alcanza un aumento del rango de 10 puntos porcentuales en relación a la lixiviación primaria. Hay una dispersión un poco mayor que la observada anteriormente. Aun así, al contraponer los resultados con aquellos correspondientes al Set 2, se infiere que la etapa secundaria tiene la misma eficacia en el presente Set como en la segunda batería. Por último, de la lixiviación terciaria se deduce que se trata de una etapa eficiente que logra aumentar más de 10 puntos de recuperación global de cobre. Por otra parte, el grado de disolución que se alcanza en esta última instancia es muy parecido al logrado en las pruebas M7 (13% CPS, 14% CT, 45% HF y 30% ZT) Y M8 (12% CPS, 17% CT, 41% HF y 30% ZT). Por consiguiente, hay un comportamiento similar en la recuperación de cobre en 2 de las 3 etapas del proceso, la etapa primaria es la única que presenta menores recuperaciones, pero esto no significa que influya en términos globales.



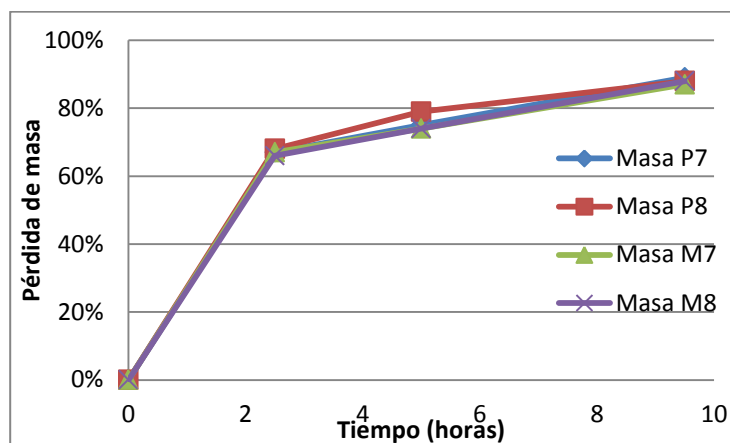
**Figura 50. Comparación de la recuperación de cobre obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P7, P8 P9, M7 y M8, la condición de operación que varía entre un Set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

A partir de la Figura 51 se deduce que ocurre una disolución o pérdida de masa importante producto de la primera etapa de lixiviación, muy similar para las seis pruebas (alrededor del 75%), la dispersión es mínima.

En una segunda etapa de lixiviación hay una baja pérdida de masa del sólido lixiviado, al lograrse un aumento de no más de 10 puntos porcentuales en relación a la etapa de lixiviación anterior.

Por último, se observa que la lixiviación terciaria logra recuperaciones globales que aumentan alrededor de 10 y 15 puntos. Las tres pruebas alcanzan resultados muy similares en relación a M7, M8 y M9. Aunque la concentración del agua acidulada de la etapa primaria sea más baja en relación a la primera lixiviación del Set 2, los resultados de disolución global una vez más son similares.

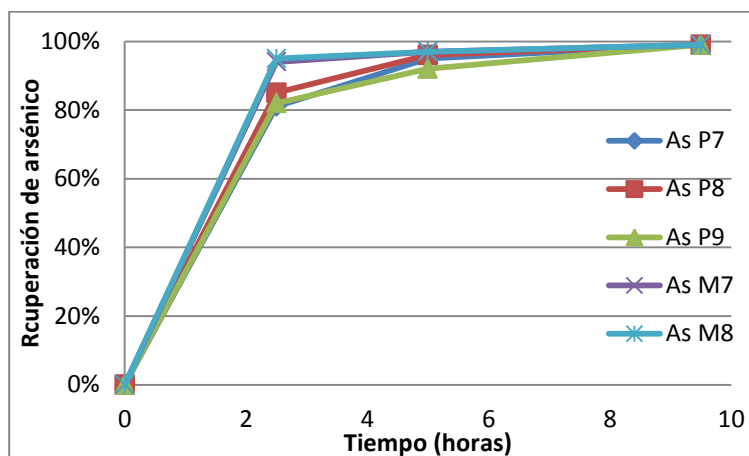




**Figura 51. Comparación de la pérdida de masa obtenida a lo largo de cada etapa de las pruebas P7, P8 P9, M7 y M8, la condición de operación que varía entre un Set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

En lo que se refiere al arsénico, según lo expuesto en la Figura 52, se aprecia que la descomposición de los compuestos mineralógicos asociados al arsénico a una baja concentración de ácido es muy efectiva y de cinéticas de disolución rápidas, en relación a las dos etapas siguientes, puesto que entre el 80 y 85% queda en solución en la primera etapa de lixiviación. En relación a las M7 y M8, se observa que hay una menor disolución de los compuestos asociados al arsénico. La lixiviación secundaria en cambio, presenta un aumento entre 10 y 15 puntos porcentuales en la recuperación global. Se deduce que hay una mayor efectividad en esta etapa para solubilizar el arsénico, puesto que en relación a las pruebas del Set 2, no hay un aumento sobre los 10 puntos. En lo que concierne a las velocidades de disolución éstas disminuyen considerablemente. En la lixiviación terciaria se alcanza la solubilización casi total de los compuestos de arsénico para todas las pruebas. Sin embargo, no se le puede atribuir a la última etapa el carácter disolutivo, puesto que ya estaba prácticamente todo el arsénico en solución.

Por lo tanto, se deduce que al igual que disolver el cobre, el comportamiento de la etapa primaria se ve afectado, pero la segunda etapa disuelve el arsénico remanente y en términos globales las disoluciones son las mismas que las alcanzadas en las pruebas análogas del segundo set.



**Figura 52. Comparación de la disolución de arsénico obtenido a lo largo de cada etapa de las pruebas P7, P8 P9, M7 y M8, la condición de operación que varía entre un Set y otro es la concentración del agua acidulada en la primera etapa.**

Por otro lado, al trabajar con la mitad de la concentración de ácido sulfúrico en la lixiviación primaria en relación al diseño original de las pruebas, se aprecia que la recuperación global de cobre al finalizar el proceso es la misma. Aunque la disolución sea de menor grado en una primera instancia, producto de una segunda lixiviación se remueve el cobre restante en el sólido. Debido al aumento de concentración tres veces mayor al utilizado en la primera etapa. Se observa el mismo comportamiento al tratar el arsénico, pero no así en la pérdida de masa, ya que ésta se solubiliza en ambos sets bajo el mismo patrón sin importar el rol del ácido. Esto significa que no hay una lixiviación selectiva del material, es decir, que hay ganga que se disuelve.

Para el caso de los polvos ZT, se observa que la presencia de éstos altera la predictibilidad de los resultados, ya que en las pruebas P1 (18% CPS, 19% CT y 64% HF), P2 (17% CPS, 25% CT Y 58% HF) y P3 (17% CPS, 22% CT Y 61% HF) se aprecia un aumento de eficiencia de la lixiviación secundaria al momento de recuperar cobre, masa o arsénico, en comparación con las pruebas M1 (18% CPS, 19% CT y 64% HF), M2 (17% CPS, 25% CT Y 58% HF) y M3 (17% CPS, 22% CT Y 61% HF). Sin embargo, la recuperación global al finalizar el proceso es similar en las pruebas M1, M2, M3, P1, P2 y P3. De acuerdo al diseño del segundo set de pruebas la diferencia en la concentración de ácido entre la primera y la segunda etapa es de 40 g/L, en cambio, dicha diferencia en el Set 4 es de 70 g/L. Por ende, para la última batería de pruebas la segunda etapa

recibe un  $\Delta$  de ácido mayor, el cual logra disolver compuestos que recubren especies de valor. Así, lixivia especies que la primera etapa no logró, puesto que el ácido no era suficiente.

En la etapa de lixiviación secundaria, dado los resultados el comportamiento de la pérdida de masa en las pruebas P5, P6, P7, P8 y P9 la lixiviación no es del todo eficiente, repitiéndose el comportamiento observado en las pruebas análogas del Set 2, aunque la concentración del agua acidulada sea más baja. Esto significa que los compuestos que conforman los polvos ZT son más refractarios y ninguna de las concentraciones utilizadas para la lixiviación primaria en cualquiera de las dos baterías de pruebas logra disolverlos del todo. Estos polvos son complejos, ya que su granulometría y composición son muy variadas, puesto que han sido sometidos a tiempo de envejecimiento, contaminación con material estéril de la ZT, etc. De todos modos, parece no ser relevante, pues aporta cobre y arsénico a la planta de ECL.

Dado que el cobre es el metal de interés, su recuperación es posible, inclusive disminuyendo el consumo de ácido en la primera etapa de lixiviación, puesto que en las etapas posteriores se logra solubilizar el cobre restante.

La segunda etapa de lixiviación es más efectiva mientras más polvos ZT haya en la mezcla, puesto que la recuperación primaria es levemente más baja. Esto se debe a las características refractarias de los polvos, como se menciona anteriormente, al haber una presencia significativa de polvos ZT la lixiviación primaria se hace menos eficiente. Al comparar los resultados de la Figura 47 y Figura 50, se observa que mientras más ZT haya en la mezcla, más importante es el rol del ácido. Por lo tanto, al haber más polvos ZT habrá una menor recuperación y el aumento de ácido en la etapa secundaria disuelve lo que la etapa precedente no pudo, por falta de ácido.

Se concluye que la recuperación global alcanza los mismos valores, ya sea alterando la concentración del agua acidulada en la primera etapa de lixiviación o bien modificando la cantidad de polvos ZT. Por lo tanto, la lixiviación terciaria juega un rol preponderante para la recuperación, pues es la que logra recuperar el cobre asociado a las especies refractarias. Sin embargo, no hay que descuidar la lixiviación primaria, ya que si no se recuperan cantidades de cobre y arsénico significativas éstas quedarán como remanentes y serán disueltos por la lixiviación terciaria (de alta concentración y temperatura) y la recuperación podría bajar por sobresaturación de cobre en el PLS.

#### 4.6 Estudio de cinética

A partir del estudio de cada etapa de las pruebas cinéticas se observa que, las cinco primeras realizadas con mezclas de polvos provenientes exclusivamente de la fundición, no se logra conocer el orden de reacción en ninguna de sus etapas. Por ende, no es posible calcular la constante de velocidad  $k$ , que represente la velocidad con la que ocurre la reacción global del proceso. Lo mismo ocurre en las últimas cuatro pruebas, que trabajan con una mezcla de polvos de 30% ZT y 70% TT. En el Anexo 7.9.1, 7.9.2, 7.9.3, 7.9.10, 7.9.11 y 7.9.12 se observan las figuras que revelan que ningún modelo se ajusta a los datos obtenidos en las pruebas.

Por otro lado, al lixiviar polvos exclusivamente de la ZT, se obtiene para la primera etapa una reacción de orden cero. Se observa en el Anexo 7.9.4 en la Figura 64 que  $R^2 = 0,8688$ , éste valor representa un error bajo al ajustar los resultados obtenidos al modelo correspondiente al orden de reacción cero. La constante de velocidad asociada para el orden de reacción cero es  $k=0,0628$  g/h. Para la lixiviación secundaria y terciaria se observa en los Anexos 7.9.5 y 7.9.6 que no es posible asociarles un orden de reacción cero, uno o dos.

Por último, se aprecia que en las pruebas C11, C12, C13, C14 y C15 (50% TT y 50% ZT), en las etapas primarias (Anexo 7.9.7) y terciarias (7.9.9), el orden de reacción cero. Puesto que,  $R^2$  es 0,7744 y 0,7512, respectivamente. Las constantes de velocidad que se asocian a éstas reacciones son 0,0726 g/L\*h para la lixiviación primaria y 0,0491 g/L\*h para la lixiviación secundaria.

Es así que no se logra definir el orden de reacción en la mayoría de las etapas de cada prueba, ya que no se tiene claridad de la totalidad de las reacciones que ocurren, puesto que no se conocen con certeza los compuestos asociados al cobre que se disuelven frente al ácido, a la procedencia y mecanismo de cómo se generan los polvos en los sistemas de enfriamiento en la fundición es que se torna dificultoso identificar estas especies, mayoritariamente son compuestos amorfos y/o compuestos no estequiométricos. Lo anterior genera problemas en la identificación de estas especies con las técnicas convencionales como son difracción de rayos X, microscopía electrónica (SEM, TEM, etc.). Se sabe que se produce una disolución de sales y una descomposición mayoritaria de óxidos, pero no existe claridad de éstas, ya que pueden ocurrir simultáneamente con mecanismos cinéticos distintos. En la Tabla 14 se pueden observar el

valor de  $k$ ,  $R^2$  y el orden de la reacción. De todos modos, se considera que un  $R^2$  que fluctúe entre 0,7 y 0,8 no es un buen ajuste. En el Anexo 7.9 se observan las curvas obtenidas que definen que no es posible determinar el orden de reacción.

**Tabla 14. Resumen de las constantes de velocidad cinéticas obtenidas a partir del Set 3.**

		Orden	k g/L*h	$R^2$
C1-C5	LIX 1	-	-	-
	LIX 2	0	0,0114	0,7476
	LIX 3	-	-	-
C6-C10	LIX 1	0	0,0628	0,8688
	LIX 2	-	-	-
	LIX 3	-	-	-
C11-C15	LIX 1	0	0,0726	0,7744
	LIX 2	-	-	-
	LIX 3	0	0,0491	0,7512
C16-C19	LIX 1	-	-	-
	LIX 2	-	-	-
	LIX 3	-	-	-

#### 4.7 Comportamiento de pH y potencial

Por otro lado, se observa que no hay una variación importante de pH ni de potencial en cada una de las etapas, tal como se observa en las en las Tablas 32, 33, 34 y 35 de los Anexos 7.10. Todas las mediciones de potencial Redox se realizaron con electrodo Ag/AgCl, es decir, que para situar estos valores en un Diagrama de Pourbaix y estudiar las zonas de estabilidad es necesario sumar a los valores de potencial obtenidos 201 mV. Al comparar todas las pruebas, el pH promedio en la lixiviación primaria fluctúa entre 0,27 y 2,93. El menor valor corresponde a la lixiviación primaria de polvos CPS con agua acidulada de 60 g/L, en cambio el extremo de mayor valor resulta de la primera lixiviación de polvos del HF con agua. Mientras que el potencial varía entre 203,6 y 365,95 mV. El primer valor corresponde a la lixiviación primaria de HF con agua acidulada y el segundo a los polvos CT lixiviados con agua. En esta etapa de lixiviación, las pruebas que presentan valores pH sobre 1, son aquellas realizadas con agua o bien con agua acidulada de 30 g/L, es decir, las del Set 1 y 4. Ver Tabla 32 y Tabla 35, Anexo 7.10.

Por otro lado, a lo largo de la etapa secundaria de lixiviación, los valores de pH también presentan una fluctuación acotada entre -0,27 y 0,66, estos valores corresponden a las pruebas P8 y C6, respectivamente. La tensión varía entre 284,14 y 465,95 mV, que corresponden a las pruebas de ZT + Agua y P2, respectivamente. Si bien el menor valor de potencial se registró para la prueba CT + Agua (264,14 mV) este valor es idéntico al registrado para la misma mezcla, pero en la lixiviación primaria, por lo que se descarta, pues puede estar asociado a una mala manipulación. Por último, la etapa terciaria presenta pH muy ácidos que van desde -0,61 hasta -0,07, y el potencial varía entre 360,33 y 512,82 mV. En la lixiviación primaria, las pruebas que presentan valores pH sobre 1, son aquellas que trabajaron con agua o bien con agua acidulada de 30 g/L, es decir, las del Set 1 y 4.

A lo largo de las dos primeras etapas de lixiviación se observa que hay una disminución de la temperatura a lo largo que se desarrolla el proceso, pero esta no varía más de 10 °C.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- Es factible optimizar la recuperación de la planta, ya que hay un margen entre la recuperación histórica de cobre (88%) y el test de máxima recuperación (95%).
- Los resultados de las pruebas de lixiviación muestran que es posible disolver el Cu y As contenidos en los polvos utilizando agua y agua acidulada. Puesto que, al lixiviar cada tipo de polvo recibido en ECL variando la concentración de ácido sulfúrico en la etapa primaria (0 g/L y 60 g/L), se lograron recuperaciones para polvos de CPS de 98% y 94% respectivamente. Para CT un 99% y 98%, respectivamente, para HF 96% en ambos casos y para los polvos ZT se alcanzó un 92% y un 95%, respectivamente.
- Los polvos CT, HF y ZT lixiviados por separado presentaron una cinética más rápida al realizarse la lixiviación primaria en un medio acidulado, abriendo posibilidades a una mejora de diseño de pruebas.
- Es posible disolver sólo con agua las especies de As contenidas en los polvos, lográndose recuperaciones en la etapa primaria de lixiviación del orden del 90% y globalmente se alcanzan recuperaciones de As entorno al 99%.
- Para la pérdida de masa de polvos y para la recuperación de cobre global, los valores alcanzados en promedio fueron 90 y 95%, respectivamente para todas las pruebas.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en todas las pruebas, se puede afirmar que la segunda etapa de lixiviación ensayada en este trabajo no es una lixiviación propiamente tal, ya que su aporte a la recuperación global fluctúa entre 10 y 15 puntos porcentuales. Por lo tanto, se puede denominar las etapas del proceso de lixiviación de polvos en: Etapa de Disolución de especies altamente solubles en medio acuoso y Etapa de Lixiviación de especies refractaria
- Al comparar los resultados de las lixivaciones de mezclas de polvos de fundición con los obtenidos en la disolución de mezclas con alta presencia de ZT, se concluye que la presencia de polvos ZT no influye en la recuperación global de cobre. Al ser mezclados con polvos de

granulometría fina en proporciones controladas, el comportamiento que presentan frente a la lixiviación resulta ser favorable.

- Al variar el tiempo de reacción las recuperaciones globales permanecen entorno al 95%, por lo que se concluye que la lixiviación de los polvos de fundición que recibe ECL son de alta cinética, lo que ofrece muy buenas expectativas frente a potenciales aumentos de capacidad de planta, con los mismos reactores actualmente instalados.
- Las recuperaciones de cobre y arsénico alcanzadas en las pruebas cinéticas son las mismas para media hora de residencia como para tiempos más prolongados.
- De acuerdo a las pruebas cinéticas realizadas no se encontró ningún orden de reacción que se ajustara correctamente.
- Las variaciones de potencial Redox para la lixiviación primaria no es del todo importante, puesto que la diferencia entre todas las pruebas no supera 160 mV. Lo que concierne al pH solamente las pruebas realizadas con agua o agua acidulada de 30 g/L presentan pH sobre 1. Todas las otras mediciones varían entre -0,6 y 2,93. Aunque en su mayoría todas están en el rango de 0,5.

## 5.2 Recomendaciones

A partir del análisis de los resultados obtenidos se pueden asentar las bases para un nuevo diseño de pruebas de lixiviación que apunten a una reducción del tiempo de residencia en los reactores y que replanteen las concentraciones de ácido sulfúrico que se utilizan actualmente.

Según lo expuesto, se podría reconsiderar la concentración de ácido en el agua acidulada que se emplea en la primera etapa por una más baja según se observa en el primer y último set de pruebas. Permitiendo así enviar PLS a la P-AAA con menos ácido y por ende utilizar menos caliza, generar menos yeso, reducir la cantidad de residuo arsenical y así se disminuye volumen de material a transportar al botadero DRIS-P y la disposición final del precipitado, extendiendo la vida útil del lugar autorizado para su disposición. Además, esto permite reducir costos en el consumo de ácido sulfúrico y disminuir el daño de los equipos en términos de corrosión. Por lo anterior, podría obviarse llevar a cabo la lixiviación primaria con ácido.

A pesar de que al finalizar la segunda etapa del proceso, el cobre que queda remanente en las borras es poco significativo para ser disuelto, al utilizar un agua acidulada altamente



concentrada se logra lixiviar el cobre remanente. Por lo tanto, al combinar una alta acidez con el incremento de la temperatura, se logra potenciar la disolución de cobre.

La segunda etapa de lixiviación debe suprimirse, puesto que se trata de una lixiviación de baja eficiencia que no tiene aporte sustancial al proceso. La tercera etapa cumple la función de lixiviar el cobre restante (contenido en fases refractarias) de la etapa primaria. Esta medida lograría disminuir el tiempo de residencia del proceso, permitiendo tratar mayor cantidad de polvos de fundición.

Realizar pruebas cinéticas con intervalos de tiempo más acotados (10, 15, 20 minutos por cada etapa). Con el fin de definir con más exactitud cuánto tiempo se necesita para disolver el cobre y arsénico contenido en los polvos.

Se propone realizar las mismas pruebas a escala laboratorio, pero con recirculación del PLS, la solución producto de la lixiviación primaria se utiliza en la lixiviación secundaria y el PLS de la etapa terciaria se utilizaría como agente lixivante en la etapa primaria (imitando esa condición de planta). Con el fin de verificar si la recuperación en Planta Industrial disminuye en relación a las pruebas realizadas producto de la saturación del PLS.

Se propone hacer un estudio mineralógico de los polvos y las borras resultantes de cada etapa, con el fin de conocer las especies que participan en la lixiviación al igual que las reacciones que ocurren. Anteriormente, se trabajó bajo el supuesto que los polvos son en su mayoría óxidos y de sales sulfatadas, pero se desconocen específicamente los compuestos. Considerando lo anterior, se podría tener mayor conocimiento del comportamiento cinético del proceso, dado que la mayoría de los polvos presentan compuestos alterados térmicamente en las etapas fusión-conversión, formando especies pseudo estequiométricas, de ahí que sea muy difícil de obtener el orden de una reacción química y así caracterizar el cobre no insoluble. Se hace necesario, para asegurar la confiabilidad de los datos, repetir las mismas pruebas para disminuir la desviación estándar de la experimentación realizada.

## 6 REFERENCIAS

[1] ECOMETALES, Operaciones-y-proyectos/abatimiento-de-arsenico-y-antimonio, Sitio Web:  
<http://www.ecometales.cl>

[2] OPTIMIZA INGENIERIA Y DESARROLLO S.A, PROYECTO EMPAQUETAMIENTO DEL PROCESO AAA, Informe descriptivo proceso actual.

[3] Extractive Metallurgy of copper, Fourth Edition, W.G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas, Capítulo 7.

[4] CODELCO, GERENCIA DE FUNDICIÓN,  
[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2009/2/MI51A/1/material\\_docente/previsualizar?id\\_material=248510](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2009/2/MI51A/1/material_docente/previsualizar?id_material=248510)

[5] Extractive Metallurgy of copper, Fourth Edition, W.G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas, Capítulo 9.

[6] Butts A. Copper: The science and technology of metal, its alloys and compounds, 1970. Págs 300-311

[7] Ruiz, María Cristina. 2013. Libro de Hidrometalurgia. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.

[8] UNIVERSIDAD SANTIAGO, [metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo14.pdf](http://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgica/files/paginas/capitulo14.pdf)

[9] QUIMICA, Séptima edición, RAYMOND CHANG, WILLIAMS COLLEGE, Capítulo 13.

[10] Determinación de perfiles granulométricos, CIMM T&S S.A. Sede Calama, 09 de septiembre 2010.

## 7 ANEXOS

### 7.1 Distribución de polvos

El transporte de polvos de fundición se realiza durante las 24 horas del día y en dos turnos. Durante el turno A, idealmente se retiran los TT en un total de 3 viajes que realiza el camión con 25-30 t. Estos se pueden ver afectados por variables como la congestión vehicular que exista en la pesa romana 3 o el lugar de descarga de los camiones. Cuando la descarga del camión se realiza en el silo dura entre 30 y 40 minutos, dependiendo del grado de humedad (sujeto a los hornos que producen los polvos). En cambio, si la descarga se realiza en el Re-004 o Re-010, el tiempo necesario es de 2 h, viéndose afectado el flujo de alimentación de polvos a la PTP.

Si no se presentan inconvenientes y el turno se desarrolla normalmente, el tiempo se distribuye como se indica en la Tabla 15:

**Tabla 15. Horario estándar del Turno A de Valle de la Luna**

6:30	Llegada trabajadores a ECL
6:30-7:00	Cambio de turno, preparación del EPP, charla, ART, instrucciones
7:15	Salida del camión, recorrido: ECL - Romana 3 – TT - Cargar camión - Romana 3 – ECL
9:50	Llegada del camión a ECL
9:50-10:20	Descarga del Silo
10:25	Salida del camión, recorrido: ECL - Romana 3 – TT - Cargar camión - Romana 3 – ECL
13:00	Descarga del Silo
13:40-13:35	Hora de almuerzo
13:40-14:40	Salida del camión, recorrido: ECL - Romana 3 – TT - Cargar camión - Romana 3 – ECL
14:45	Llegada del camión a ECL
17:30	Llegada del camión a ECL
17:35-18:05	Descarga del Silo

La TT debe mantenerse vacía, libre de polvos, se pretende realizar esta tarea durante el Turno A. Puesto que por motivos ambientales, el traslado de polvos ZT se realiza durante el turno B.

Los camiones realizan dos viajes durante la noche cuya duración es más extensa porque es necesario realizar una separación de tamaño con un harnero previo a cargar el camión. Este procedimiento tarda aproximadamente 2 h. Al igual que en el turno A, la duración de cada viaje-carguío-descarga de los camiones puede verse afectada por variables sujetas al transporte y/o maquinaria. Además se debe considerar que la primera descarga al silo debe realizarse antes de las 00:00 y la segunda después de dicha hora.

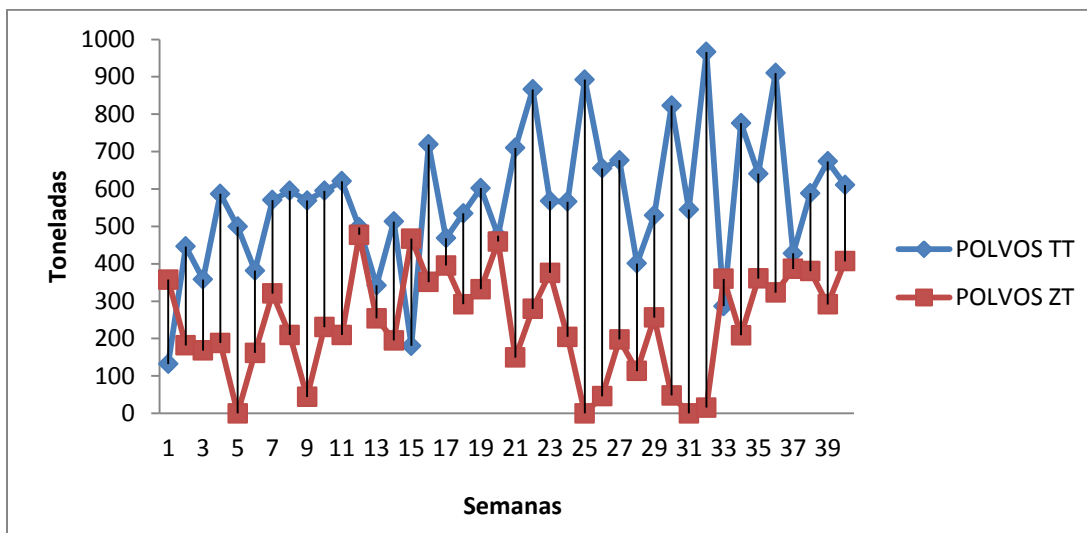
Al no presentarse inconvenientes y el turno desarrollarse normalmente el tiempo se distribuye como se indica en la Tabla 16.

**Tabla 16. Horario estándar del Turno B de Valle de la Luna**

18:30	Llegada de trabajadores a ECL
18:30 - 19:15	Cambio de turno, preparación del EPP, charla, ART, instrucciones
19:15	Salida del camión, recorrido: ECL - Romana 3 -ZT -harnear material y cargar camión – Romana 3 – ECL
23:45	Llegada a ECL
23:50 - 00:10	Descargar Silo
00:15 - 01:15	Hora de comida
1:20	Salida del camión, recorrido: ECL - Romana 3 -ZT -harnear material y cargar camión – Romana 3 – ECL
5:50	Llegada a ECL
5:55 - 6:25	Descargar Silo

Generalmente, es difícil cumplir con este itinerario, ya que para mantener la TT libre de polvos es necesario realizar viajes durante ambos Turnos. Esto explica porque hay camiones que transportan masas provenientes de la TT con menos de 1 t de polvo.

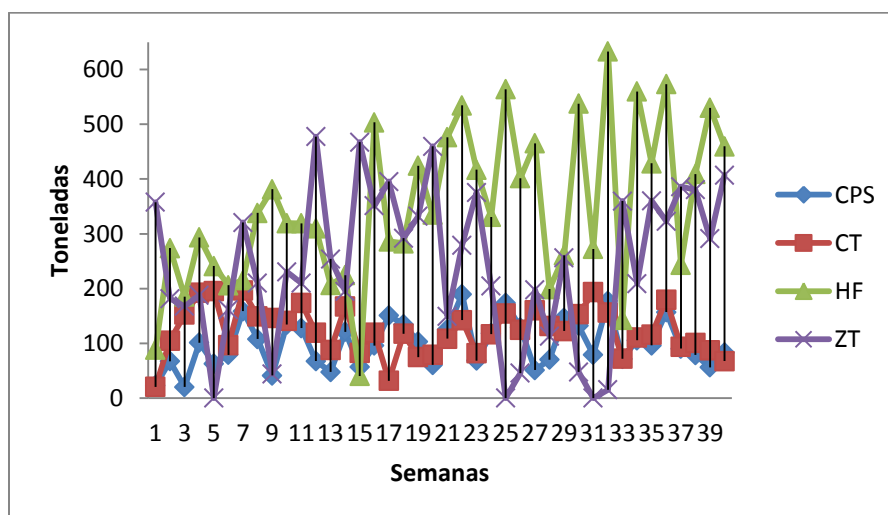
## 7.2 Tonelaje de Polvo



**Figura 53. Fluctuaciones del tonelaje de Polvos TT y ZT**

La composición de los polvos TT no está definida y la carga del camión queda a criterio del operador de las tolvas, por lo tanto, la composición de cada camión que transporta TT es variable y está sujeta a la producción de los hornos.

La masa total de polvos CPS ha sido similar a la de los polvos CT durante el 2016 mientras que la masa de polvos del HF ha sido la predominante a partir de la semana 16 sufriendo fuertes fluctuaciones.



**Figura 54. Fluctuaciones de los tonelajes de los Polvos CPS, CT, HF y ZT.**

### 7.3 Desarrollo de la actividad.

- Obtener una muestra de 60 L de ácido de planta industrial, respetando el protocolo de toma de muestra de planta industrial, de envío, recepción y manipulación de muestras y el protocolo de almacenamiento, retiro y manipulación de sustancias peligrosas.
- Extraer polvos de fundición de origen CT, CPS, HF y ZT, 20 kg de cada uno, respetando el protocolo de envío, recepción y manipulación de muestras, toma de muestras en planta industrial y almacenamiento, retiro y manipulación de sustancias peligrosas.
- Muestrear 1,5 kg de cada tipo de polvo. Respetando el protocolo de muestreo y roleo de sólidos y el de trabajo con materiales con contenido de As y Sb.
- Medir la gravedad específica de cada uno, respetando el protocolo de manipulación de material de vidrio, utilización de balanzas y de análisis físico de líquidos y sólidos.
- Separar una muestra de 50 g de cada tipo de polvos, para enviar a análisis químico para su caracterización por: Cu total, Cu soluble, Fe total, As total, Sb total, Bi total y Cd total, según el protocolo de trabajo con materiales con contenido de As y Sb, el protocolo de envío, recepción y manipulación de muestras, toma de muestras del laboratorio y utilización de balanzas.

Una vez disponibles los insumos a utilizar, se procede al montaje del circuito de lixiviación que consta de 3 etapas:

#### 2.1.8 Lixiviación 1.

1. Tarar un reactor cerrado y vacío de 5 L con la termocupla, abrazadera y el agitador correspondiente, respetando el protocolo de utilización de material de vidrio y utilización de balanzas.
2. Montar el reactor sobre un manto calefactor e instalar el equipo de agitación mecánica dentro del reactor, fijando las aspas del agitador a 4 cm del fondo del reactor, respetando el protocolo de utilización de manto calefactor y utilización de equipo de agitación mecánica.

3. Agregar al reactor el agua y el ácido sulfúrico para respetar la acidez según las condiciones previstas para alcanzar un 20% sólido según las fórmulas (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25), (26), (27) y (28). La temperatura ideal se alcanza adicionando el agua, el ácido y los polvos, respectivamente, respetando el protocolo de utilización de balanzas, preparación de soluciones, utilización de material de vidrio y trabajo con materiales con contenido de As y Sb.
4. Controlar la temperatura al inicio de la prueba, al finalizarla y cada 30 minutos. Tomando 25 mL de pulpa con una pipeta y luego filtrándola para medir el pH y el potencial Redox con la misma frecuencia, respetando el protocolo de preparación de soluciones.
5. Mantener la pulpa en agitación constante durante la preparación y el tiempo de residencia asignado según la prueba, respetando el protocolo de utilización de equipo de agitación mecánica.
6. Finalizado el tiempo medir el pH de la solución, el potencial Redox y la temperatura, luego proceder a la filtración de la pulpa obtenida a partir de la prueba, respetando el protocolo de filtración de muestras al vacío.
7. Tomar una muestra de 50 g de borra húmeda, realizar dos lavados con repulpeo. Primero con agua acidulada 3 g/L a razón 1:2 de masa borra/masa agua acidulada. Luego filtrar dicha pulpa y realizar un segundo lavado con agua destilada a razón 1:1 de masa borra/masa agua, respetando el protocolo de utilización de balanzas, preparación de soluciones, filtración de muestras al vacío, de agitación mecánica y de utilización de material de vidrio.
8. La muestra lavada es llevada al horno de secado a 100 °C durante 1,5 h. Luego se pulveriza y se pasa por malla #100. Finalmente se envía a análisis químico y físico (gravedad específica y % de humedad), respetando el protocolo de utilización de horno de secado, utilización de material de vidrio, pulverización con equipo BICO y análisis físico y químico de sólidos.
9. La borra húmeda restante pasa a la lixiviación 2.

#### **2.1.9 Lixiviación 2.**

1. Tarar un reactor cerrado y vacío de 5 L con la termocupla y el agitador correspondiente, respetando el protocolo de utilización de material de vidrio y utilización de balanzas.

2. Montar el reactor sobre un manto calefactor e instalar el equipo de agitación mecánica dentro del reactor, fijando las aspas del agitador a 4 cm del fondo del reactor, respetando el protocolo de utilización de manto calefactor y utilización de equipo de agitación mecánica.
3. Agregar al reactor el agua y ácido sulfúrico necesario para respetar la acidez según las condiciones previstas, posteriormente adicionar la borra húmeda obtenida en la etapa anterior para completar los 5 L del reactor según las fórmulas (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25), (26), (27) y (28), respetando el protocolo de utilización de balanzas, preparación de soluciones y utilización de material de vidrio.
4. Poner en funcionamiento el equipo de agitación para la homogenización de la pulpa a una velocidad y tiempo asignado según la prueba, respetando el protocolo de utilización de equipo de agitación mecánica.
5. Controlar la temperatura al inicio de la prueba, al finalizarla y cada 30 minutos. Tomando 25 mL de pulpa con una pipeta y luego filtrándola para medir el pH y el potencial Redox con la misma frecuencia, respetando el protocolo de preparación de soluciones.
6. La pulpa se mantiene en agitación constante durante la preparación y el tiempo de residencia asignado según la prueba, respetando el protocolo de utilización de equipo de agitación mecánica.
7. Finalizado el tiempo medir el pH de la solución, el potencial Redox y la temperatura, luego proceder a la filtración, respetando el protocolo de filtración de muestras al vacío, según el protocolo de análisis físicos y químicos de sólidos, utilización de balanzas y utilización de material de vidrio.
8. Tomar una muestra de 50 g de borra húmeda, realizar dos lavados con repulpeo. Primero con agua acidulada 3 g/L a razón 1:2 de masa borra/masa agua acidulada. Luego filtrar dicha pulpa y realizar un segundo lavado con agua destilada a razón 1:1 de masa borra/masa agua, respetando el protocolo de utilización de balanzas, preparación de soluciones, filtración de muestras al vacío, de agitación mecánica y de utilización de material de vidrio.
9. La muestra lavada es llevada al horno de secado a 100 °C durante 1,5 h. Luego se pulveriza y se pasa por malla #100. Luego se envía a análisis químico y físico (gravidad



específica y % de humedad), respetando el protocolo de utilización de horno de secado, utilización de material de vidrios y análisis físico y químico de sólidos.

10. La borra húmeda restante pasa a la lixiviación 3.

### **2.1.10 Lixiviación 3.**

1. Tarar un reactor cerrado y vacío de 5 L con la termocupla y el agitador correspondiente, respetando el protocolo de utilización de material de vidrio y utilización de balanzas.
2. Montar el reactor sobre un manto calefactor e instalar el equipo de agitación mecánica dentro del reactor, fijando las aspas del agitador a 4 cm del fondo del reactor, respetando el protocolo de utilización de manto calefactor y utilización de equipo de agitación mecánica.
3. Agregar al reactor el agua, el ácido sulfúrico necesario para respetar la acidez según las condiciones previstas, posteriormente adicionar la borra húmeda obtenida en la etapa anterior y el agua acidulada a 300 g/L para completar los 5 L del reactor según las fórmulas (19), (20), (21), (22), (23), (24), (25), (26), (27) y (28), respetando el protocolo de utilización de balanzas, preparación de soluciones y utilización de material de vidrio.
4. Poner en funcionamiento el equipo de agitación para la homogenización de la pulpa a una velocidad y tiempo asignado, según la prueba, respetando el protocolo de utilización de equipo de agitación mecánica.
5. Controlar la temperatura al inicio de la prueba, y si se hace necesario poner en funcionamiento el manto calefactor para alcanzar la temperatura requerida, y cada 30 minutos controlarla. Se toma una muestra de 25 mL de pulpa con una pipeta y luego se filtra para medir el pH y el potencial Redox con la misma frecuencia, respetando el protocolo de preparación de soluciones.
6. La pulpa se mantiene en agitación constante durante la preparación y el tiempo de residencia asignado según la prueba respetando el protocolo de utilización de equipo de agitación mecánica.
7. Finalizado el tiempo medir el pH de la solución, el potencial Redox y la temperatura, luego proceder a la filtración, respetando el protocolo de filtración de muestras al vacío. Respetando el protocolo de análisis físicos y químicos de sólidos, utilización de balanzas y utilización de material de vidrio.

8. Realizar dos lavados a toda la borra resultante con repulpeo, primero con agua acidulada 3 g/L a razón 1:2 de masa borra/masa agua acidulada. Luego filtrar dicha pulpa y realizar un segundo lavado con agua destilada a razón 1:1 de masa borra/masa agua, respetando el protocolo de utilización de material de vidrio, de agitación mecánica y el de muestras al vacío.
9. Tomar una muestra de 50 g de borra húmeda, realizar dos lavados con repulpeo. Primero con agua acidulada 3 g/L a razón 1:2 de masa borra/masa agua acidulada. Luego filtrar dicha pulpa y realizar un segundo lavado con agua destilada a razón 1:1 de masa borra/masa agua, respetando el protocolo de utilización de balanzas, preparación de soluciones, filtración de muestras al vacío, de agitación mecánica y de utilización de material de vidrio.
10. Finalmente llevar la muestra al horno de secado a 100 °C durante 1,5 h. Luego se pulveriza, se pasa por malla #100 y se envía a análisis químico y físico (gravedad específica y %humedad), respetando el protocolo de utilización de horno de secado, análisis físicos de sólidos y líquidos.
11. La borra húmeda restante se guarda como testigo, respetando el protocolo de toma de muestra de laboratorio, análisis físicos de sólidos y líquidos, utilización de material de vidrio y envío, recepción y manipulación de muestras.
12. Housekeeping del área.

$$\rho_{pulpa} = \frac{\rho_{polvos} * \rho_{agua}}{(\rho_{agua} - \rho_{sólido}) * \%polvos + \rho_{sólido}} \quad 19)$$

$$m_{pulpa} = \rho_{pulpa} * V_{pulpa} \quad 20)$$

$$m_{polvos} = m_{pulpa} * \%sólido \quad 21)$$

$$m_{solución} = \frac{m_{polvos} * (1 - \%polvos)}{\%polvos} \quad 22)$$

$$V_{solución} = \frac{m_{solución}}{\rho_{agua}} \quad 23)$$

$$m_{\text{ácido a agregar}} = V_{\text{solución}} * [H_2SO_4]_{\text{ajuste}} \quad 24)$$

$$m_{\text{ácido real a agregar}} = \frac{m_{\text{agregar de ácido}}}{\% \text{pureza ácido de planta}} \quad 25)$$

$$V_{\text{ácido real a agregar}} = \frac{m_{\text{ácido real a agregar}}}{\rho_{\text{ácido de planta}}} \quad 26)$$

$$V_{\text{agua para la pulpa}} = V_{\text{solución}} - V_{\text{ácido real a agregar}} \quad 27)$$

$$m_{\text{agua para la pulpa}} = \rho_{\text{agua}} * V_{\text{agua para la pulpa}} \quad 28)$$

#### 7.4 Mezcla de polvos utilizada en el segundo Set de pruebas

**Tabla 17. Composición detallada de las mezclas de polvos para el Set 2 de pruebas**

	CPS (%)	CT (%)	HF (%)	ZT (%)
M1	18%	19%	64%	0%
M2	17%	25%	58%	0%
M3	17%	22%	61%	0%
M4	9%	10%	32%	50%
M5	9%	12%	29%	50%
M6	9%	11%	30%	50%
M7	13%	14%	45%	30%
M8	12%	17%	41%	30%
M9	12%	16%	43%	30%

#### 7.5 Set 1.

**Tabla 18. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos CPS con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria, las unidades de medida son g/h.**

	CPS + Agua			CPS + Agua Acidulada		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	17,88	366,83	86,64	17,82	357,76	86,62
Lix 2	1,32	44,12	8,95	0,36	17,97	8,04
Lix 3	0,47	15,06	0,85	0,58	22,15	1,27

**Tabla 19. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos CT con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria, las unidades de medida son g/h.**

	CT + Agua potable			CT + Agua Acidulada		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	11,82	291,15	52,59	21,85	373,01	66,43
Lix 2	11,01	129,25	26,89	1,15	42,11	13,85
Lix 3	0,57	11,32	1,11	0,37	7,88	0,92

**Tabla 20. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos HF con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria, las unidades de medida son g/h.**

	HF + Agua			HF + Agua Acidulada		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	50,54	177,78	1,85	85,40	309,55	25,50
Lix 2	38,40	155,26	24,32	0,50	23,57	1,24
Lix 3	6,46	33,10	0,68	8,23	33,69	0,30

**Tabla 21. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas de lixiviación de polvos ZT con agua potable y agua acidulada en la etapa primaria, las unidades de medida son g/h.**

	ZT + Agua			ZT + Agua Acidulada		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	50,54	200,72	10,59	76,36	296,56	34,73
Lix 2	30,32	101,34	24,22	12,56	47,24	0,93
Lix 3	10,24	52,76	0,72	8,02	36,81	0,42

## 7.6 Set 2.

**Tabla 22. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas M1, M2 y M3, las unidades de medida son g/h.**

	M1			M2			M3		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	68,61	324,08	39,57	66,40	334,52	42,17	67,01	328,29	40,42
Lix 2	3,87	18,21	1,95	2,12	10,08	2,15	4,75	32,45	1,63
Lix 3	3,97	37,37	0,67	4,66	43,59	0,69	3,36	29,56	0,56

**Tabla 23. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas M4, M5 y M6, las unidades de medida son g/h.**

	M4			M5			M6		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	72,25	314,18	37,71	69,58	311,80	41,32	81,11	311,44	35,14
Lix 2	10,29	24,04	1,04	7,32	64,53	1,77	4,86	45,46	1,46
Lix 3	8,91	43,43	0,31	6,05	17,35	0,13	5,58	33,19	0,39

**Tabla 24. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas M7 y M8, las unidades de medida son g/h.**

	M7			M8		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	70,49	315,47	37,14	64,88	312,38	41,38
Lix 2	9,21	32,97	1,04	10,50	34,44	0,72
Lix 3	4,54	34,02	0,43	4,68	37,85	0,54

### 7.7 Set 3.

**Tabla 25. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C1, C2, C3, C4 y C5, las unidades de medida son g/h.**

Prueba	Etapas	Cu	Masa	As
C1	Lix 1	294,36	1703,85	203,04
	Lix 2	12,10	116,14	6,33
	Lix 3	26,34	131,52	3,37
C2	Lix 1	145,86	856,18	45,26
	Lix 2	4,85	42,25	60,29
	Lix 3	-2,04	24,75	0,82
C3	Lix 1	99,80	564,03	66,26
	Lix 2	3,93	42,10	1,81
	Lix 3	8,24	62,73	1,25
C4	Lix 1	70,29	415,41	2,14
	Lix 2	5,55	37,23	1,67
	Lix 3	3,94	37,21	0,68
C5	Lix 1	67,01	328,29	40,42
	Lix 2	4,75	32,45	1,63
	Lix 3	3,36	29,56	0,56

**Tabla 26. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C6, C7, C8, C9 y C10, las unidades de medida son g/h.**

Prueba	Etapas	Cu	Masa	As
C6	Lix 1	302,83	1313,54	183,14
	Lix 2	106,77	293,72	10,70
	Lix 3	67,35	293,88	11,82
C7	Lix 1	175,18	695,77	90,69
	Lix 2	45,69	123,34	6,48
	Lix 3	16,63	120,66	5,57
C8	Lix 1	116,08	457,10	60,74
	Lix 2	11,59	82,87	4,87
	Lix 3	27,44	84,19	2,29
C9	Lix 1	94,30	357,88	49,23
	Lix 2	5,25	52,04	-1,33
	Lix 3	15,22	57,81	2,54
C10	Lix 1	76,36	296,56	34,73
	Lix 2	12,56	47,24	0,93
	Lix 3	8,02	36,81	0,42

**Tabla 27. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C11, C12, C13, C14 y C15, las unidades de medida son g/h.**

Prueba	Etapas	Cu	Masa	As
C11	Lix 1	313,72	1556,86	171,59
	Lix 2	86,93	317,84	10,52
	Lix 3	16,14	150,00	2,09
C12	Lix 1	185,70	803,78	97,27
	Lix 2	5,04	56,12	2,89
	Lix 3	25,65	115,66	1,66
C13	Lix 1	118,31	519,83	61,07
	Lix 2	11,81	55,41	1,74
	Lix 3	16,95	66,37	0,91
C14	Lix 1	103,51	392,46	46,99
	Lix 2	-2,51	51,98	1,46
	Lix 3	8,55	35,85	0,58
C15	Lix 1	81,11	311,44	35,14
	Lix 2	4,86	45,46	1,46
	Lix 3	5,58	33,19	0,39

**Tabla 28. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas C16, C17, C18 y C19, las unidades de medida son g/h.**

Prueba	Etapas	Cu	Masa	As
C16	Lix 1	339,54	1560,02	186,97
	Lix 2	29,07	99,32	6,52
	Lix 3	47,58	337,80	6,38
C17	Lix 1	180,20	792,33	94,47
	Lix 2	-4,19	42,00	3,81
	Lix 3	31,93	131,49	2,57
C18	Lix 1	128,40	535,83	62,55
	Lix 2	9,32	33,47	2,00
	Lix 3	7,84	65,45	1,12
C19	Lix 1	89,11	396,99	49,77
	Lix 2	5,53	31,14	1,44
	Lix 3	8,70	46,70	0,63

## 7.8 Set 4.

**Tabla 29. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas P1, P2y P3, las unidades de medida son g/h.**

	P1			P2			P3		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	47,81	264,75	37,74	47,53	286,07	44,87	49,74	301,33	46,61
Lix 2	11,34	97,31	15,13	9,47	71,25	12,79	8,01	58,99	11,17
Lix 3	5,25	34,36	1,03	4,22	32,52	1,50	3,81	27,06	1,43

**Tabla 30. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas P5 y P6, las unidades de medida son g/h.**

	P5			P6		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	51,51	306,21	47,56	57,04	309,75	47,94
Lix 2	12,07	45,25	6,71	11,04	34,30	6,74
Lix 3	6,34	40,45	1,09	4,22	31,82	1,30

**Tabla 31. Velocidades de lixiviación de la masa, cobre y arsénico en cada etapa de las pruebas P7, P8 y P6, las unidades de medida son g/h.**

	P7			P8			P9		
	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As	Cu	Masa	As
Lix 1	56,11	312,58	45,80	54,64	318,18	49,97	53,91	309,60	49,80
Lix 2	7,60	36,16	7,56	9,41	48,56	6,91	9,23	49,28	8,35
Lix 3	6,04	36,73	1,24	4,02	23,38	0,86	3,94	27,32	0,90

## 7.9 Estudio de la cinética

### 7.9.1 Lixiviación 1 de C1, C2, C3, C4 y C5

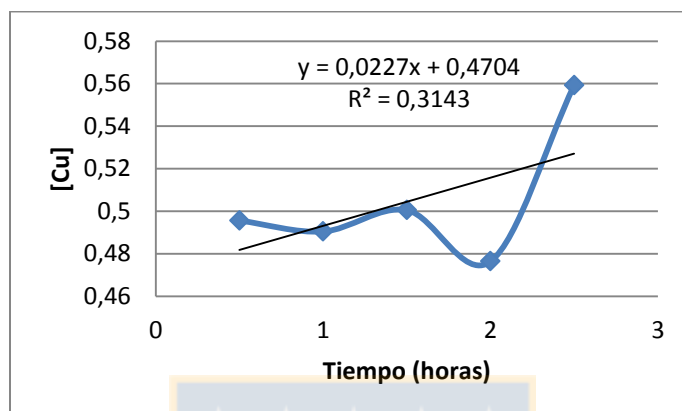


Figura 55. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

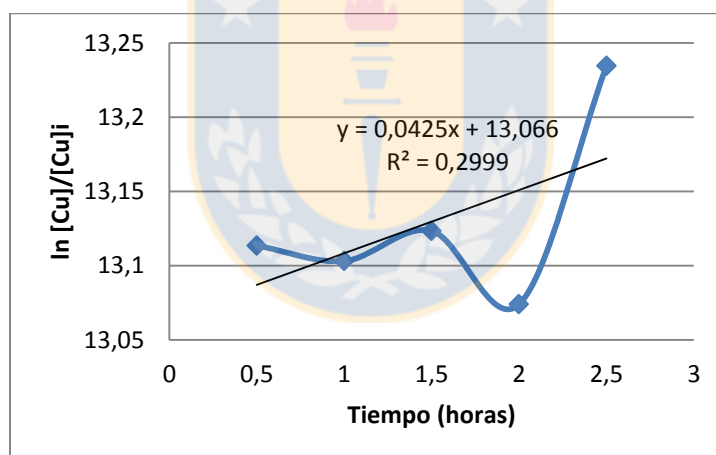


Figura 56. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

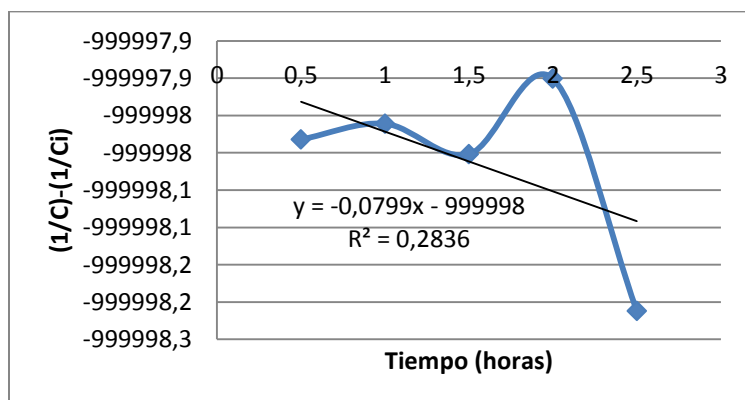


Figura 57. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.



### 7.9.2 Lixiviación 2, pruebas C1, C2, C3, C4 y C5

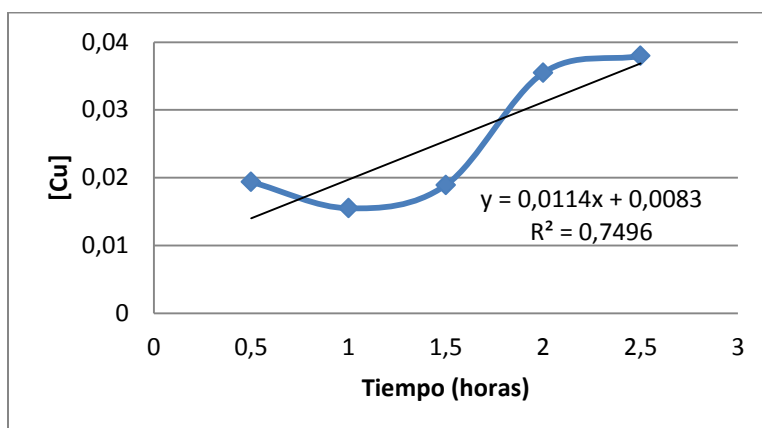


Figura 58. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

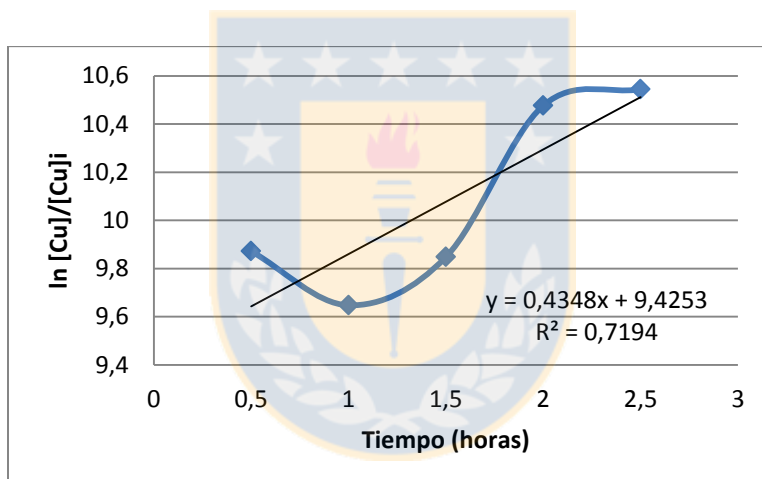


Figura 59. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

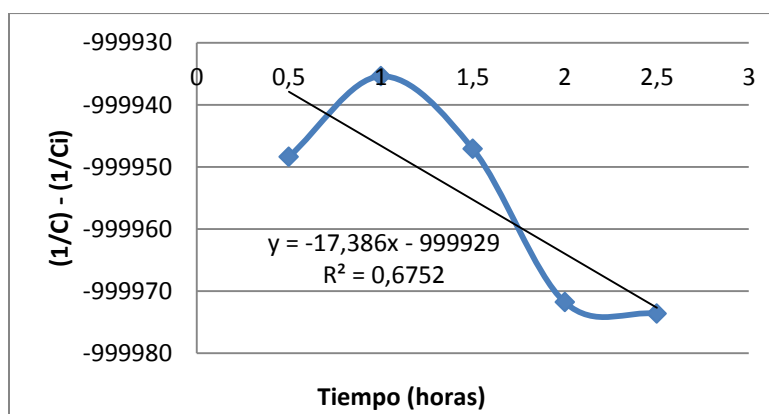


Figura 60. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.3 Lixiviación 3, pruebas C1, C2, C3, C4 y C5

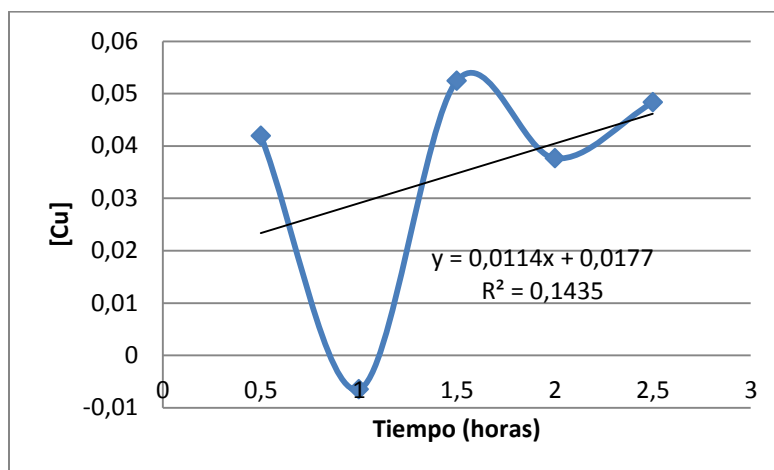


Figura 61. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

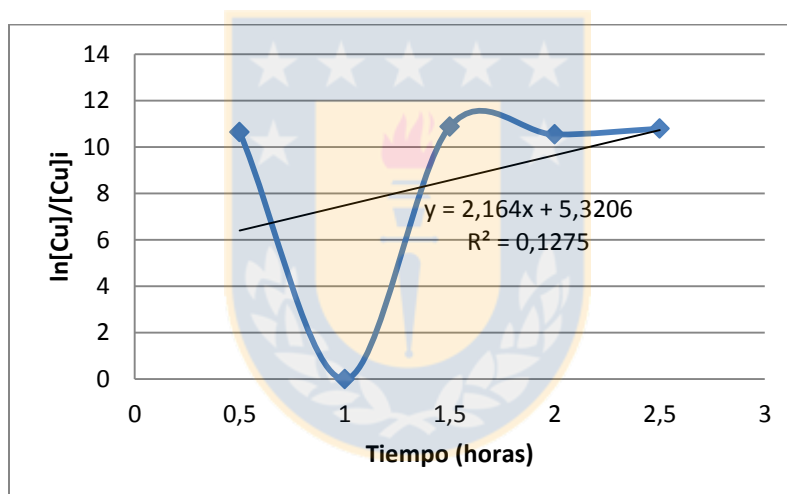


Figura 62. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

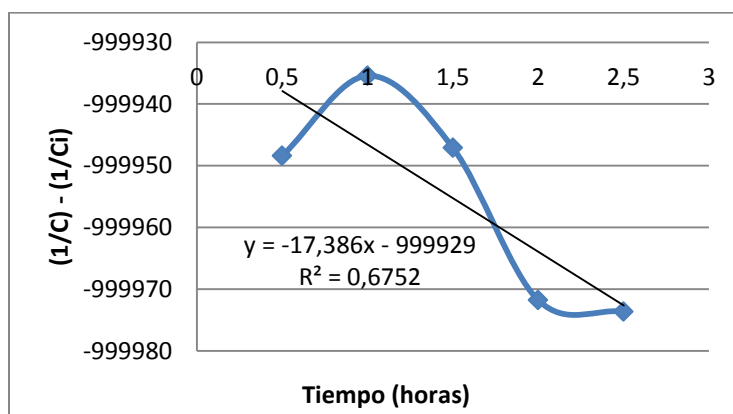


Figura 63. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.4 Lixiviación 1, pruebas C6, C7, C8, C9 y C10

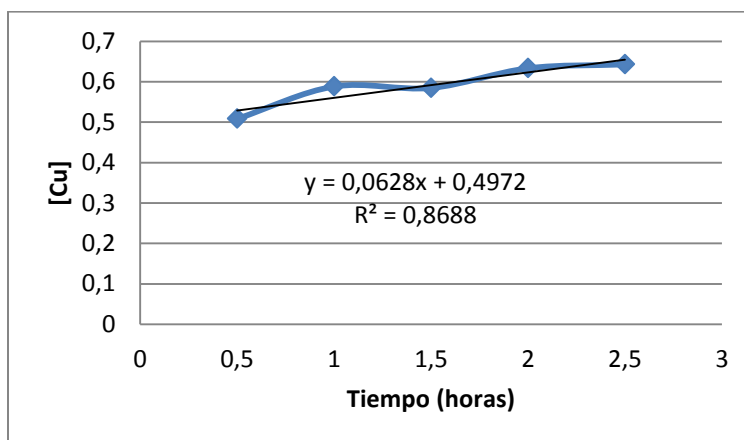


Figura 64. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

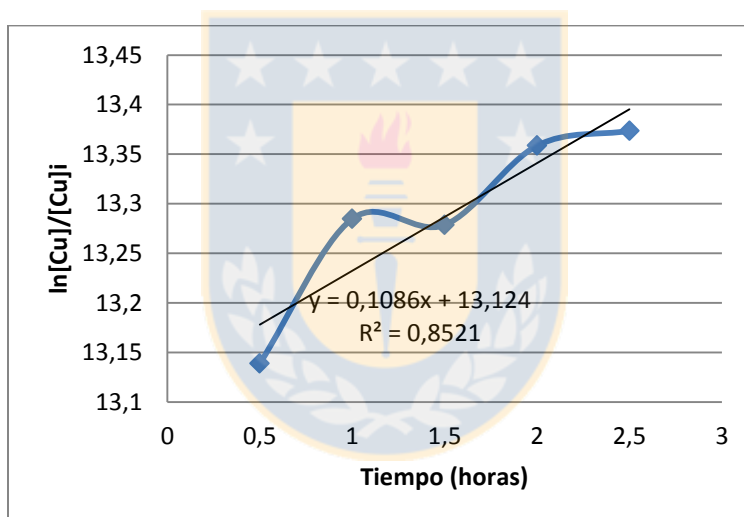


Figura 65. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

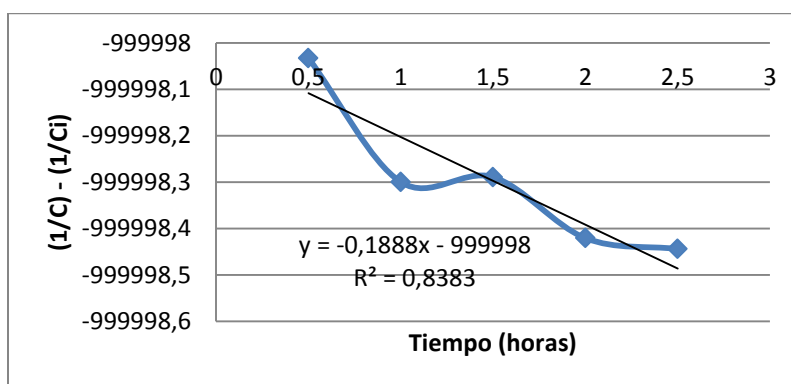


Figura 66. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.5 Lixiviación 2, pruebas C6, C7, C8, C9 y C10

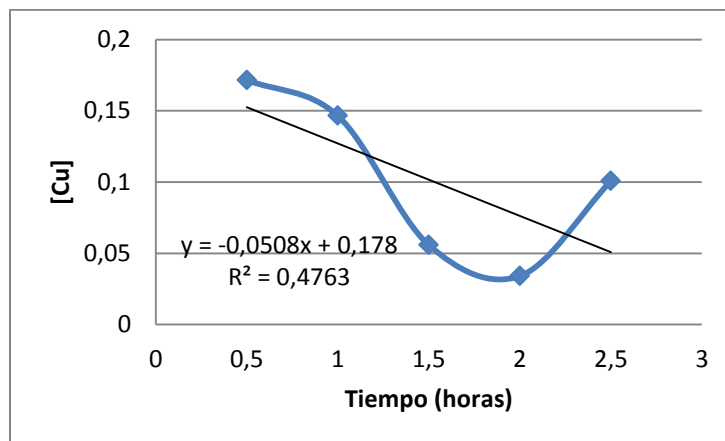


Figura 67. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

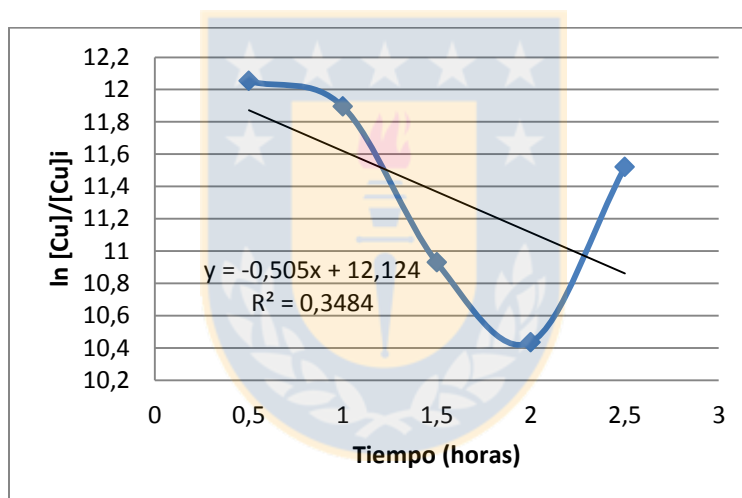


Figura 68. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

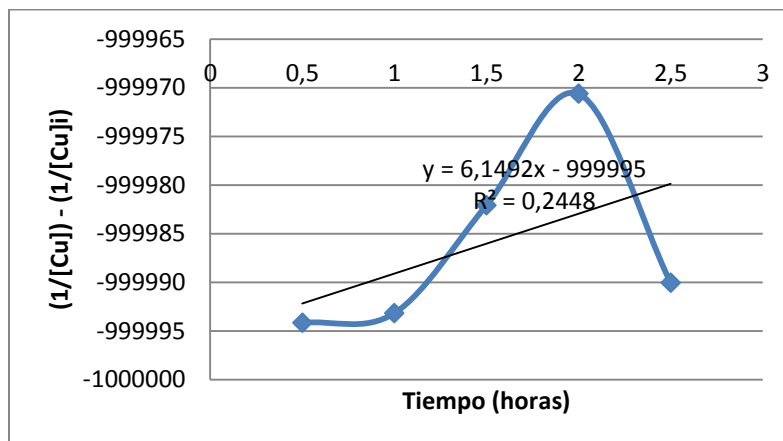


Figura 69 Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.6 Lixiviación 3, pruebas C6, C7, C8, C9 y C10

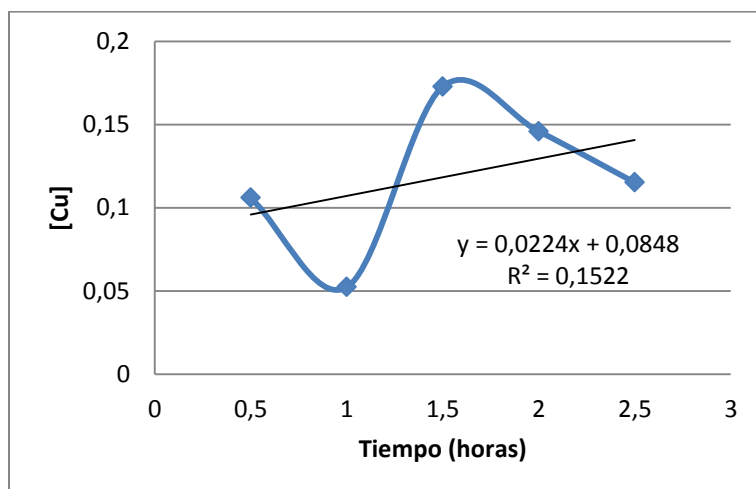


Figura 70. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

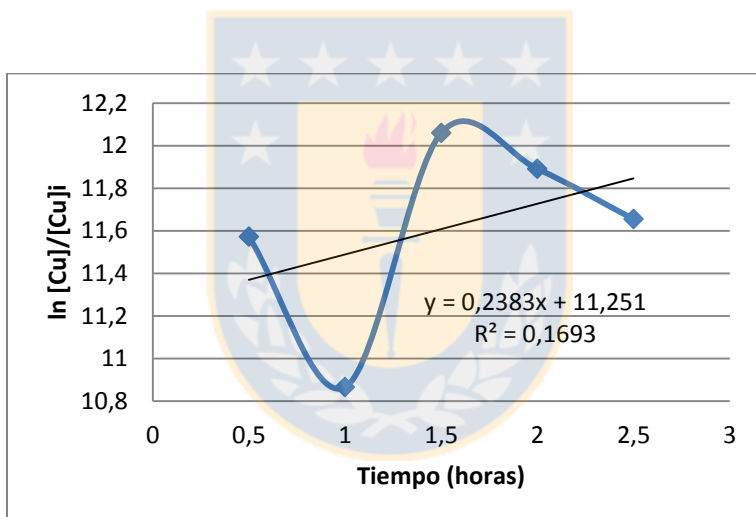


Figura 71. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

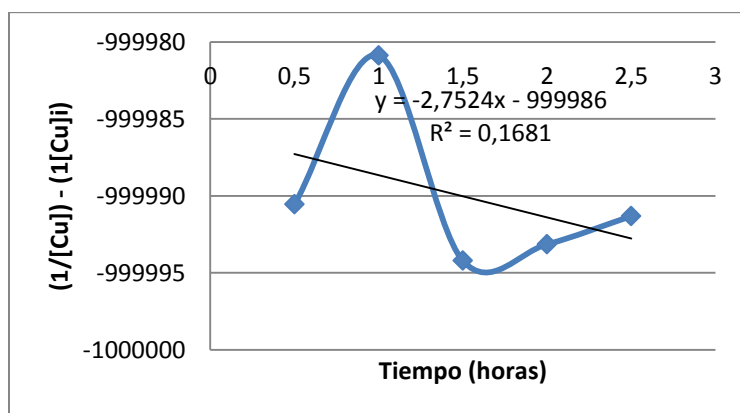


Figura 72. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.7 Lixiviación 1, pruebas C11, C12, C13, C14 y C15

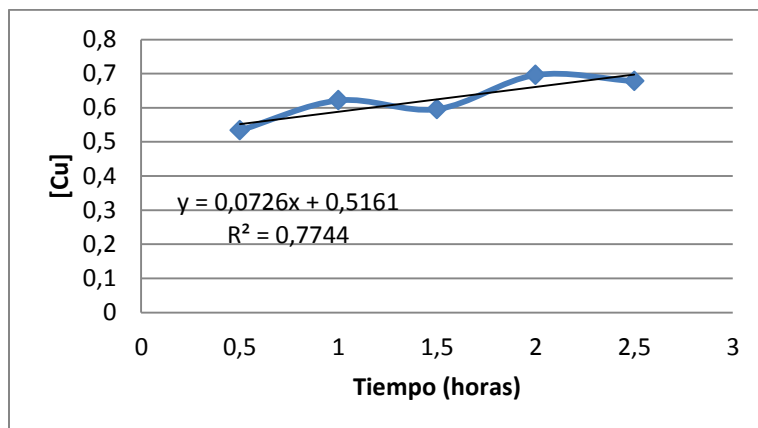


Figura 73. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

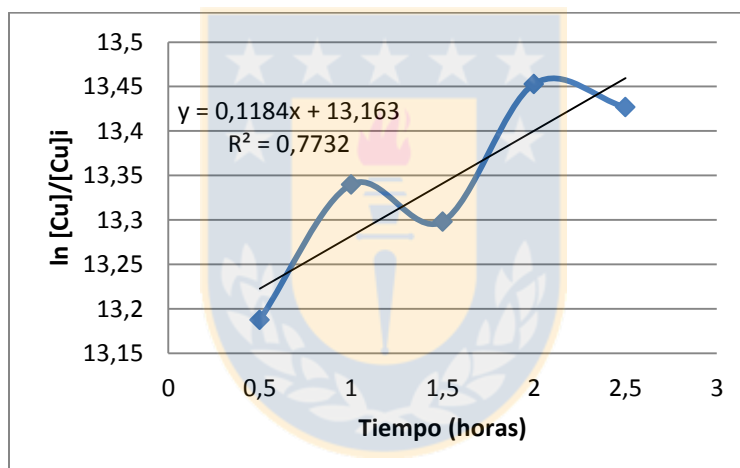


Figura 74. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

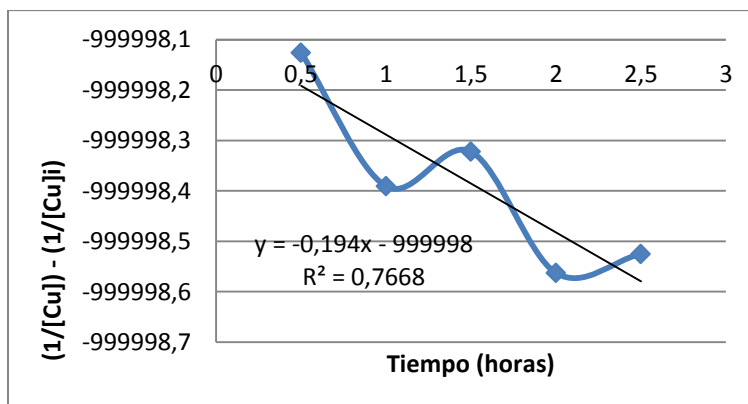


Figura 75. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.8 Lixiviación 2, pruebas C11, C12, C13, C14 y C15

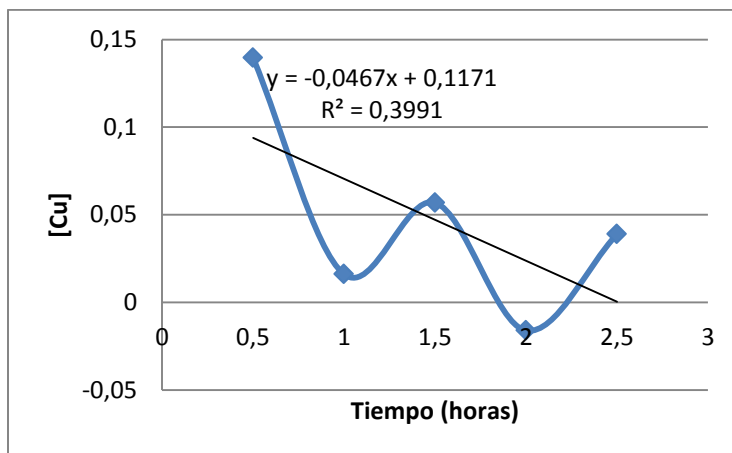


Figura 76. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

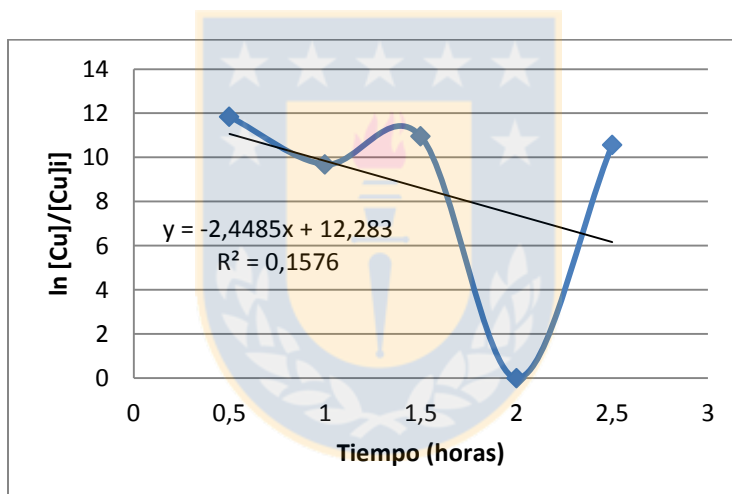


Figura 77. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

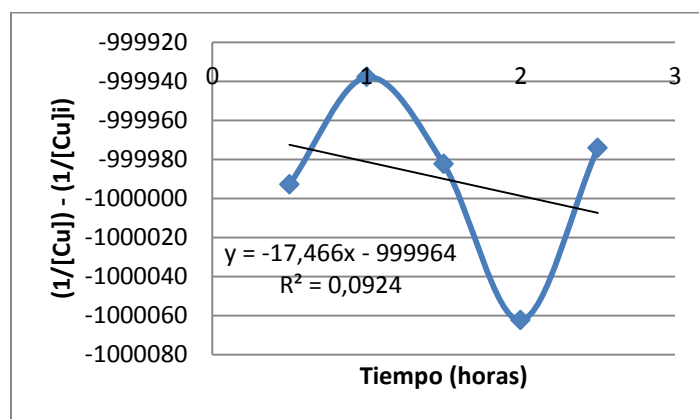


Figura 78. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.9 Lixiviación 3, pruebas C11, C12, C13, C14 y C15

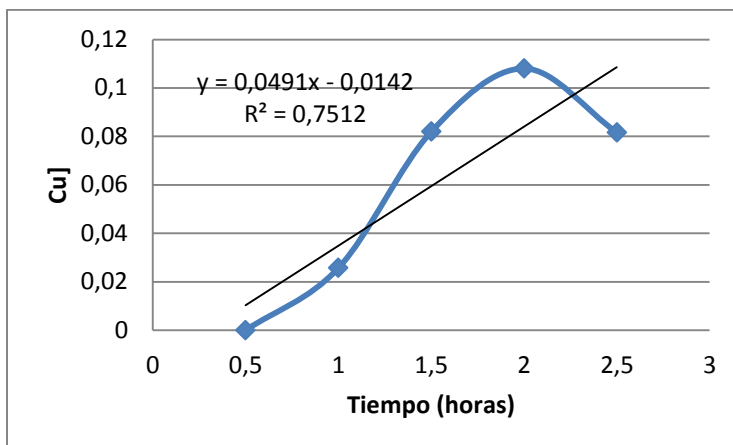


Figura 79. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

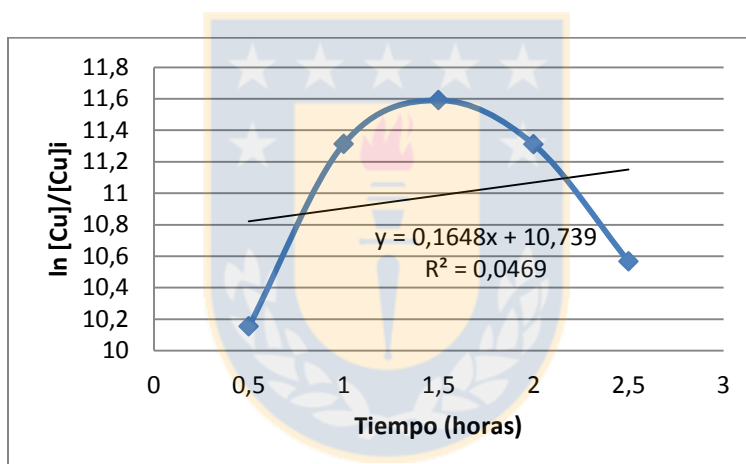


Figura 80. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

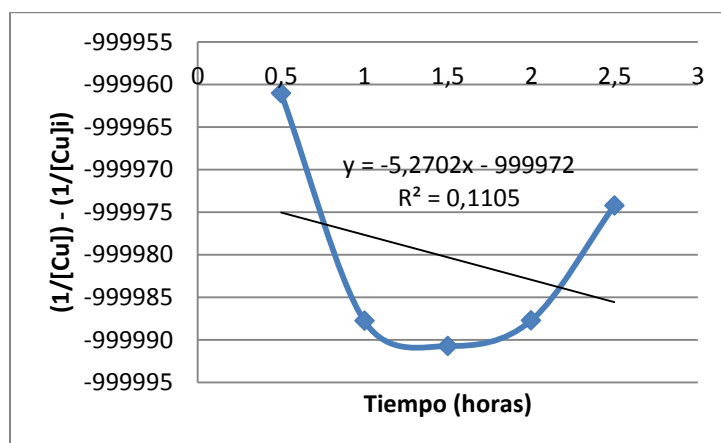


Figura 81. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.



### 7.9.10 Lixiviación 1, prueba C16, C17, C18 y C19

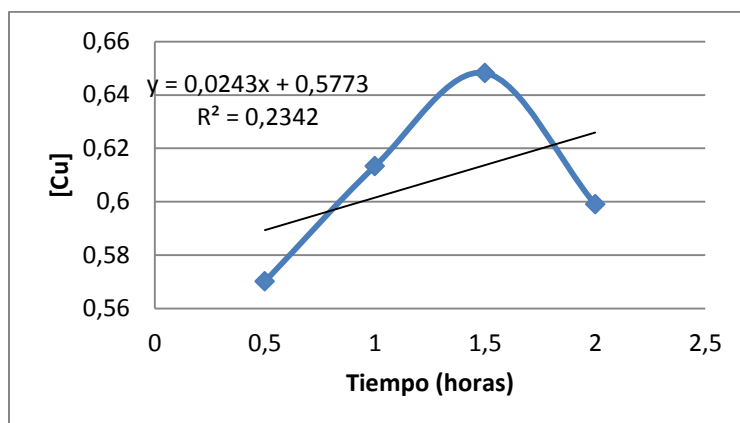


Figura 82. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

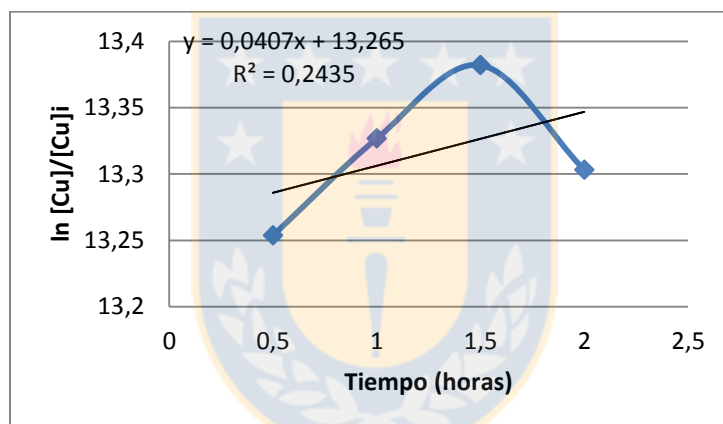


Figura 83. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

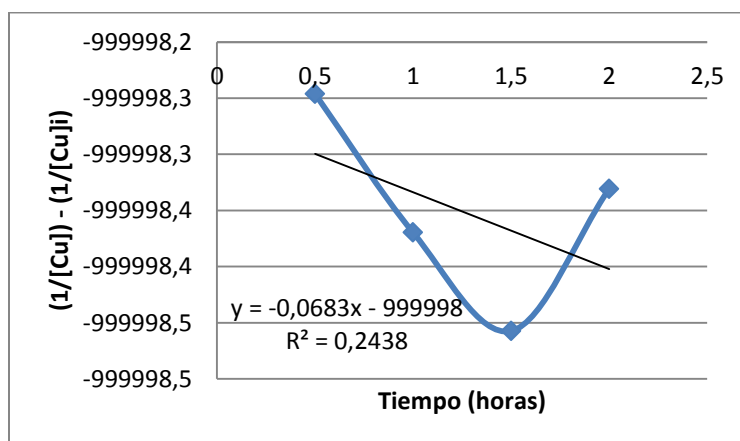


Figura 84. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

### 7.9.11 Lixiviación 2, pruebas C16, C17, C18 y C19

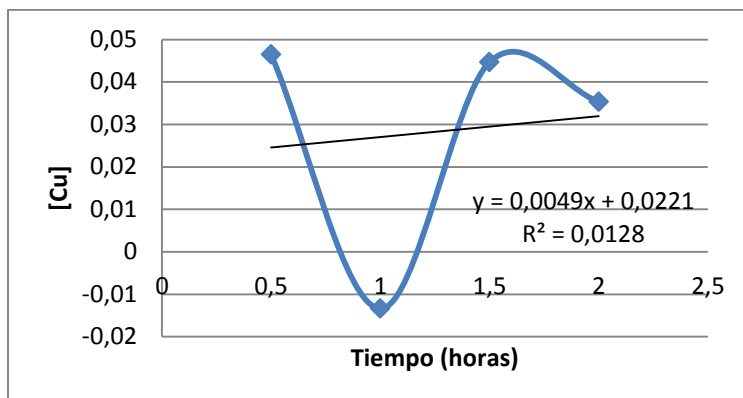


Figura 85. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

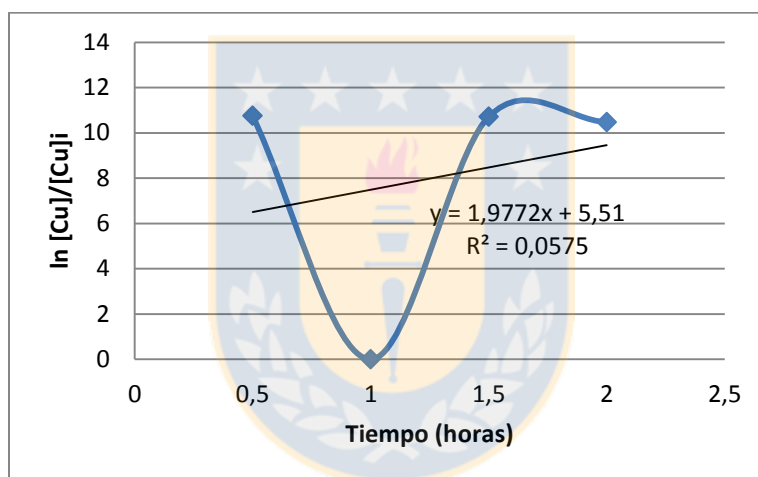


Figura 86. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

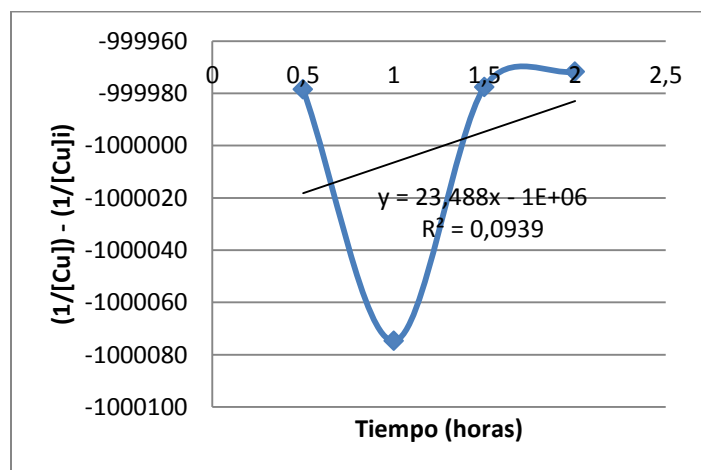


Figura 87. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

## 7.9.12 ixiviación 3, pruebas C16, C17, C18 y C19

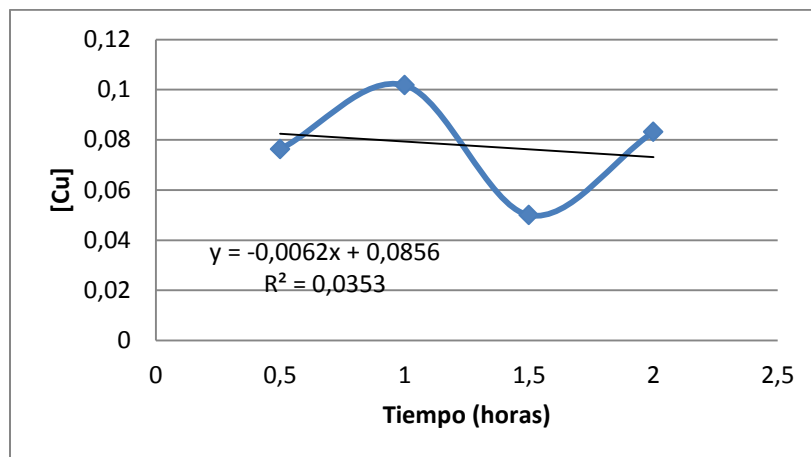


Figura 88. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden cero.

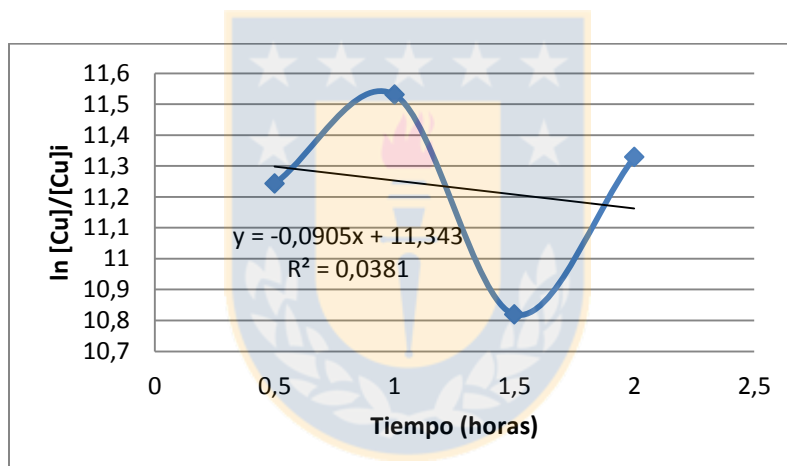


Figura 89. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden uno.

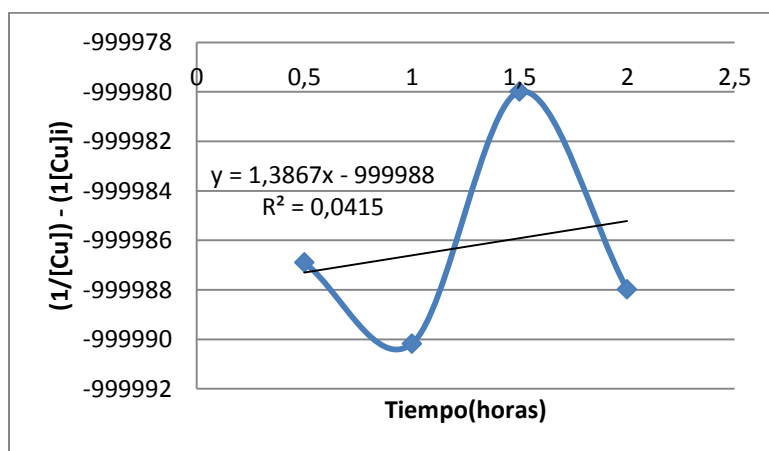


Figura 90. Búsqueda de ajuste de datos experimentales a una reacción de orden dos.

## 7.10 Comportamiento del pH y Potencial

Los valores de potencial Redox están referidos al electrodo Ag/AgCl.

**Tabla 32. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del primer Set de pruebas.**

Prueba	LIX 1		LIX 2		LIX 3	
	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH
CPS + AGUA	256,42	1,14	356,25	0,06	368,06	-0,45
CPS + AGUA ACIDULADA	267,25	0,27	387,56	0,21	388,37	-0,43
CT + AGUA	264,60	2,27	264,60	2,27	458,53	-0,45
CT + AGUA ACIDULADA	365,95	0,47	456,36	0,21	459,89	-0,59
HF + AGUA	203,60	2,93	353,66	0,27	476,24	-0,35
HF + AGUA ACIDULADA	256,74	0,55	411,60	0,15	495,82	-0,41
ZT + AGUA	205,40	2,80	284,14	0,18	400,22	-0,53
ZT + AGUA ACIDULADA	261,78	0,54	347,46	0,11	426,83	-0,53

**Tabla 33. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del segundo Set de pruebas.**

Prueba	LIX 1		LIX 2		LIX 3	
	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH
M1	334,93	0,58	395,35	0,14	484,77	-0,28
M2	334,73	0,52	389,28	0,22	479,20	-0,44
M3	334,15	0,53	392,08	0,22	478,78	-0,38
M4	313,58	0,59	370,23	0,21	418,43	-0,44
M5	280,90	0,69	351,67	0,19	424,80	-0,24
M6	279,92	0,69	348,70	0,21	418,27	-0,41
M7	289,77	0,68	406,95	0,10	445,25	-0,45
M8	293,05	0,70	336,85	0,12	452,32	-0,46

**Tabla 34. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del tercer Set de pruebas.**

Prueba	LIX 1		LIX 2		LIX 3	
	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH
C1	303,48	0,88	432,38	0,09	466,50	-0,31
C2	333,27	0,57	380,83	0,13	379,60	-0,10
C3	327,08	0,60	368,90	0,23	454,10	-0,35
C4	326,94	0,61	370,90	0,22	471,18	-0,46
C6	315,15	0,63	372,95	0,66	394,55	-0,07
C7	294,13	0,64	376,47	0,51	374,80	-0,08
C8	296,88	0,63	376,13	0,42	385,70	-0,14
C9	299,16	0,67	343,55	0,26	383,78	-0,38
C11	307,75	0,59	425,35	0,10	464,55	-0,14
C12	293,97	0,82	349,20	0,40	360,33	-0,31
C13	297,88	0,83	351,40	0,41	406,05	-0,32
C14	299,70	0,92	344,88	0,41	399,02	-0,30
C16	310,05	1,01	349,65	0,41	428,85	-0,31
C17	332,97	0,46	345,57	0,21	427,50	-0,30
C18	320,23	0,58	350,40	0,19	423,98	-0,33
C19	316,68	0,62	378,48	0,19	426,80	-0,33

**Tabla 35. Promedio de valores pH y del potencial de cada etapa a lo largo del cuarto Set de pruebas.**

Prueba	LIX 1		LIX 2		LIX 3	
	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH	Potencial mV	pH
P1	294,07	1,17	458,80	-0,02	512,82	-0,61
P2	291,73	1,06	465,95	0,03	493,89	-0,47
P3	288,13	1,18	436,63	0,19	490,90	-0,29
P5	269,93	1,18	382,08	0,18	451,00	-0,59
P6	274,43	1,20	382,92	0,18	463,40	-0,56
P7	275,33	1,24	396,73	0,19	473,74	-0,59
P8	276,37	1,19	415,85	-0,27	460,59	-0,37
P9	268,40	1,27	374,33	0,22	443,93	-0,23