

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
EN METALURGIA EXTRACTIVA

**FACTIBILIDAD TÉCNICA DE LA
AGLOMERACIÓN Y POSTERIOR LIXIVIACIÓN
DE MINERALES OXIDADOS, SULFURADOS Y
MEZCLAS CON CLORURO DE SODIO Y
SULFATO FÉRRICO**

Nicolás Francisco Miranda Moreno

Profesores Guías:
Horacio Aros Meneses
Álvaro Aracena Caipa

2012

A MI ABUELO ANGEL MIRANDA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi madre Eliana Miranda, quien estuvo siempre a mi lado, dándome su apoyo y cuidados mientras desarrollaba mis estudios, de igual manera que Tía, Rosa Miranda, ambas me brindaron las herramientas necesarias para llegar a esta instancia.

Le agradezco a mi Tío Rafael Miranda, Ingeniero Civil Químico (USACH), quien fue mi guía y una fuente de sabiduría para mi desarrollo como Ingeniero, sin su ayuda no hubiera alcanzado mis objetivos.

En el desarrollo de mi Proyecto en la Compañía Minera Cerro Colorado tuve el agrado de conocer a un sin número de personas que me ayudaron a culminar mi Tesis. Quisiera agradecer a mis compañeros de trabajo, y en especial al Superintendente de Metalurgia donde me desempeñe como memorista, el Sr. Jorge Picarte, a mi jefe, y a BHP Billiton que financio el proyecto, además de darme la oportunidad y haber confiado en mis capacidades.

También quiero agradecer a la Escuela de Ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, donde realice mis estudios de Pregrado en la Carrera de Ingeniería Civil en Metalurgia Extractiva, los cuales fueron esenciales para enfrentar los desafíos en cada una de las Empresas que he trabajado, y en especial al profesor Álvaro Aracena quien revisó y me permitió finalizar el trabajo de tesis para la titulación.

Finalmente quiero agradecer a mi abuelo, Ángel Miranda, la persona que me crio y me enseñó mediante su ejemplo los valores que me hacen la persona que soy actualmente.

NOMENCLATURA

SX:	Extracción por solvente
EW:	Electro-obtención (Electrowinning)
PLS:	Solución rica en cobre (Pregnant Liquid Solution)
ILS:	Solución intermedia de cobre (Intermediate Liquid Solution)
ROM:	Run of Mine (mineral en bruto de la mina)
PSD:	Análisis granulométrico (Particle Size Distribution)
CIMM:	Centro de Investigación Minero Metalúrgico
CMCC:	Compañía Minera Cerro Colorado
HSC 5.11	Software HSC Chemistry 5.11
TS:	Test de Sulfatación
MA:	Mezclas Artificiales
TMS:	Tonelada Metrica Seca
P80:	Porcentaje de mineral
m:	Metros
ppm:	Partes por millón
t/h:	Toneladas por hora
g/L:	Gramos por litro
mV:	Milivolts
t:	Tiempo
RL:	Regresion lineal
MNR:	Modelo del núcleo recesivo
μ :	varianza
MMOi:	Mezcla artificial mineral oxidado i: dosis de sal Kg/TMS
MMSi:	Mezcla artificial mineral sulfurado i: dosis de sal Kg/TMS

RESUMEN

La Compañía Minera Cerro Colorado se encuentra en la recta final de su producción, es decir, próxima a la zona de lixiviación primaria, esto evidencia la importancia de encontrar un tratamiento alternativo a este tipo de minerales, donde el principal problema que surge es la extracción de cobre, en particular desde la calcopirita (CuFeS_2).

El presente trabajo estudia la recuperación de cobre desde minerales mixtos (oxidados y sulfurados) por medio de procesos hidrometalúrgicos,

El trabajo consistió en pruebas de aglomeración, con la aplicación de ácido sulfúrico, cloruro de sodio y sulfato férrico, en las que se observó la influencia de estos reactivos a distintas dosis y tiempos de reposo.

El sulfato férrico obtuvo los mejores resultados en la recuperación de cobre en minerales sulfurados, y en menor medida el cloruro de sodio. Al contrario de lo ocurrido en los minerales oxidados que fueron parcialmente perjudicados al usar NaCl como reactivo en la aglomeración.

Como una manera de optimizar el proceso se crearon mezclas artificiales, esto es; mezclas proporcionales entre minerales oxidados y sulfurados en los que la razón de solubilidad 0,6 que corresponde a un 34% de mineral oxidado y 66% de mineral sulfurado resultó óptima en la aglomeración con sulfato férrico y sal.

La lixiviación de la mejor condición aglomerada (mezcla que contienen ácido sulfúrico, sal y sulfato férrico) alcanzó una recuperación mayor a la obtenida en el blanco (muestra que contiene sólo ácido sulfúrico), además del corto periodo de procesamiento, entre aglomeración y lixiviación.

Las conclusiones obtenidas indican que los minerales oxidados no se ven beneficiados al ser aglomerados con sal al contrario de lo que sucede con los minerales sulfurados, los cuales aumentan su recuperación con este reactivo, sin embargo el sulfato férrico es el reactivo que mejores resultados entrega, ya sea en minerales sulfurados como en mezclas artificiales, estos resultados son beneficiosos para la Minera, ya que no solo aumentan la recuperación sino que también disminuyen el tiempo sometido a lixiviación, aumentando las ganancias.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	1
1.2 Objetivos Específicos	1
2. MARCO GENERAL	2
2.1 Descripción Compañía Minera Cerro Colorado	2
2.2 Yacimiento	2
3. MARCO TEÓRICO.....	3
3.1 Aglomeración	3
3.2 Curado Ácido.....	6
3.3 Hierro en solución	7
3.4 Consumo de Ácido	8
3.5 Equipos de Aglomeración.....	9
3.6 Lixiviación.....	9
3.7 Lixiviación en Pilas	11
3.7.1 Clasificación de las Pilas	12
3.8 Lixiviación Agitada.....	13
3.9 Influencia de la ganga en la lixiviación.....	15
3.10 Diagramas de Estabilidad Eh-pH (Pourbaix).....	16
3.11 Cinética de lixiviación	19
4. TRABAJO EXPERIMENTAL	25
4.1 Preparación de Muestras.....	26
4.2 Análisis Granulométrico.....	27
4.3 Aglomeración de Muestras	28
4.4 Aglomeración de mezclas artificiales	31
4.5 Aglomeración y Lixiviación de Columnas.....	32
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1 Análisis granulométrico	35
5.2 Mineral tratado	36
5.3 Aglomeración ARC 9	38
5.4 Aglomeración ARC 6	42
5.5 Análisis aglomeración de mezclas artificiales	47
5.5.1 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS	49

5.5.2 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS	50
5.5.3 Aglomeración MA 20 Kg NaCl/TMS	50
5.5.4 Aglomeración MA 10 Kg NaCl /TMS y 5 Kg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /TMS	51
5.6 Análisis lixiviación en columnas.....	52
5.6.1 Lixiviación columna Ceres	54
5.6.2 Lixiviación Columna Pallas	54
5.6.3 Lixiviación Columna Vesta	55
5.6.4 Lixiviación Columna Hygeia	55
5.6.5 Cinética de lixiviación columnas.....	55
5.7 Análisis lixiviación columna Ceres en serie	59
5.8 Lixiviación Agitada.....	64
6. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	65
7. CONCLUSIONES.....	69
7.1 Análisis comparativo entre Columnas.....	69
7.2 Recomendaciones.....	70
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	73
ANEXO A	74
A-1. Análisis granulométrico.....	74
A-2. Mezclas artificiales entre ARC 6 y ARC 9	76
A-3. Cálculo de reactivos aglomeración de minerales	77
A-4. Balance de masa columnas	81
A-5. Balance de masa columna Ceres en serie	82
ANEXO B	85
B-1. Procedimientos de laboratorio	85
ANEXO C.....	88
C-1. Fotografías aglomeración de minerales oxidados ARC 9.....	88
C-2. Fotografías aglomeración de minerales sulfurados ARC 6	93
C-3. Fotografías aglomeración de mezclas artificiales.....	95
C-4. Fotografías aglomeración de columnas de un metro	110
C-5. Fotografías aglomeración de columnas en serie.....	112
C-6. Fotografías columnas montadas en la Planta Piloto	114
ANEXO D.....	115
D-1. Resultados experimentales aglomeración ARC 9	115

D-2. Resultados experimentales aglomeración ARC 6	117
D-3. Resultados experimentales aglomeración mezclas artificiales	119
D-4. Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales.....	124
D-5. Resultados experimentales control de columnas	125
D-6. Resultados experimentales análisis de líquidos columnas.....	129
D-7. Resultados experimentales control y análisis de líquidos.....	133
D-8. Resultados experimentales balance de masa columnas.....	138
(Extracción y recuperación de cobre)	138
D-10. Resultados experimentales lixiviación agitada	145
ANEXO E	146
E-1. Regresión lineal modelo núcleo recesivo columnas	146
E-2. Regresión lineal modelo núcleo recesivo C. Ceres en serie.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de acción del ácido sulfúrico en las partículas	3
Figura 2 Diferentes estados de equilibrio de la aglomeración.....	5
Figura 3 Rango de adición de ácido recomendado en el proceso de aglomeración (P. Schmidt, 2001)	8
Figura 4 Tambor aglomerador Compañía Minera Cerro Colorado	9
Figura 5 Pila Compañía Minera Cerro Colorado	11
Figura 6 Fotografía panorámica de la CMCC (Iquique, Chile)	13
Figura 7 Diagrama de estabilidad del sistema Cu-H ₂ O a 25°C	17
Figura 8 Diagrama de estabilidad del sistema Fe-H ₂ O a 25°C.....	18
Figura 9 Diagrama de estabilidad del sistema Cu-Cl-H ₂ O a 25°C.....	18
Figura 10 Diagrama de estabilidad del sistema Fe-Cl-H ₂ O a 25°C	19
Figura 11 Mecanismos de reacción del núcleo recesivo para minerales oxidados y sulfurados	20
Figura 12 Proceso de lixiviación a través del mineral en función del tiempo.....	21
Figura 13 Resultados experimentales de lixiviación de minerales de baja ley en columnas piloto para un material oxidado y otro sulfurado. Mineral ROM, ensayos a temperatura ambiente (Mitov et al., 1990).....	23
Figura 14 Mineral acopiado planta piloto; a) mineral sulfurado de cobre ARC 6, b) mineral oxidado de cobre ARC 9	27
Figura 15 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. (a) 5 días, b) 10 días, c) 15 días)	29
Figura 16 Aglomeración ARC 6 10 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. (a) Blanco, b) 4 Kg NaCl/TMS, c) 10 Kg NaCl/TMS).....	30
Figura 17 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. (a) Rs: 0,5, b) Rs: 0,55, c) Rs:0,6).....	32
Figura 18 Esquema columnas de lixiviación Hygeia, Vesta, Pallas y Ceres	34
Figura 19 Esquema columna de lixiviación Ceres en serie	34
Figura 20 Agitador mecánico laboratorio CIMM.....	86
Figura 21 Campana laboratorio CIMM.....	86
Figura 22 Aglomeración ARC 9 muestra Blanco.10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días].....	88

Figura 23 Aglomeración ARC 9 muestra Blanco. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	88
Figura 24 Aglomeración ARC 9 muestra Blanco. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]	88
Figura 25 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]	89
Figura 26 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	89
Figura 27 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]	89
Figura 28 Aglomeración ARC 9 muestra 8 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]	90
Figura 29 Aglomeración ARC 9 muestra 8 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	90
Figura 30 Aglomeración ARC 9 muestra 8 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]	90
Figura 31 Aglomeración ARC 9 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]	91
Figura 32 Aglomeración ARC 9 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	91
Figura 33 Aglomeración ARC 9 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]	91
Figura 34 Aglomeración ARC 9 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]	92
Figura 35 Aglomeración ARC 9 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	92
Figura 36 Aglomeración ARC 9 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]	92
Figura 37 Aglomeración ARC 6 muestra Blanco. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	93
Figura 38 Aglomeración ARC 6 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	93
Figura 39 Aglomeración ARC 6 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	93

Figura 40 Aglomeración ARC 6 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	94
Figura 41 Aglomeración ARC 6 muestra 30 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	94
Figura 42 Aglomeración ARC 6 muestra 10 Kg NaCl/TMS, 5 Kg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /TMS. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]	94
Figura 43 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,2]	95
Figura 44 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,25]	95
Figura 45 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,3]	95
Figura 46 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,35]	96
Figura 47 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,4]	96
Figura 48 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,45]	96
Figura 49 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,5]	97
Figura 50 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,55]	97
Figura 51 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,6]	97
Figura 52 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,65]	98
Figura 53 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,7]	98
Figura 54 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,75]	98
Figura 55 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,8]	99
Figura 56 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,85]	99

Figura 57 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,9]	99
Figura 58 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,2]	100
Figura 59 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,25]	100
Figura 60 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,3]	100
Figura 61 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,35]	101
Figura 62 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,4]	101
Figura 63 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,45]	101
Figura 64 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,5]	102
Figura 65 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,55]	102
Figura 66 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,6]	102
Figura 67 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,65]	103
Figura 68 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,7]	103
Figura 69 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,75]	103
Figura 70 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,8]	104
Figura 71 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,85]	104
Figura 72 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,9]	104
Figura 73 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,2]	105

Figura 74 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,25]	105
Figura 75 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,3]	105
Figura 76 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,35]	106
Figura 77 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,4]	106
Figura 78 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,45]	106
Figura 79 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,5]	107
Figura 80 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,55]	107
Figura 81 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,6]	107
Figura 82 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,65]	108
Figura 83 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,7]	108
Figura 84 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,75]	108
Figura 85 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,8]	109
Figura 86 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,85]	109
Figura 87 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H ₂ SO ₄ /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R _s : 0,9]	109
Figura 88 Aglomeración MA Blanco. Columna Hygeia [R _s : 0,6]	110
Figura 89 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. Columna Vesta [R _s : 0,6]	110
Figura 90 Aglomeración MA 20 Kg NaCl/TMS. Columna Pallas [R _s : 0,6]	111
Figura 91 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS y 5 Kg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /TMS. Columna Ceres [R _s : 0,6]	111
Figura 92 Aglomeración MA Columna Ceres A [R _s : 0,6]	112

Figura 93 Aglomeración MA Columna Ceres B [R_s : 0,6]	112
Figura 94 Aglomeración MA Columna Ceres C [R_s : 0,6]	113
Figura 95 Aglomeración MA Columna Ceres D [R_s : 0,6]	113
Figura 96 Lixiviación en Columnas Planta Piloto CMCC	114
Figura 97 Lixiviación Columna Ceres en Serie Planta Piloto CMCC	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales reacciones de minerales de cobre en el curado ácido (Domic, 2001).....	6
Tabla 2 Velocidades de disolución de las principales especies de cobre, al ser expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido, ordenadas según sus cinéticas relativas (Domic, 2001).....	10
Tabla 3 Principales especies minerales de silicatos, presentes en la ganga de los yacimientos de cobre porfídico, incluyendo su composición química más probable (Domic, 2001).....	15
Tabla 4 Ley de cabeza mineral oxidado.....	37
Tabla 5 Ley de cabeza mineral sulfurado.....	37
Tabla 6 Análisis químico de refino inicial proveniente de planta.....	37
Tabla 7 Influencia del cloruro de sodio en la concentración de Cu^{+2} g/L a diferentes periodos de tiempo.	46
Tabla 8 Resumen análisis de varianzas aglomeración de minerales oxidados en medio ácido y clorurado	46
Tabla 9 Resumen resultado análisis de líquidos columna Ceres en serie	59
Tabla 10 Análisis granulométrico mineral sulfurado	74
Tabla 11 Análisis granulométrico mineral oxidado	74
Tabla 12 Resumen creación de mezclas artificiales.....	76
Tabla 13 Resumen dosis de reactivo aglomeración mineral oxidado de cobre ARC 9	80
Tabla 14 Resumen dosis de reactivo aglomeración mineral sulfurado de cobre ARC 6.....	80
Tabla 15 Resumen dosis de reactivos aglomeración columnas	80
Tabla 16 Resumen dosis de reactivo aglomeración columna Ceres en serie ABCD	80
Tabla 17 Dosis de reactivos procedimiento experimental aglomeración Columnas.....	81
Tabla 18 Dosis de reactivos procedimiento experimental aglomeración Columna Ceres en Serie ABCD.....	81
Tabla 19 Resumen análisis de sólidos columna Ceres ABCD	83
Tabla 20 Comparación recuperación de cobre columna Ceres ABCD	84
Tabla 21 MMO0: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica	115
Tabla 22 MMO4: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	115

Tabla 23 MMO8: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	115
Tabla 24 MMO10: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	116
Tabla 25 MMO20: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	116
Tabla 26 MMS0: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.	117
Tabla 27 MMS4: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	117
Tabla 28 MMS10: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	117
Tabla 29 MMS20: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	117
Tabla 30 MMS30: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	118
Tabla 31 MMSSSF: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.....	118
Tabla 32 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,2]	119
Tabla 33 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,25]	119
Tabla 34 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,3]	119
Tabla 35 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,35]	120
Tabla 36 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,4]	120
Tabla 37 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,45]	120
Tabla 38 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,5]	121
Tabla 39 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,55]	121

Tabla 40 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,6]	121
Tabla 41 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,65]	122
Tabla 42 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,7]	122
Tabla 43 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,75]	122
Tabla 44 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,8]	123
Tabla 45 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,85]	123
Tabla 46 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,9]	123
Tabla 47 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales. Rs: 0,2 – 0,4	124
Tabla 48 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales. Rs: 0,45 – 0,65	124
Tabla 49 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales. Rs: 0,7 – 0,9	124
Tabla 50 Resumen control de columnas – Columna Hygeia. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	125
Tabla 51 Resumen control de columnas – Columna Vesta. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	126
Tabla 52 Resumen control de columnas – Columna Pallas. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	127
Tabla 53 Resumen control de columnas – Columna Ceres. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	128
Tabla 54 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Hygeia	129
Tabla 55 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Vesta ..	130
Tabla 56 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Pallas..	131
Tabla 57 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres..	132
Tabla 58 Resumen control de columnas – Columna Ceres A. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	133
Tabla 59 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres..	134
Tabla 60 Resumen control de columnas – Columna Ceres B. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	135

Tabla 61 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres..	135
Tabla 62 Resumen control de columnas – Columna Ceres C. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	136
Tabla 63 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres..	136
Tabla 64 Resumen control de columnas – Columna Ceres D. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)	137
Tabla 65 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres..	137
Tabla 66 Porcentaje de extracción y recuperación columna Hygeia	138
Tabla 67 Porcentaje de extracción y recuperación columna Vesta	139
Tabla 68 Porcentaje de extracción y recuperación columna Pallas.....	140
Tabla 69 Porcentaje de extracción y recuperación columna Ceres.....	141
Tabla 70 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres A.....	142
Tabla 71 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres B.....	143
Tabla 72 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres C.....	143
Tabla 73 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres D.....	144
Tabla 74 Resumen análisis de líquidos lixiviación agitada columna Hygeia.....	145
Tabla 75 Resumen análisis de líquidos lixiviación agitada columna Ceres	145
Tabla 76 RL columna Hygeia.....	146
Tabla 77 RL columna Vesta.....	147
Tabla 78 RL columna Pallas	147
Tabla 79 RL columna Ceres	148
Tabla 80 RL columna Ceres A.....	149
Tabla 81 RL columna Ceres B.....	149
Tabla 82 RL columna Ceres C.....	150
Tabla 83 RL columna Ceres D.....	150

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Análisis granulométrico a) mineral oxidado ARC 9, b) mineral sulfurado ARC 6 ..	36
Gráfico 2 Concentración de Cu^{+2} g/L en solución, aglomeración ARC 9. Sistema en medio ácido a 25 °C y presión atmosférica.	38
Gráfico 3 Potencial químico en solución, calculado mediante un electrodo de Ag/AgCl. Aglomeración de minerales oxidados. Sistema ácido a 25°C y presión atmosférica.....	39
Gráfico 4 pH en solución. Aglomeración de minerales oxidados. ARC 9 Sistema ácido a 25°C y presión atmosférica.	40
Gráfico 5 Concentración $[\text{Cl}^-]$ g/L en solución, aglomeración de minerales oxidados, ARC 9. Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.	41
Gráfico 6 Concentración de Cu^{+2} g/L en solución ARC 6.....	42
Gráfico 7 Eh mV aglomeración ARC 6	43
Gráfico 8 pH aglomeración ARC 6	43
Gráfico 9 Concentración Cl^- g/L en solución, aglomeración de minerales sulfurados, ARC 6. Sistema en medio ácido a 25°C y Presión atmosférica.	44
Gráfico 10 Concentración de Cu^{+2} g/L. Aglomeración de mezclas artificiales	47
Gráfico 11 Eh mV. Aglomeración de mezclas artificiales	48
Gráfico 12 pH. Aglomeración de mezclas artificiales	49
Gráfico 13 %Recuperación de cobre. Lixiviación columnas.....	56
Gráfico 14 Eh mV. Lixiviación columnas.....	57
Gráfico 15 pH. Lixiviación columnas.....	57
Gráfico 16 Concentración de Cl^- g/L. Lixiviación columnas.....	58
Gráfico 17 Concentración de Cu^{+2} [g/L] en solución, columna Ceres en serie ABCD. Sistema a 25°C y presión atmosférica.....	60
Gráfico 18 Boxplot Cu^{+2} [g/L] columna Ceres en serie ABCD.	60
Gráfico 19 Eh [mV] de la solución, columna Ceres en serie ABCD. Sistema a 25°C y presión atmosférica.....	61
Gráfico 20 pH de la solución, columna Ceres en serie ABCD. Sistema a 25°C y presión atmosférica.....	62
Gráfico 21 Concentración de Cl^- [g/L] en solución, columna Ceres en serie ABCD. Sistema a 25°C y presión atmosférica.....	62
Gráfico 22 Recuperación columna Ceres en serie ABCD. Sistema a 25°C y presión atmosférica.....	63

Gráfico 23 Cinética de extracción lixiviación agitada columna Ceres	64
Gráfico 24 Análisis granulométrico PSD mineral sulfurado ARC 6	75
Gráfico 25 Análisis granulométrico PSD mineral sulfurado ARC 9	75
Gráfico 26 Modelo del núcleo recesivo columna Hygeia.....	146
Gráfico 27 MNR columna Vesta	147
Gráfico 28 MNR columna Pallas.....	147
Gráfico 29 MNR columna Ceres.....	148
Gráfico 30 MNR columna Ceres A	149
Gráfico 31 MNR columna Ceres B	149
Gráfico 32 MNR columna Ceres C	150
Gráfico 33 MNR columna Ceres D	150

1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento hidrometalúrgico de minerales oxidados y sulfurados de cobre es ampliamente usado en la industria minera ya que es uno de los procesos de mayor efectividad, debido a su menor costo comparado con otras alternativas, tal como el procesamiento mediante la Pirometalurgia, además de su corto periodo de lixiviación y extracción. Los minerales sulfurados necesitan de reactivos con mayor poder oxidante, en comparación a minerales oxidados, estos reactivos actúan como catalizadores de las reacciones químicas presentes en el sistema cuando se desean altas recuperaciones de cobre por este medio.

Actualmente existe mucha información relacionada a la lixiviación de minerales sulfurados, se ha investigado el uso de cloruro de sodio, del ion Fe^{+3} , técnicas electroquímicas y otros métodos alternativos pero el problema surge del hecho de que la mineralogía de cada yacimiento cambia radicalmente, sobre todo la ganga, lo que hace que el consumo de reactivos sea distinto, haciendo que su uso varíe dependiendo de los minerales asociados a la mena.

El presente trabajo de investigación busca determinar si el uso de reactivos químicos tales como $NaCl$ y $Fe_2(SO_4)_3$ incrementaría la recuperación de cobre, comparado con los métodos tradicionales que usa actualmente la Compañía Minera Cerro Colorado en sus minerales de cobre.

1.1 Objetivo General

Aumentar la recuperación desde minerales sulfurados y oxidados de cobre, mediante mezclas artificiales a distintas proporciones aplicando un pre-tratamiento de aglomeración con ácido sulfúrico, cloruro de sodio y sulfato férrico.

1.2 Objetivos Específicos

- Estado del Arte: Disolución $CuFeS_2$, Fe^{+3}/Cl^-
- Sulfatación de mezclas artificiales con cloruro de sodio y sulfato férrico en la Aglomeración
- Estudio de la Lixiviación con $NaCl$ y $Fe_2(SO_4)_3$

2. MARCO GENERAL

2.1 Descripción Compañía Minera Cerro Colorado

La Compañía Minera Cerro Colorado (CMCC) es una empresa que pertenece a BHP Billiton, Base Metals, operada 100% por esta, la cual está orientada a la explotación y procesamiento de minerales de cobre, está ubicada en la región de Tarapacá, específicamente a 9 Km al poniente de la localidad de Mamiña, Provincia del Tamarugal, Comuna de Pozo Almonte y se encuentra a más de 2500 m de altura sobre el nivel del mar.

2.2 Yacimiento

Explotación de cobre a “tajo” abierto, depósitos con perfiles supérgenos desarrollados.

Primeros 70-120 m de profundidad zona lixiviada estéril, luego 60-120 m crisocola, atacamita (mineral oxidado); seguido por 50-70 m calcosina (enriquecimiento secundario) y desde 180 a 310 m mineralización hipogénea dominada por calcopirita, definiendo así la roca huésped, que contiene la mena de Cu. Las gangas son: sulfatos de Fe, Mg, Ca y Na (coquimbita, yeso, halita, limonitas, fibrorritas, melanterita, jarosita, copiapita, pisanita y romerita).

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se explican las bases teóricas del proceso de aglomeración y lixiviación de minerales de cobre utilizados por la CMCC, los principios de este capítulo serán fundamentales para entender la totalidad de la tesis debido a la complejidad de la físico - química involucrada.

3.1 Aglomeración

El proceso de aglomerado-curado consiste en la adhesión de las partículas finas a las gruesas, mediante un pre-tratamiento del mineral con ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este pre-tratamiento se hace debido a la gran generación de finos que se producen en los procesos de reducción de tamaño, ya que el polvo generado posee un porcentaje apreciable de material valioso.

Al humedecer el mineral con la cantidad de líquido apropiada se alcanza la tensión superficial necesaria para que al colisionar las partículas entre sí los finos se adhieran a los gruesos.

Las fuerzas que mantienen unidas las partículas en los aglomerados se deben a la tensión superficial y a las uniones químicas interpartículas.

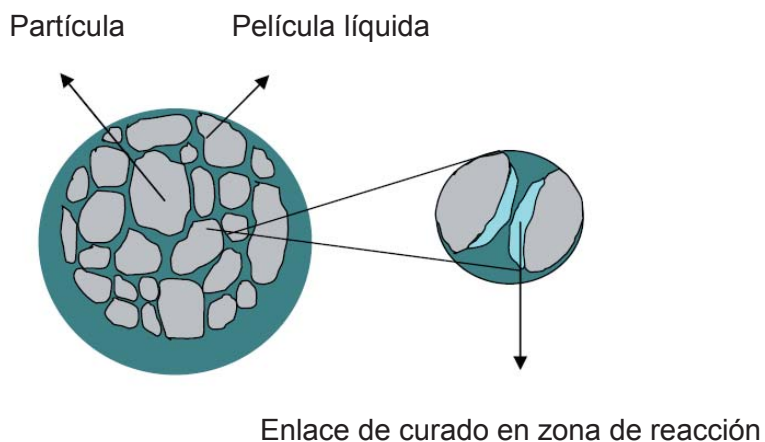


Figura 1 Mecanismo de acción del ácido sulfúrico en las partículas

La figura 1 muestra el detalle de las partículas que se entrelazan a medida que el ácido sulfúrico reacciona con sus superficies durante el curado. El curado permite lograr el

aumento de la rapidez de extracción de Cobre debido a que el ácido concentrado reacciona con el mineral, dejando en su superficie sulfato de cobre (CuSO_4), lo que posibilita disolver gran parte del Cobre.

La aglomeración se usa con el fin de:

- a) Facilitar el transporte y el almacenamiento
- b) Conseguir una mayor permeabilidad en el lecho de la pila
- c) Alcanzar una distribución homogénea de la solución lixivante en el lecho
- d) Proporcionar una estructura física de la pila estable
- e) Aumentar la cinética de extracción de la especie útil

Las características del material aglomerado:

- a) Debe ser apropiado del punto de vista químico y físico-químico
- b) Debe tener la misma densidad
- c) Debe tener el mismo grado de porosidad
- d) Debe tener la misma resistencia mecánica

Para lograr estos requerimientos es necesaria una alimentación constante.

Agentes aglomerantes o ligantes:

- a) Líquidos: agua, soluciones de ácido sulfúrico, soluciones de cianuro
- b) Sólidos: cal, cemento, etc.

El método de aglomeración dependerá de la cantidad de finos en el material, para cantidades de finos menores a 10%, el agua puede ser suficiente como agente humectante. Dependiendo de la cantidad de finos presentes, pueden existir problemas de permeabilidad en los lechos de lixiviación, por lo cual no habrá percolación ni contactos, limitando la extracción del metal de interés.

Dependiendo de la cantidad de líquido adicionado los gránulos se pueden formar con un:

- Llenado parcial con líquido de los espacios vacíos entre partículas: formación de puentes sólido-líquido, sometidos a fuerzas interfaciales de tensión superficial y presión capilar negativa, este estado puede ser pendular o funicular. (Fig 2-a, 2-b)
- Llenado total con líquido de los espacios vacíos entre partículas sin llegar a recubrir las partículas completamente: la presión capilar negativa se forma en todo el espacio con líquido, dando lugar a una cierta resistencia a la tracción en las partículas, este estado se conoce como capilar. (Fig 2-c)
- Recubrimiento total de las partículas con líquido: desaparecen las fuerzas capilares intergranulares, los granos permanecen unidos por la tensión superficial. (Fig 2-d)

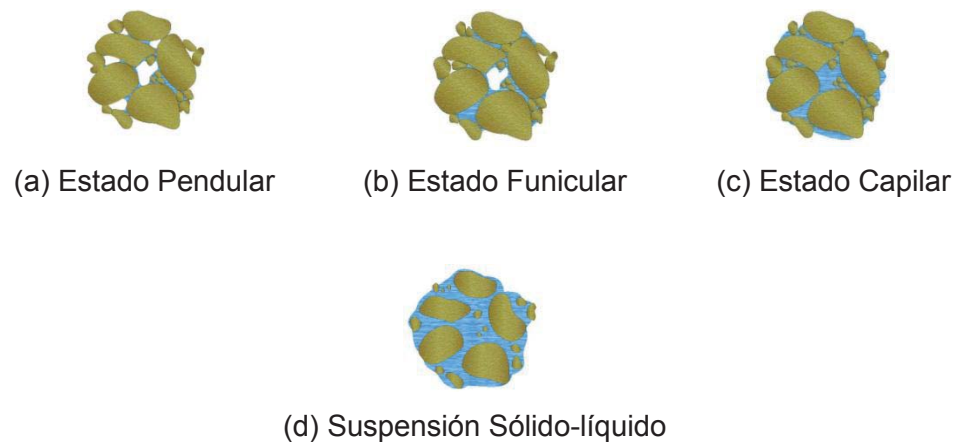


Figura 2 Diferentes estados de equilibrio de la aglomeración

3.2 Curado Ácido

Como se mencionó anteriormente, el curado ácido consiste en adicionar la solución lixivante al mineral, en el caso del cobre ácido sulfúrico, como un pre-tratamiento de las partículas antes de la lixiviación, con el objetivo de obtener sulfatos de cobre en la superficie del mineral.

Al realizar el curado ácido ocurren una serie de reacciones químicas entre los minerales presentes y el ácido sulfúrico, las reacciones que ocurren se muestran a continuación:

Mineral	Reacción
Brocantita	$\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 18\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeO}(\text{OH})_{(s)} + 4\text{CuSO}_4$ $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 14\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}_{(s)}$
Calcopirita	$3\text{CuFeS}_{2(s)} + 8\text{H}_2\text{SO}_4 + 28\text{H}_2\text{O} = 3\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}_{(s)} + 3\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}_{(s)} + 8\text{S}^0_{(s)}$
Calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}_{(s)} + \text{H}_2\text{SO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_{2(ac)} = \text{CuS}_{(s)} + \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}_{(s)}$
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_{(s)} + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}_{(s)} + \text{SiO}_{2(s)}$

Tabla 1 Principales reacciones de minerales de cobre en el curado ácido (Domic, 2001)

El efecto que produce el curado ácido es variado, siendo lo más importante:

- La sulfatación de los minerales y la deshidratación de las gangas
- La homogenización del ácido facilita la sulfatación y mejora las características mecánicas del mineral y el comportamiento hidráulico general del lecho poroso
- El agua aparte de ser aglomerante permite formar los sulfatos metálicos hidratados
- Estabilización de la sílice generada por descomposición de los silicatos de la ganga

Desde la incorporación del aglomerado-curado en los procesos hidrometalúrgicos, han aparecido problemas operacionales sujetos a condiciones mineralógicas particulares a cada mineral pero que en lo genérico se asocian a la presencia de finos y ultra finos (material bajo 75 micras) contrastando con la granulometría normal de estos procesos que consideran entre 9,5 y 12,7 mm como tamaños normales de alimentación, con contenidos variables de hierro, sílice y arcilla. Estos elementos alteran la respuesta esperada en el proceso posterior, produciendo bajas extracciones de cobre y altos contenidos de sólidos en suspensión en la solución enriquecida, incrementando los costos de operación.

3.3 Hierro en solución

La sílice y el hierro forman compuestos del tipo jarositas cuya velocidad de precipitación aumenta con la temperatura y concentración de amonio, disminuyendo con la acidez, siendo ésta última la que presenta una mayor influencia. Estos precipitados impermeabilizan la superficie del mineral valioso, evitando la percolación del lixivante y generan pérdidas en la extracción de cobre. Cuando el ion férrico alcanza su nivel de saturación, se hidroliza parcialmente y precipita como un sulfato férrico básico del tipo jarositas, la que se representa por la reacción:



El ion M puede ser reemplazado por NH_4^+ , K^+ , o H^+ . La jarosita cubre la superficie de la calcocita no reaccionada y por tanto interfiere con la actividad bioquímica. La hidrólisis del hierro también incluye las reacciones:



La concentración de férrico total remanente en solución es una función de la constante de solubilidad de los hidróxidos, de la actividad del ion hidrógeno y de la concentración del ion sulfato. El hierro total debe mantenerse en concentraciones menores a 5 g/L, para no producir precipitaciones masivas de hidróxidos por alteraciones de pH. Por otro lado, la presencia de arcillas dificulta la permeabilidad del aglomerado y la estabilidad física de la pila, lo que se traduce en inundaciones y derrumbes durante la operación de lixiviación en pila.

3.4 Consumo de Ácido

El consumo de ácido se debe principalmente a la ganga presente en el mineral, ocurriendo reacciones indeseables, como la mineralogía depende de cada zona en particular, resulta recomendable realizar pruebas de consumo de ácido para ver el rango recomendable de operación.

La Compañía Minera Cerro Colorado cuenta con la información necesaria respecto a sus minerales tratados siendo de 10 Kg H⁺/TMS la cantidad de ácido utilizado.

En la figura 4 se aprecia el consumo específico de ácido en Kg H⁺/Kg Cu para un mineral de cobre común, este parámetro servirá de comparación con el consumo de ácido obtenido en los mineral sulfurados y oxidados de cobre, ya que del balance podremos obtener la cantidad de ácido sulfúrico que realmente sulfata el cobre.

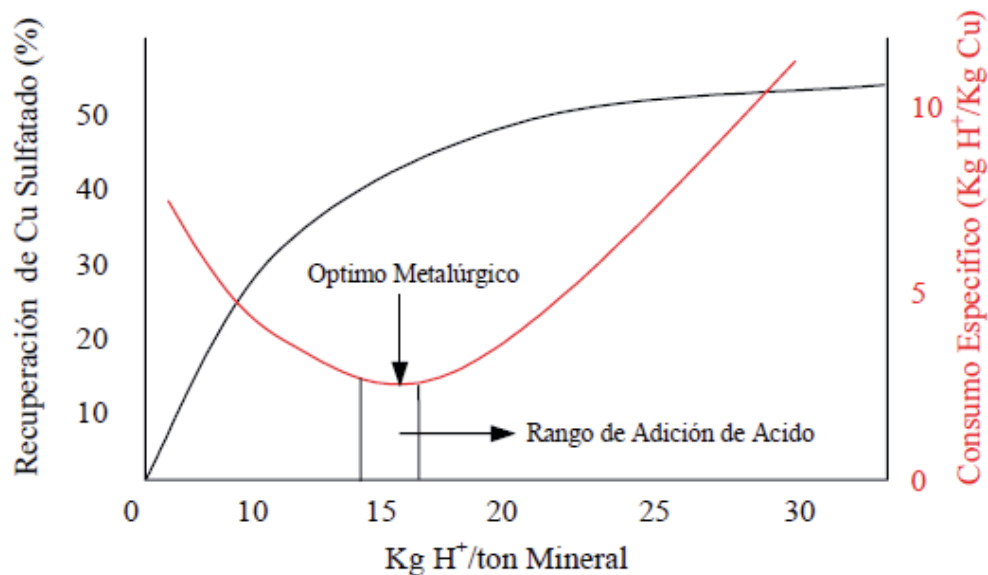


Figura 3 Rango de adición de ácido recomendado en el proceso de aglomeración (P. Schmidt, 2001)

3.5 Equipos de Aglomeración

Los equipos de aglomeración sirven para homogenizar el mineral con ácido sulfúrico y agua, existiendo una variedad de equipos cuyo uso depende de las condiciones de operación de la planta.

El equipo más utilizado consiste en un tambor con una proporción L/D entre 2,5 y 5, se utiliza cuando hay una cantidad de finos (>15%) y con un gran contenido de gruesos (>50%) generalmente se utiliza después del chancado terciario.



Figura 4 Tambor aglomerador Compañía Minera Cerro Colorado

3.6 Lixiviación

La lixiviación de minerales de cobre consiste en la disolución selectiva del mineral para obtener una solución acuosa que contiene el metal valioso y un residuo insoluble conteniendo el material sin valor. Las reacciones de disolución son de varios tipos: Procesos físicos, químicos, electroquímicos y electrolíticos.

La velocidad a la cual se disuelven los minerales depende de su naturaleza y estructura química.

La siguiente tabla clasifica la cinética de disolución de los minerales, o sea la velocidad a la cual ocurren las reacciones químicas, esta velocidad depende de condiciones externas y varios factores, siendo uno de los más importantes la difusión. Si la cinética es rápida quiere decir que no hay problema en destruir los enlaces que unen las especies de cobre, logrando

así la separación selectiva, sin embargo la cinética puede ser lenta llegando a recurrir reactivos oxidantes para lograr la separación, como es el caso de algunos minerales sulfurados que necesitan del ion férrico para obtener cobre en solución.

Cinética relativa	Tiempo de referencia	Minerales de cobre
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos a minutos disolución completa	carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (calcantita, brochantita y antlerita), y cloruros (atacamita)
Rápida (require mayor acidez)	Horas disolución complete	óxidos cúpricos (tenorita) y silicatos (crisocola y dioptasa)
Moderada (requieren oxidante)	días a semanas disolución puede no ser completa	cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y algunos silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita, copper wad y copper pitch)
Lenta (requieren oxidante)	semana a meses disolución puede ser completa	sulfuros simples (calcosina, digenita, djurleita, covelina)
Muy lenta (requieren oxidante)	Años disolución incompleta	sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, 10etraedrita)

Tabla 2 Velocidades de disolución de las principales especies de cobre, al ser expuestas a una solución de ácido sulfúrico diluido, ordenadas según sus cinéticas relativas (Domic, 2001)

Los procesos de lixiviación dependen del tipo de minerales que se desean tratar, así como la concentración y la ley del mineral, además de las características químicas y mineralógicas del mineral, pero principalmente dependen de la forma como se contacta la solución lixivante con el mineral de interés. Los métodos más conocidos son:

- a) Lixiviación en situ: Explotación de residuos fragmentados en el lugar, o a la lixiviación de yacimientos que no son posibles de lixiviar de manera convencional, ya sea por motivos técnicos y/o económicos. Además tiene la característica de un bajo costo de inversión y operación.

La cinética de lixiviación es variable, puede ser desde varios meses hasta años.

- b) Lixiviación en botaderos: Lixiviación de sobrecarga o desmonte de minas de tajo abierto, el material posee una ley baja, menor a 0,4%. El material es depositado en áreas cerca de la mina aprovechando las pendientes para el drenaje natural de las soluciones. Este método tiene un bajo costo asociado, y las recuperaciones pueden llegar hasta el 60%.
- c) Lixiviación en bateas: El mineral entra en contacto con la solución, de tal forma que inunda la batea, la cual tiene un fondo cubierto con un medio filtrante. Sirve para minerales de alta ley y bajo porcentaje de finos, además de poseer una mínima compactación. El ciclo de lixiviación es de varios días.

3.7 Lixiviación en Pilas

La lixiviación en pilas es un proceso mediante el cual se extrae el metal de interés por percolación de una solución, en el caso del cobre se utiliza ácido sulfúrico, ILS y/o refino a través del lecho de la pila.

Utilizando este método se obtiene una solución llamada PLS la cual se compone de varias especies acuosas, además del metal de interés, los que serán recuperados en los procesos posteriores de SX y EW.



Figura 5 Pila Compañía Minera Cerro Colorado

Previo a la formación de la pila, el mineral debe ser chancado lo que permite una mayor percolación de la solución en las partículas, generalmente granulometrías de -1/4" hasta -

3/4". La elección de la granulometría adecuada para un proceso de lixiviación en pila varía dependiendo del mineral a tratar.

La existencia de finos y lamas en la formación del lecho produce deficiencias en la fluido dinámica al existir migración vertical de finos durante la operación, impidiendo un flujo uniforme de la solución. La segregación de finos, originada en el montaje de la pila o bien durante la operación, define áreas ciegas entre tamaños gruesos disminuyendo la percolación y conduciendo el flujo de solución por zonas de fácil acceso o canalización. Para enfrentar el problema de permeabilidad originado por los finos, se usa la aglomeración.

3.7.1 Clasificación de las Pilas

La primera clasificación de una pila es dada en conformidad al piso que puede tener, lo que define los siguientes tipos básicos:

Pila renovable: su piso es reutilizable, de modo que terminado el ciclo de lixiviación se retira el ripio para reemplazarlo con material fresco.

Pila permanente: Su piso no es reutilizable, de modo que terminado el ciclo de lixiviación no se retira el ripio, sino que se abandona.

Pila modular: es una combinación de ambas, en que sólo se impermeabiliza una vez el piso, el ripio se abandona, pero sobre él se deposita material fresco formando una segunda capa en el sentido vertical, este tipo de pila se utiliza principalmente en la lixiviación de botaderos.

Desde el punto de vista de su operación, las pilas pueden clasificarse en:

Pila unitaria: se impermeabilizan diferentes sectores de la planta. Todo el material depositado en los diferentes sectores, pasa simultáneamente por las diversas etapas del ciclo de lixiviación.

Pila dinámica: se impermeabiliza un sector de la planta y en ésta pila única coexisten materiales que están en distinta etapas del ciclo de lixiviación. Por la configuración de la pila la dirección de flujo de las soluciones es en contracorriente respecto a la salida del mineral

(según su ubicación en el ciclo metalúrgico), se riegan con agua los sectores agotados para reposición de las pérdidas por evaporación e impregnación del ripio a retirar. Los sectores inmediatamente anteriores se riegan con solución refino de la planta de extracción por solvente, generando una solución intermedia que se utilizará en el riego de los sectores con mineral más fresco.



Figura 6 Fotografía panorámica de la CMCC (Iquique, Chile)

3.8 Lixiviación Agitada

La lixiviación agitada tiene como fin lograr una representación aproximada de la cinética de extracción de un mineral a escala laboratorio. Para esto el mineral debe estar pulverizado, bajo malla 30 logrando de esta forma aumentar el área expuesta, la agitación disminuye el espesor de la capa límite y maximiza el área de la interfase gas-líquido.

Este método se utiliza en minerales no porosos o que produzcan una gran cantidad de finos, a escala industrial se aplica a minerales de leyes altas, específicamente al procesar minerales de oro, debido al alto costo de operación que conlleva una molienda previa.

Durante la lixiviación:

- a) Dispersar los sólidos en una emulsión, formando una suspensión homogénea.
- b) Dispersar burbujas de gas en la solución.
- c) Acelerar velocidades de disolución, incrementando la transferencia de masa.

La lixiviación por agitación se puede realizar de forma mecánica o neumática en reactores conocidos como Pachucas.

Ventajas de la lixiviación por agitación:

- a) Se obtienen mayores recuperaciones
- b) La cinética de extracción es más rápida (horas)
- c) Es posible una gran automatización
- d) Se minimizan los problemas de finos

Desventajas de la lixiviación por agitación:

- a) Altos costos de inversión y operación.
- b) Requiere molienda clasificación y separación sólido-líquido.

La particularidad del sistema de lixiviación agitada reside en el hecho que pueden aplicarse diferentes factores que logren aumentar la cinética, como por ejemplo:

- a) Temperaturas de hasta 250°C
- b) Agitación intensa
- c) Presión de gases controlada
- d) Uso de reactivos exóticos y oxidantes altamente agresivos

3.9 Influencia de la ganga en la lixiviación

La lixiviación de minerales con ácido sulfúrico depende no solo de las condiciones de Eh y pH de la solución lixivante ni de la mineralogía de las especies de la mena. Existe una serie de reacciones adicionales que ocurren entre el ácido y la ganga siendo los productos de estas reacciones pasivadores de la disolución del mineral. Como lo que ocurre al precipitar un producto de hidrólisis de carácter insoluble, como la jarosita $[KFe_3(SO_4)_2(OH)_6]$ o la goetita $[FeO(OH)]$.

La mayoría de los yacimientos del tipo pórfido cuprífero contienen una gran cantidad de silicatos, alrededor de un 95%, además a menudo la ganga contiene carbonatos, sulfatos y óxidos e hidróxidos de hierro, como la magnetita (Fe_3O_4), hematita (Fe_2O_3), limonita $FeO(OH)nH_2O$ y la goetita $[FeO(OH)]$.

A continuación se presentan los principales minerales de silicatos presentes en los yacimientos porfídicos.

Espece Mineralógica	Composición más corriente para esta especie de silicato
Cuarzo	SiO_2
Clorita	$Mg_5(AlFe)(AlSi_4)O_{10}(OH)_8$
Sericita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)$
Caolinita	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$
Muscovita	$K_4Al_4(Si_6Al_2O_{20})(OH)$

Tabla 3 Principales especies minerales de silicatos, presentes en la ganga de los yacimientos de cobre porfídico, incluyendo su composición química más probable (Domic, 2001)

La influencia de la ganga en la lixiviación se manifiesta principalmente a través del grado de consumo de ácido, de la cinética de disolución y del grado de penetración de las partículas.

3.10 Diagramas de Estabilidad Eh-pH (Pourbaix)

La termodinámica es la rama de la Físico-Química que proporciona las herramientas conceptuales necesarias para determinar la ocurrencia de una reacción química, en nuestro caso nos enfocaremos en la estabilidad del cobre y el ión férrico por medio de los diagramas de Pourbaix.

Para lograr la disolución de un sólido se tiene que romper la estructura cristalina, para lo que se requiere aportar una cierta cantidad de energía, una vez separados los iones, éstos se hidratan y pasan a formar parte de la solución.

El estado de energía de un metal en una disolución electrolítica es fuertemente influenciado por el pH de la disolución y las características particulares del metal, bajo estas condiciones, Merrell Pourbaix desarrolló una forma sencilla de representar reacciones en un plano, tomando como coordenadas el pH y el potencial electroquímico y son denominados diagramas de estabilidad termodinámica. En estos diagramas, los parámetros potencial Eh y pH son mostrados en gráficas para los diversos equilibrios sobre coordenadas cartesianas normales con Eh como eje vertical y el pH como eje horizontal. El diagrama toma en cuenta los equilibrios electroquímicos y químicos de metales en agua, debido a que existen varios equilibrios para cada metal considerando solamente un metal puede ser representado claramente en un diagrama. Los datos de estos equilibrios contenidos en los diagramas se consideran de tal valor que éstos han sido preparados para la mayoría de los metales en un atlas.

La figura 8 muestra el diagrama de estabilidad del hierro en solución, donde el ión férrico que es el principal oxidante utilizado en la tesis, indica que a pHs mayores a 2 pierde su estabilidad y se acompleja.

El diagrama cuenta con 3 zonas:

La zona de inmunidad: o zona de predominio de las reacciones de reducción, corresponde a la zona donde el material se encuentra en condiciones estables.

La zona de corrosión activa: se caracteriza por el predominio de las reacciones de oxidación, que causan la destrucción por combinación o disolución continuada del material. El límite entre la zona de inmunidad y la de corrosión activa es gradual, al igual que con la de pasividad.

La zona de pasivación: corresponde a una zona de corrosión, donde la fase formada constituye una película protectora, que evita el avance del proceso de corrosión. La formación de imperfecciones en la misma (pasivación imperfecta) conlleva la aparición de corrosiones locales (por ejemplo, de picaduras).

Las figuras 7-10 muestran los diagramas de estabilidad pH de las especies dominantes en las reacciones entre minerales oxidados y sulfurados con cloro y sulfato férrico.

En la figura 7 se aprecia el campo de estabilidad del cobre en agua, es fácil encontrar el cobre en su forma Cu^{+2} sin embargo el pH es sensible, por lo que una pequeña variación puede ocasionar una disminución en la recuperación final de cobre.

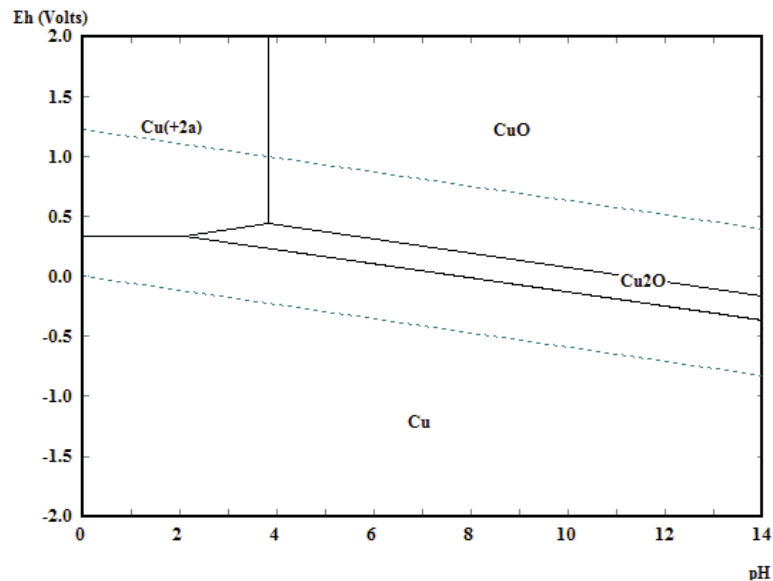


Figura 7 Diagrama de estabilidad del sistema Cu-H₂O a 25°C

El diagrama de la Figura 8 muestra la estabilidad del hierro en solución, podemos observar que para mantener el hierro con un estado de oxidación de +3 debemos tener valores de potencial muy elevados, esto es muy difícil de lograr ya que a medida que ocurren las reacciones químicas el potencial comienza a disminuir y el ácido se va consumiendo aumentando los valores de pH alejándose del campo de estabilidad del Fe^{+3} .

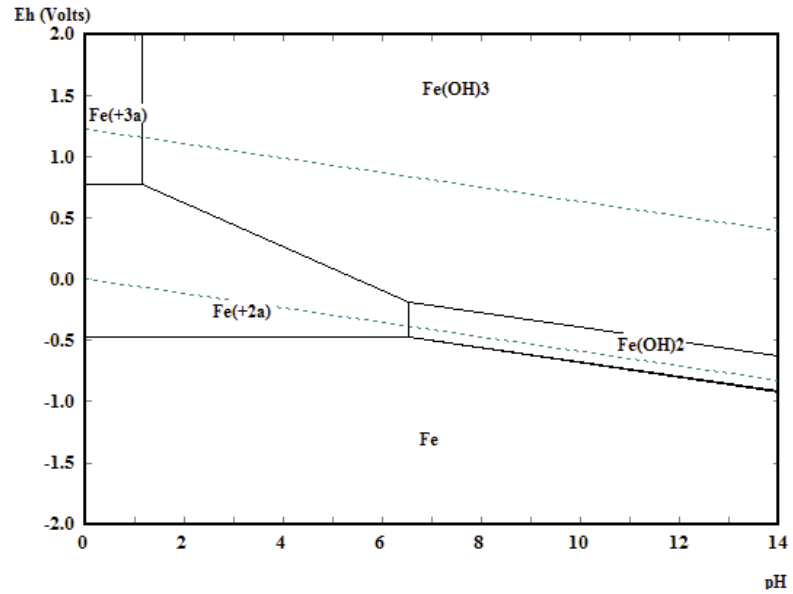


Figura 8 Diagrama de estabilidad del sistema Fe-H₂O a 25°C

El campo de estabilidad del complejo CuCl⁺, Figura 9, es donde nuestros valores resultantes de potencial y pH se mantienen en las pruebas metalúrgicas, el complejo formado es un gran oxidante, experimentalmente se ha demostrado que sirve para lixiviar minerales sulfurados.^[20]

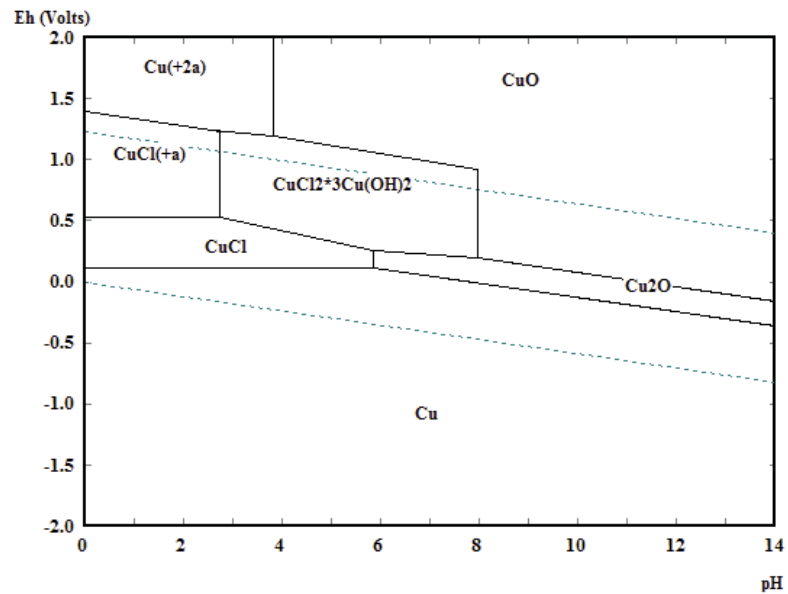


Figura 9 Diagrama de estabilidad del sistema Cu-Cl-H₂O a 25°C

En la Figura 10 el diagrama de estabilidad Eh-pH corresponde al sistema Fe-Cl- H₂O, donde la reacción predominante corresponde al complejo FeCl₂⁺ y es el complejo predominante en los minerales sulfurados que contienen elevadas cantidad de hierro en solución.

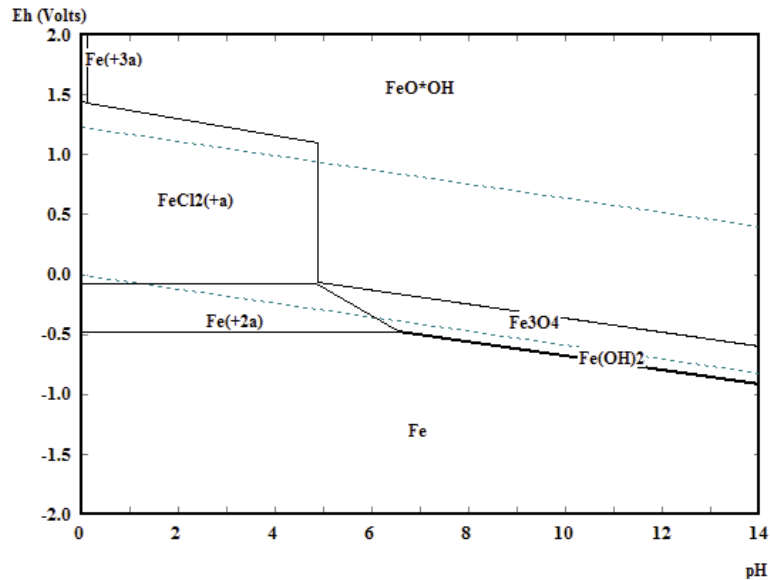


Figura 10 Diagrama de estabilidad del sistema Fe-Cl-H₂O a 25°C

3.11 Cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación de minerales es la determinación de la(s) velocidad(es) y mecanismo(s) de disolución o extracción del metal(es) contenido(s). La determinación de la cinética proporciona los siguientes 2 tipos de información, desde un punto de vista práctico los estudios cinéticos proveen de datos de ingeniería valiosos para el diseño y la evaluación de proyectos mineros, y desde un punto de vista conceptual, los estudios cinéticos permiten determinar algunas condiciones de operación y los mecanismos y las etapas limitantes involucradas, por ejemplo: (a) Proceso controlado por la difusión de reactivos, (b) Proceso controlado por la velocidad de reacción entre el mineral y la solución lixivante. Además permiten predecir la velocidad de extracción del cobre en diversas condiciones de temperatura, concentración, etc.

La lixiviación de un mineral consiste en un conjunto de reacciones heterogéneas, las cuales ocurren en la interfase sólido-líquido involucrando varias etapas. Entre las principales etapas se tienen:

1. Transporte por convección y/o difusión de los reactantes desde una fase fluida hacia la superficie (interfase de reacción)
2. Adsorción de los reactantes sobre la superficie
3. Reacción sobre la superficie
4. Liberación de los productos
5. Transporte de los productos por convección y/o difusión hacia el seno de la fase fluida

La etapa más lenta determina la velocidad (etapa controlante o limitante del proceso), los mecanismos de reacción se aprecian en la figura 11.

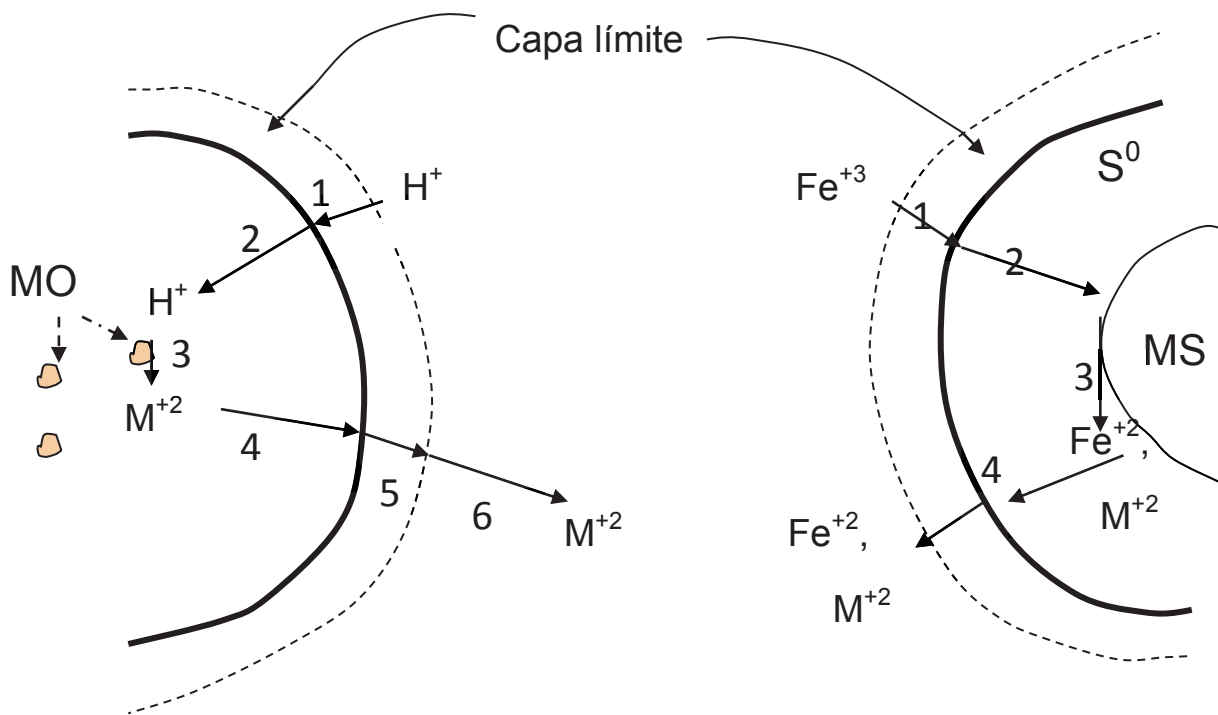


Figura 11 Mecanismos de reacción del núcleo recesivo para minerales oxidados y sulfurados

La velocidad de lixiviación es inicialmente alta ya que el reactivo ataca directamente a las especies de cobre presentes en la superficie de la partícula. Con el tiempo la velocidad de lixiviación decae porque la superficie de reacción está cada vez más alejada de la superficie de la partícula y entonces los reactivos y productos toman más tiempo en desplazarse al interior de la partícula, esto se esquematiza en la siguiente figura:

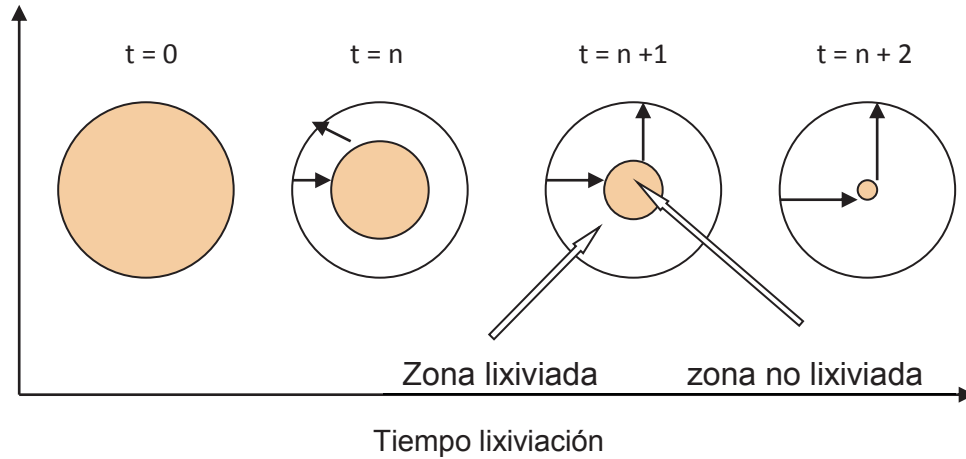
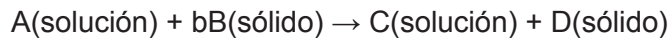


Figura 12 Proceso de lixiviación a través del mineral en función del tiempo

Existen ecuaciones que emulan la velocidad de reacción de una partícula mineral para dos casos, uno donde la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de difusión del reactivo lixivante a través del sólido y otro en que la velocidad de lixiviación está controlada por la velocidad de reacción entre el reactivo lixivante y la especie mineral.

Reacción de lixiviación general:



Las ecuaciones que determinan la velocidad de lixiviación son:

- Control reacción química:

$$t = \frac{\rho_B r^2}{bK_s C_{AL}} (1 - (1 - X_B))^{1/3}$$

$$\tau = \frac{\rho_B r^2}{bK_s C_{AL}}$$

- Control difusional:

$$t = \frac{\rho_B r^2}{6bD_{\text{eff}} C_{AL}} \left[1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B) \right]$$

$$\tau = \frac{\rho_B r^2}{6bD_{\text{eff}} C_{AL}}$$

Las partículas de mineral varían considerablemente en tamaño, porosidad, mineralogía, etc, esto dificulta la generalización y predicción de la lixiviación de Cobre así como también la velocidad de extracción de los diversos metales contenidos.

Las velocidades de disolución de los minerales sulfurados en soluciones acidas de sulfato férrico son muy pequeñas necesitándose un periodo de meses para lograr un alto porcentaje de extracción de Cobre. Esto se ha explicado por la lenta transición de las fases sólidas intermedias metaestables las cuales dificultan el transporte tanto del agente oxidante como de los productos iónicos durante el transcurso de la reacción (Barlett, 1992)

La velocidad de lixiviación de las distintas especies de cobre presentes en un mineral utilizando sulfato férrico como agente lixivante, sigue el siguiente orden:

Óxidos > Calcosina > Bornita > Covelina, Pirita > Enargita, Calcopirita

Las reacciones de lixiviación de cobre son rápidas y están limitadas sólo por la ausencia de ácido sulfúrico en la solución lixivante. Las reacciones de oxidación de los sulfuros de cobre en presencia de sulfato férrico presentan una velocidad de lixiviación intermedia y están lejos de alcanzar el equilibrio en ambientes oxidantes.^[6] Finalmente las reacciones de los constituyentes de la ganga con ácido sulfúrico liberan impurezas a la solución en forma lenta y pueden considerarse que están cerca del equilibrio. Si la ganga contiene calcita, esta reacciona rápidamente agotando el ácido de la solución lixivante y el calcio disuelto puede precipitar como yeso dentro del lecho mineral, esto produce una disminución de la velocidad de percolación del líquido lixivante.

En la figura 12 se muestran los resultados empíricos de un test cinético de minerales de baja ley realizados en columnas piloto para un material oxidado y otro sulfurado. Se observa que en ambos casos el proceso de lixiviación demora varios meses, siendo la velocidad de lixiviación del mineral oxidado mucho mayor a la del mineral sulfurado.

Los principales factores que influyen en la velocidad de lixiviación del Cobre de un mineral son: temperatura, concentración de reactivos, presencia de microorganismos hierro-oxidantes, ocurrencia de reacciones de precipitación, etc. La velocidad también depende de las propiedades del mineral como son: tamaño de partícula, porosidad, asociaciones

mineralógicas (posible ocurrencia de efectos galvánicos), composición, grado de diseminación, etc.

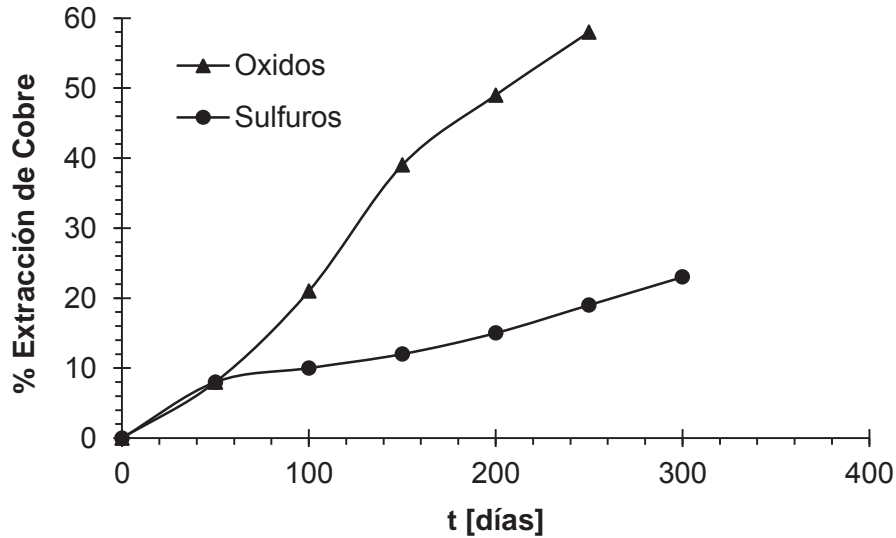


Figura 13 Resultados experimentales de lixiviación de minerales de baja ley en columnas piloto para un material oxidado y otro sulfurado. Mineral ROM, ensayos a temperatura ambiente (Mitov et al., 1990)

Los procesos de lixiviación dependen ampliamente de la termodinámica de las especies que se encuentran presentes en solución, en el caso de los minerales oxidados la lixiviación ocurre espontáneamente, no obstante, los minerales sulfurados solo pueden ser lixiviados agregando un oxidante como, agua oxigenada, ozono, o el ión férrico.



La lixiviación de la Calcosina se desarrolla en dos etapas, formándose como intermediario el compuesto $\text{CuS}_{(s)}$. La velocidad de oxidación de este compuesto Intermedio es mucho menor que la velocidad de disolución de oxidación de la Calcosina

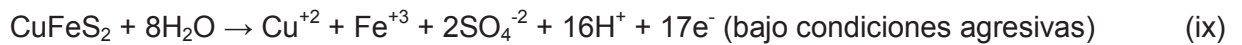


Estudios anteriores^[3] han demostrado que la lixiviación varía con el tamaño de partícula, siendo recomendable el uso de ½ pulgada, ya que las especies de mayor tamaño presentan una mayor resistencia difusional al transporte de sulfato férrico.

La solubilidad de la calcopirita en agua es baja: $2,35 \times 10^{-6}$ M a 100°C , y en presencia de ácido la reacción es lenta, y puede ser expresada como:



En presencia de agente oxidante, la calcopirita se disuelve rápidamente. La disolución anódica de la calcopirita puede ser representada:



Mientras el azufre es sin duda el producto final en la mayoría de las condiciones, se observa que la oxidación de la calcopirita es más lenta que la difusión del oxidante a través de la capa de azufre.

4. Trabajo Experimental

El procedimiento experimental se dividió en tres partes, la primera corresponde a una serie de pruebas de aglomeración con mineral sulfurado y oxidado a diferentes tiempos y dosis de reactivos, el objetivo principal es ver la influencia que tiene la sal, NaCl, al reaccionar con el mineral, con los mejores resultados se volvió a aglomerar pero con mezclas artificiales entre ambos minerales, para comprobar si el efecto obtenido anteriormente incrementa al tener una variación mineralógica más extensa, y finalmente con las concentraciones de cobre mas altas obtenidas en la segunda parte se llevó a cabo una lixiviación en columnas de un metro de altura para ver la cinética de extracción y compararla con la que se obtiene actualmente en la compañía.

El trabajo se desarrolló estrictamente, bajo los estándares de seguridad de Cerro Colorado, además del seguimiento de los procedimientos de la compañía, tanto en el CIMM como en la Planta Piloto.

A continuación se presenta un resumen del trabajo de tesis, indicando la pauta en cada prueba.

Trabajo de Tesis desarrollado durante los 6 meses:

- Selección del material: Sulfuros ARC 6 y Óxidos ARC 9
- Muestreo: Método de roleo y cuarteo para la homogenización y correcta toma de muestras de cada mineral
- Análisis granulométrico del mineral, PSD
- Toma de muestras de 5 Kg c/u para la Aglomeración y Test de sulfatación (TS), 33 muestras
- Aglomeración de cada muestras a diferentes dosis de sal y sulfato férrico, y variación del tiempo de reposo
- Test de Sulfatación y lavado de ripios ARC 9: 15 muestras
- Test de Sulfatación y lavado de ripios ARC 6: 18 muestras
- Toma de muestras de 2 Kg c/u para la Aglomeración y TS de MA: 75 muestras

- Aglomeración de la totalidad de las muestras con 10 Kg H_2SO_4 /TMS, además de 4, 10 y 20 Kg NaCl /TMS, junto a un barrido con 10 Kg NaCl /TMS y 5 Kg $Fe_2(SO_4)_3$ /TMS, más un blanco para comparación.
- Una vez transcurrido cada tiempo de reposo, se realizó el TS a todas las MA
- Análisis de datos MA y selección de condiciones para la lixiviación en columnas
- Se tomaron muestras para el montaje de cada columna, 4 columnas grandes y 4 chicas que fueron montadas en serie, la cual corresponde a la mejor condición.
- Aglomeración y montaje de columnas en la Planta Piloto.
- Lixiviación agitada de 2 kg de material pulverizado, correspondientes a las condiciones de las columnas montadas.
- Análisis de resultados y conclusiones finales

4.1 Preparación de Muestras

El punto de partida fue ver la diferencia de tamaño y calidad de cada mineral, con el fin de obtener muestras representativas para el desarrollo de las pruebas metalúrgicas, ya que de lo contrario podríamos obtener resultados que no corresponden a la realidad y alterar las conclusiones finales del proyecto.

El material utilizado proviene del botadero sur del rajo, este corresponde a minerales oxidados y sulfurados de cobre, cuya denominación corresponde a ARC 9 y ARC 6 respectivamente, esta clasificación hace referencia a la calidad del mineral y al contenido de arcillas que tienen siendo inicialmente el valor 1 cuya calidad física del material es menor y 8 el mejor, sin embargo durante el procesamiento se encontró un mineral de menor calidad que el 1 y se le asignó el número 9, ya que la base de datos no aceptaba el cero, por ser una cifra problemática al ser usada en programas computacionales.

La homogenización del mineral fue un trabajo complejo, ya que se movió aproximadamente 1 tonelada de cada clase de mineral, como se puede apreciar en la Figura 14.

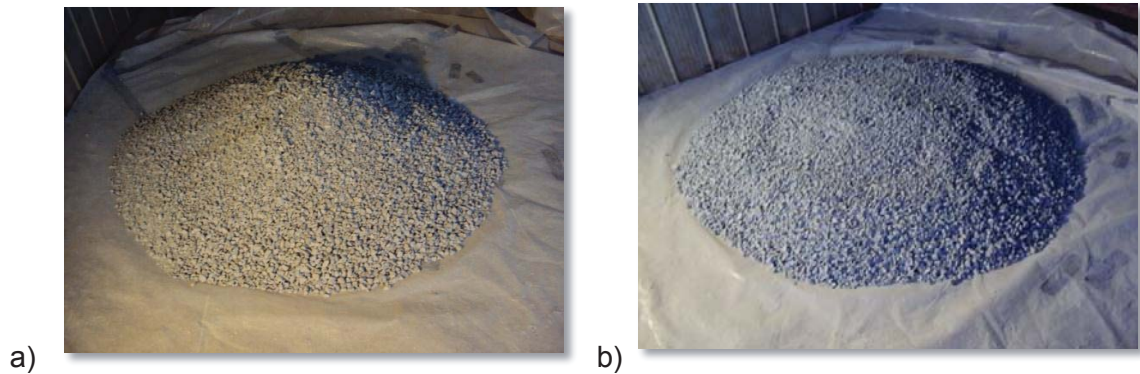


Figura 14 Mineral acopiado planta piloto; a) mineral sulfurado de cobre ARC 6, b) mineral oxidado de cobre ARC 9

Para el análisis granulométrico o PSD se utilizó todo el mineral, a través de una serie de harneros, la disposición de estos está establecida por la planta piloto para que todas las pruebas posean los mismos parámetros básicos.

Una vez terminada la homogenización del mineral se tomaron todas las muestras necesarias, las primeras 2 muestras de cada material se utilizaron para la determinación de la ley de cabeza de cada uno, donde se midió el %CuT, %CuS, %FeT y %FeS, estos valores fueron el punto de partida para el balance de masa de cada una de las pruebas posteriores.

4.2 Análisis Granulométrico

El hecho de utilizar procesos hidrometalúrgicos, en este caso lixiviación, conlleva a tener como mínimo un chancado terciario, con el fin de obtener un tamaño de partícula de aproximadamente 3/4" ya que al momento de realizar la lixiviación, la solución debe penetrar completamente para recuperar así la mayor cantidad de metal posible.

Los minerales utilizados deben tener el tamaño apropiado, con un P80 idealmente cercano a 1,5 cm. El tamaño se determinó por medio de un análisis granulométrico, PSD, mediante una serie de tamices Tyler.

4.3 Aglomeración de Muestras

La aglomeración del mineral se realizó sobre polietileno de alta densidad HDPE, el mezclado del mineral se realizó manualmente, las pruebas se llevaron a cabo con muestras representativas de 5 Kilogramos, cada una de ellas contiene una dosis de 10 Kg H_2SO_4 /TMS de mineral, la cual se dejó constante en todas las muestras respetando los parámetros utilizados en planta, en el caso de los minerales oxidados las dosis de sal (NaCl) fueron:

- 4 Kg NaCl/TMS
- 8 Kg NaCl/TMS
- 10 Kg NaCl/TMS
- 20 Kg NaCl/TMS de mineral

En el caso del mineral oxidado se utilizaron 5, 10 y 15 días de reposo para cada una de las muestras, las dosis de reactivo se indican en la Tabla 4.

Parámetros	MMO0	MMO4	MMO8	MMO10	MMO20
Masa [Kg]	5	5	5	5	5
NaCl [g]	-	19,4	38,8	48,5	97
H_2SO_4 [cm ³]	10,1	25,24	25,24	25,24	25,24
Refino [cm ³]	130,46	326,14	326,14	326,14	326,14

Tabla 4 Resumen dosis de reactivo aglomeración mineral oxidado de cobre ARC 9

Además de una serie de fotografías tomadas luego de cada aglomeración en cada una de las combinaciones mencionadas anteriormente, la Figura 15 muestra el mineral oxidado aglomerado con 4 Kg NaCl/TMS de mineral a los 5, 10 y 15 días de reposo.



Figura 15 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. (a) 5 días, b) 10 días, c) 15 días)

La aglomeración de minerales sulfurados ARC 6 se realizó con la misma cantidad de ácido sulfúrico utilizada en planta, al igual que las muestras anteriores, se trabajó con condiciones ambientales de presión y temperatura, sin embargo la dosis de sal y el tiempo de reposo fue distinta, este hecho se explica considerando que los minerales sulfurados reaccionan de manera mas lenta al ataque químico con ácido, para este caso particular las cantidades de sal agregada fueron:

- 4 Kg NaCl/TMS
- 10 Kg NaCl/TMS
- 20 Kg NaCl/TMS
- 30 Kg NaCl/TMS
- 10 Kg NaCl/TMS, 5 Kg Fe₂(SO₄)₃/TMS

A diferencia de las pruebas anteriores se dispuso de una muestra adicional, la que contenía férrico para acelerar la cinética de reacción, una vez transcurrido el tiempo de reposo de

cada una de las muestras, que en este caso son 10, 20 y 30 días de reposo, se realizó un test de sulfatación, determinando el Cu^{+2} g/L, Fe^{+2} g/L, FeT g/L, ácidos g/L, Eh mV, pH y Cl^- g/L en solución, las dosis de reactivos se detalla en la Tabla 5.

Parámetros	MMS0	MMS4	MMS10	MMS20	MMS30	MMS10F5
Masa [Kg]	5	5	5	5	5	5
NaCl [g]	-	19,4	48,5	97	145,5	48,5
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ [g]	-	-	-	-	-	24,25
H_2SO_4 [cm^3]	10,1	26,01	26,01	26,01	25,24	25,24
Refino [cm^3]	85,29	213,22	213,22	213,22	326,14	326,14

Tabla 5 Resumen dosis de reactivo aglomeración mineral sulfurado de cobre ARC 6

Al igual que en el caso de los minerales oxidados se dejó un registro visual de algunas muestras aglomeradas en las dependencias de la planta piloto, La figura 16 muestra la aglomeración después de 10 días de reposo a diferentes dosis de cloruro de sodio.

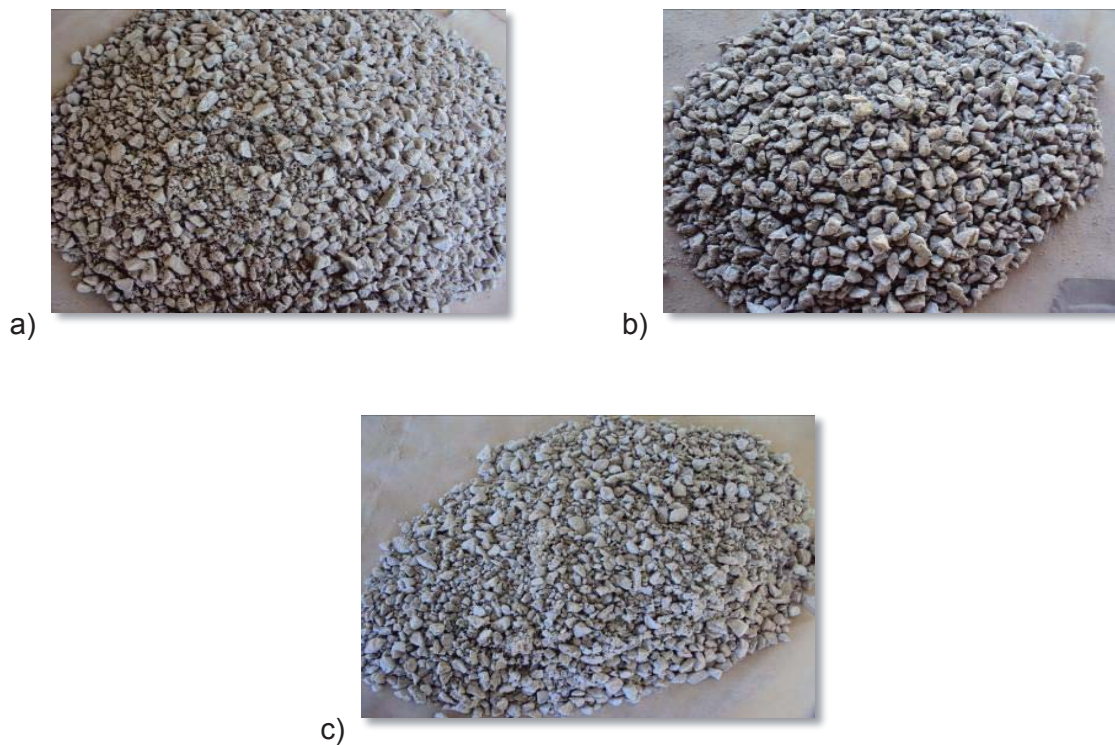


Figura 16 Aglomeración ARC 6 10 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica.
(a) Blanco, b) 4 Kg NaCl/TMS, c) 10 Kg NaCl/TMS)

4.4 Aglomeración de mezclas artificiales

El principal objetivo de la investigación es determinar la influencia que tiene la sal y el sulfato férrico en la aglomeración de mezclas artificiales.

Estas mezclas artificiales o proporcionales entre ARC 6 y ARC 9 fueron creadas a partir de un balance de masa entre ambos y el concepto de razón de solubilidad (Anexo A-2):

$$Rs = \frac{\%CuS}{\%CuT}$$

Los mejores resultados que se obtuvieron de la aglomeración de minerales oxidados y sulfurados, para aglomerar las MA, variando las razones de solubilidad desde 0,2 a 0,9, incluyendo los puntos intermedios.

Una vez que culminó el tiempo de reposo, cada MA fue almacenada y rotulada en bolsas plásticas que fueron llevada a las dependencias del CIMM donde se realizó el TS y el lavado de rípios para determinar el cobre en solución, estos resultados fueron determinantes a la hora de seleccionar las dosis de reactivos utilizados en la lixiviación en columnas.

La figura 17 muestra las mezclas aglomeradas para las razones 0,5-0,6.

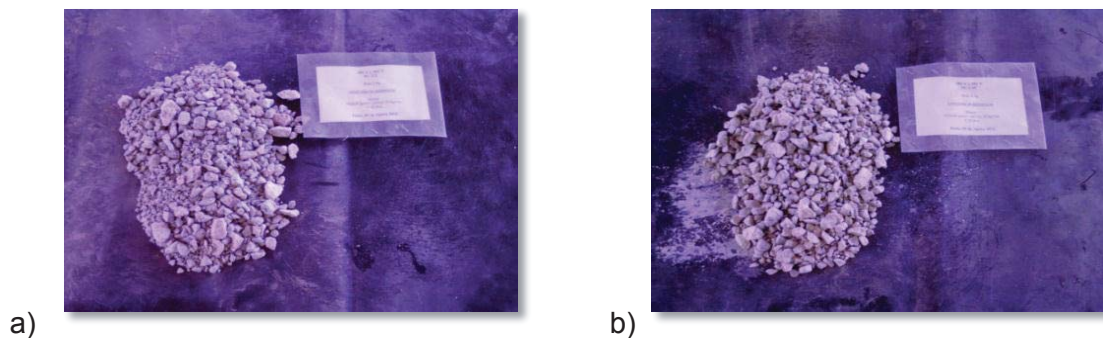




Figura 17 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. (a) Rs: 0,5, b) Rs: 0,55, c) Rs:0,6)

4.5 Aglomeración y Lixiviación de Columnas

Se montaron cuatro columnas de un metro de altura cada una, llamadas Hygeia, Vesta, Pallas y Ceres, donde la mejor condición corresponde a la columna Ceres, la cual contiene férrico, además se montaron cuatro columnas de 25 cm de altura c/u emulando la columna Ceres de un metro, con el objetivo de ver el comportamiento químico de la columna seccionalmente y ver la influencia de la altura en la cinética.

Los tiempos de reposo para todas las columnas fueron de 20 días y la razón de solubilidad escogida fue de 0,6. Anexo A-4, las fotografías del mineral aglomerado previo al montaje de las columnas se encuentran en el Anexo D-4.

En la parte superior de las instalaciones de la Planta Piloto se realizó el montaje de las 4 Columnas, tal como se aprecia en la Figura 18, y en la parte inferior se dispusieron en serie 4 columnas de 25 cm c/u, Figura 19, para emular el comportamiento de la mejor condición obtenida en la aglomeración. (Columna Ceres), se mantuvo el riego con refino de planta por aproximadamente 60 días, analizando el PLS obtenido diariamente para el balance de masa correspondiente.

Parámetros	Hygeia	Vesta	Pallas	Ceres
Masa [Kg]	48	48	48	52
NaCl [g]	-	465,6	931,2	504,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	-	-	-	252,2
H ₂ SO ₄ [cm ³]	249,68	249,68	249,68	270,49
Refino [cm ³]	2046,94	2046,94	2046,94	2217,51

Tabla 6 Resumen dosis de reactivos aglomeración columnas

Parámetros	Ceres ABCD
Masa [Kg]	6
NaCl [g]	116,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	58,2
H ₂ SO ₄ [cm ³]	62,42
Refino [cm ³]	511,73

Tabla 7 Resumen dosis de reactivo aglomeración columna Ceres en serie ABCD

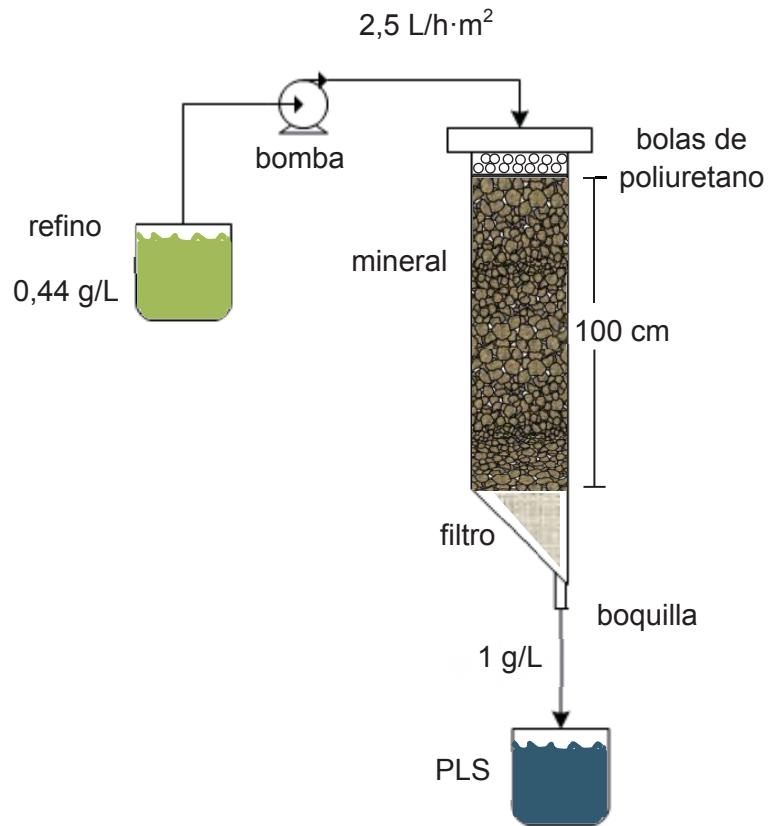


Figura 18 Esquema columnas de lixiviación Hygeia, Vesta, Pallas y Ceres

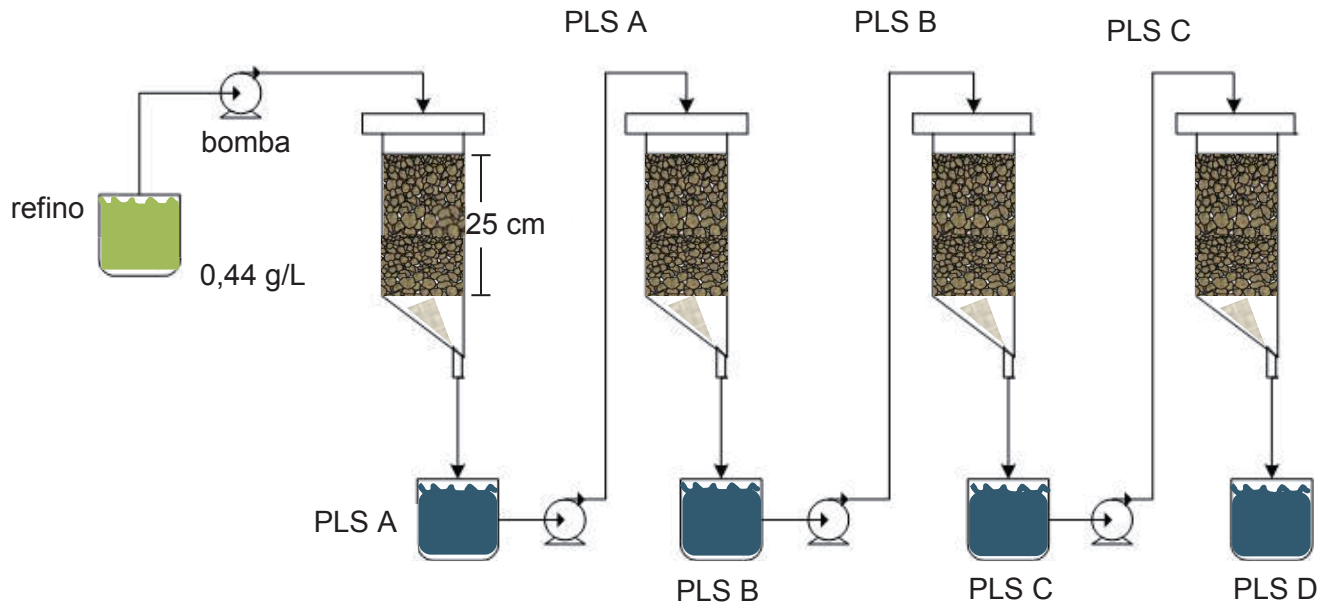


Figura 19 Esquema columna de lixiviación Ceres en serie

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

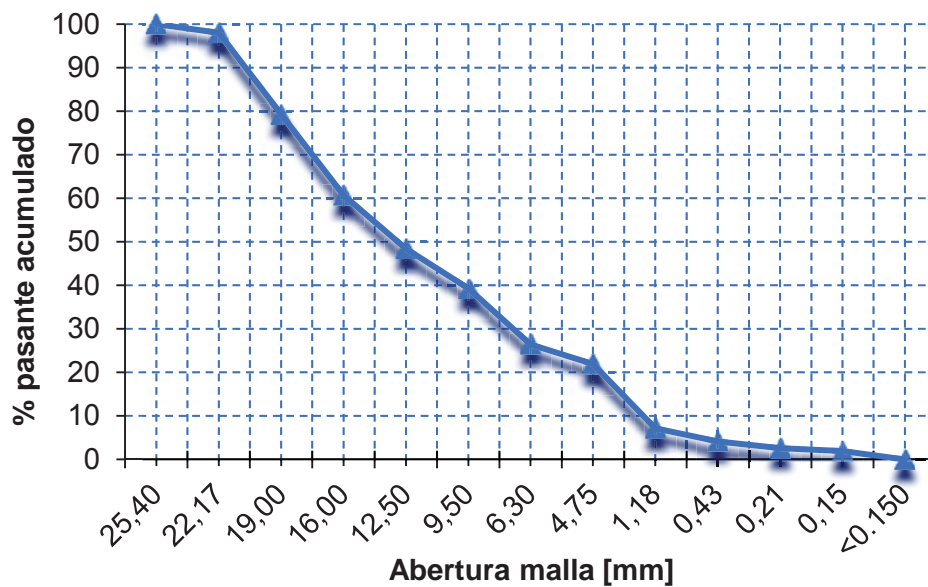
En este capítulo se presentan los resultados de cada una de las pruebas realizadas tanto a los minerales oxidados como sulfurados, al igual que las mezclas artificiales.

Las pruebas corresponden a la aglomeración del mineral ARC 6, ARC 9, junto al posterior test de sulfatación y análisis químico de líquidos.

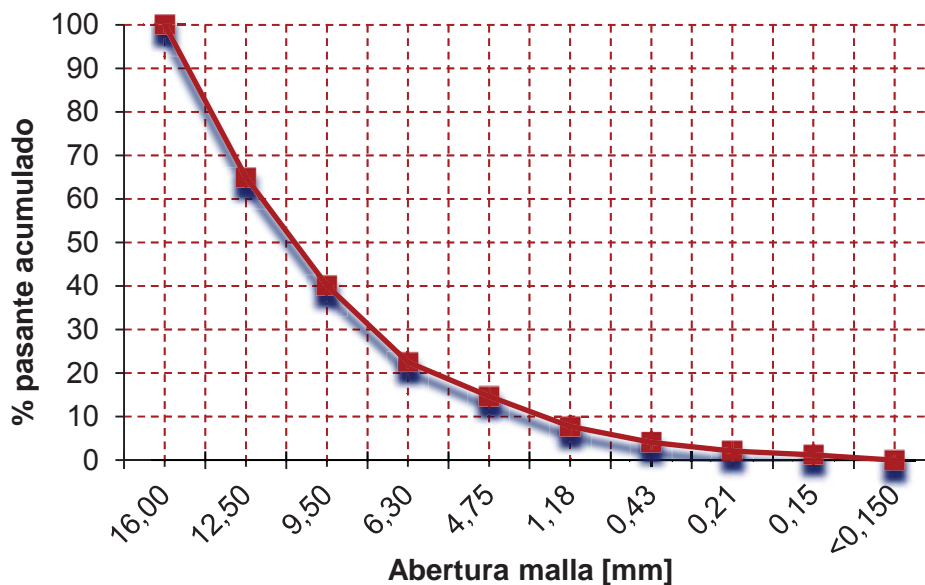
Los mejores resultados se utilizaron para montar columnas de aproximadamente un metro de altura con el objetivo de emular la cinética de lixiviación de las pilas de la compañía.

5.1 Análisis granulométrico

Antes de realizar el análisis químico al mineral sulfurado y oxidado se procedió a determinar el tamaño de partícula, específicamente el P80.



a)



b)

Gráfico 1 Análisis granulométrico a) mineral oxidado ARC 9, b) mineral sulfurado ARC 6

Mediante una interpolación podemos determinar que el P80 para el mineral oxidado es de 0,75 pulg (1,905 cm) y para el sulfurado es: 0,55 pulg (1,4 cm)

5.2 Mineral tratado

Los minerales oxidados ARC 9 contienen principalmente; Crisocola y Brochantita cuya ganga es la Sericita, y en menor medida Kaolinita, Muscovita, Cuarzo, Calcita y Sulfato.

El mineral sulfurado ARC 6 contiene Calcopirita, Calcita y Pirita además de Kaolinita, Muscovita, Feldespato, Clorita y Cuarzo.

Una vez realizado el PSD y la toma de muestras se determinó la ley, la cual nos permitió desarrollar los balances correspondientes en el transcurso de la investigación.

La tabla 4 muestra el resultado del análisis químico del ARC 9 donde se obtuvo un 1,09% de cobre total y 0,96% de cobre soluble en ácido sulfúrico, debido a la afinidad que tiene el mineral oxidado a ser lixiviado, teóricamente es posible recuperar el 88,1% del cobre mediante la adición de ácido sulfúrico.

ARC 9				
%CuT	%CuS	%Cu _{Insoluble}	%FeT	%FeS
1,09	0,96	0,13	1,25	0,16

Tabla 8 Ley de cabeza mineral oxidado

El contenido de cobre total y soluble en minerales sulfurados es bastante menor debido a su mayor contenido de impurezas y a la lenta cinética que presentan esta clase de minerales al ataque químico con ácido sulfúrico, tal como se aprecia en la tabla 5, con una diferencia del 0,5% entre ambos que representa la cantidad de cobre insoluble, la mayor cantidad de calcopirita asociada hace de esto un desafío, cuyo resultado se verá en el transcurso del trabajo.

ARC 6				
%CuT	%CuS	%Cu _{Insoluble}	%FeT	%FeS
0,58	0,08	0,50	1,5	0,33

Tabla 9 Ley de cabeza mineral sulfurado

Las pruebas de lixiviación fueron siempre lixiviadas con el refino proveniente de la empresa, el que era almacenado en 5 bidones de aproximadamente 80 L de capacidad, debido al consumo constante de refino de las 8 columnas los bidones se llenaban una vez por semana por lo que el análisis químico de refino era variable, este dato se considero en cada uno de los balances de recuperación de cobre de las columnas, la tabla 6 muestra el análisis químico de refino utilizado en la primera semana de riego de las columnas.

Refino					
Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH
0,44	1,04	4,6	12,4	687	1,15

Tabla 10 Análisis químico de refino inicial proveniente de planta

5.3 Aglomeración ARC 9

En el gráfico 2 se observa el efecto de la cantidad de NaCl en la aglomeración en función del tiempo en muestras de mineral oxidado de cobre, como cada muestra aglomerada se realiza un lavado, la solución era analizada por Cu^{+2} el cual representa el cobre sulfatado CuSO_4 formado por el proceso de curado en la aglomeración donde la muestra en blanco (sólo contiene ácido sulfúrico) logró la mayor concentración de cobre con 1,14 g/L de Cu^{+2} por un periodo de 15 días de reposo.

El mineral oxidado de cobre, en este caso principalmente Brochantita y Crisocola tiene una cinética elevada y no necesita de agentes oxidantes o reductores para alcanzar recuperaciones sobre el 80% y su disolución es proporcionada por la cantidad de protones presentes en la solución,

Como la concentración de cobre varía muy poco y el ΔG° es un valor estándar, por lo que la ocurrencia de la reacción depende solo del pH

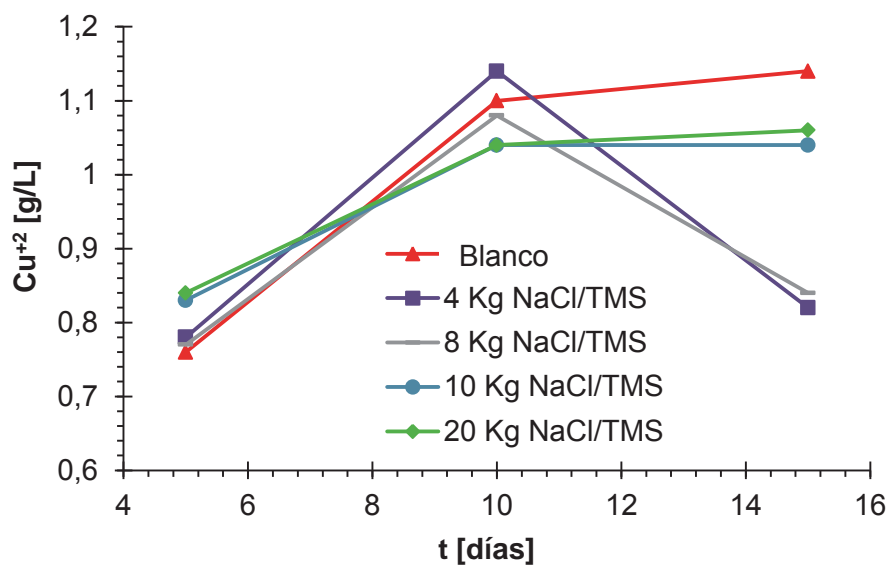


Gráfico 2 Concentración de Cu^{+2} g/L en solución, aglomeración ARC 9.
Sistema en medio ácido a 25 °C y presión atmosférica.

Todas las dosis de sal disminuyen la recuperación de cobre por un periodo de 15 días, no obstante el cloruro de sodio logra un aumento de 0,04 g/L en la concentración de cobre a los 10 días, los valores de potencial, Gráfico 3 son bajos, según el diagrama de estabilidad Eh-pH el cobre se encuentra como CuCl en solución..

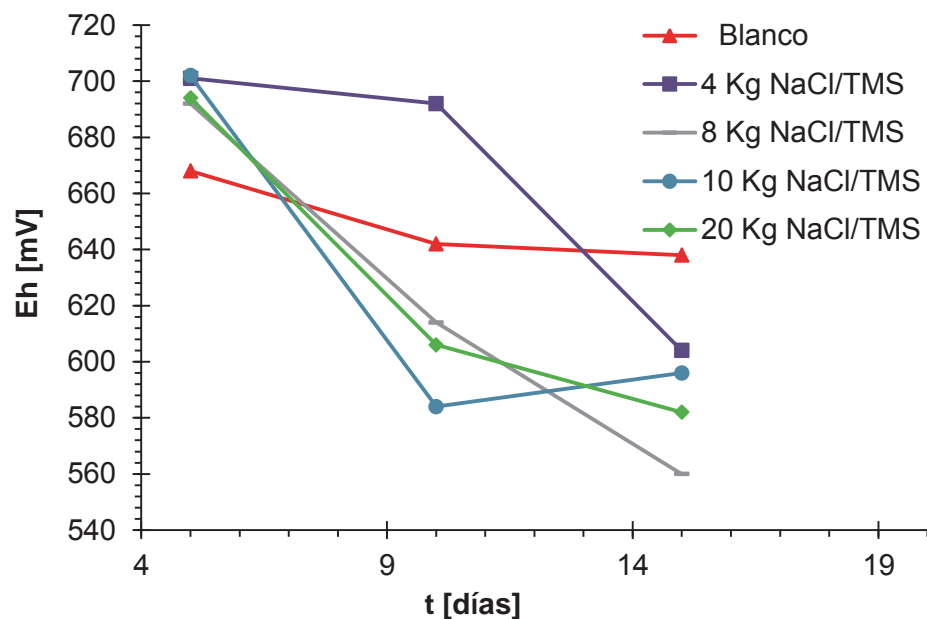


Gráfico 3 Potencial químico en solución, calculado mediante un electrodo de Ag/AgCl. Aglomeración de minerales oxidados. Sistema ácido a 25°C y presión atmosférica.

Las muestras sólidas que obtuvieron mayor cantidad de cobre sulfatado corresponden a valores de pH inferiores, el cloro logra aumentar el pH a valores fuera del rango de estabilidad del cobre en solución

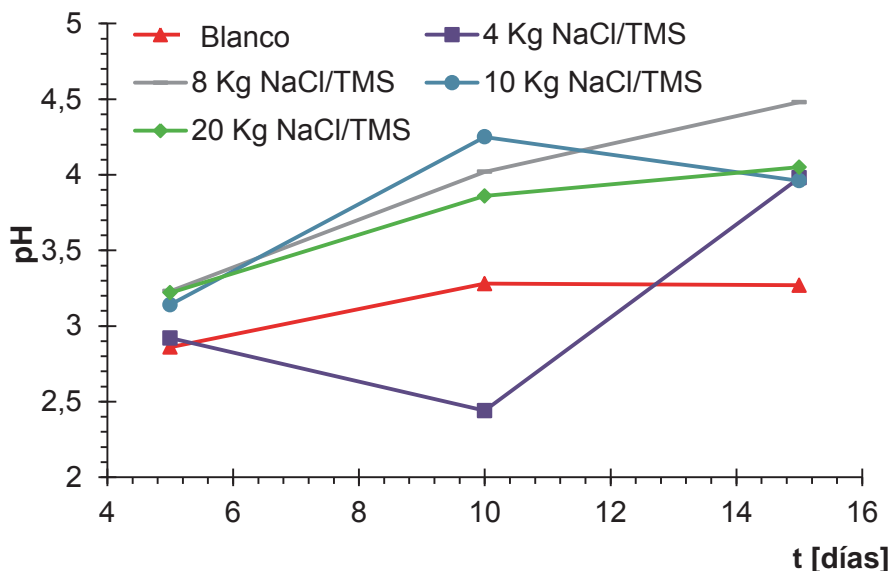


Gráfico 4 pH en solución. Aglomeración de minerales oxidados.
ARC 9 Sistema ácido a 25°C y presión atmosférica.

En el caso de la Crisocola el mecanismo puede ser representado por la siguiente reacción:



$$\Delta G_{\text{RXN}} = \Delta G^\circ + 2,303RT(\log[\text{Cu}^{+2}] - 2\log[\text{H}^+])$$

Se puede apreciar que la condición para que ocurra la reacción sólo depende del pH, o sea de la cantidad de protones que posee la solución, de esta manera las elevadas dosis de cloro no solo aumentan el pH sino que conllevan a terminar la disolución del cobre.

El cloro en solución reacciona con el cobre formando CuCl^+ :



El CuCl^+ es un oxidante y sirve para catalizar las reacciones, sin embargo esto solo es factible en los minerales sulfurados ^[20], en este caso el cloro consume el cobre en solución y eleva el valor del pH por lo que la cantidad de cobre sulfatado disminuye, de la misma forma que lo hace la recuperación.

El gráfico 5 indica la cantidad de cloro en solución en cada una de las muestras donde se aprecia el incremento de sal, llegando a valores de cloro libre de 4,9 g/L.

Grandes cantidades de cloro reaccionan químicamente con el cobre.

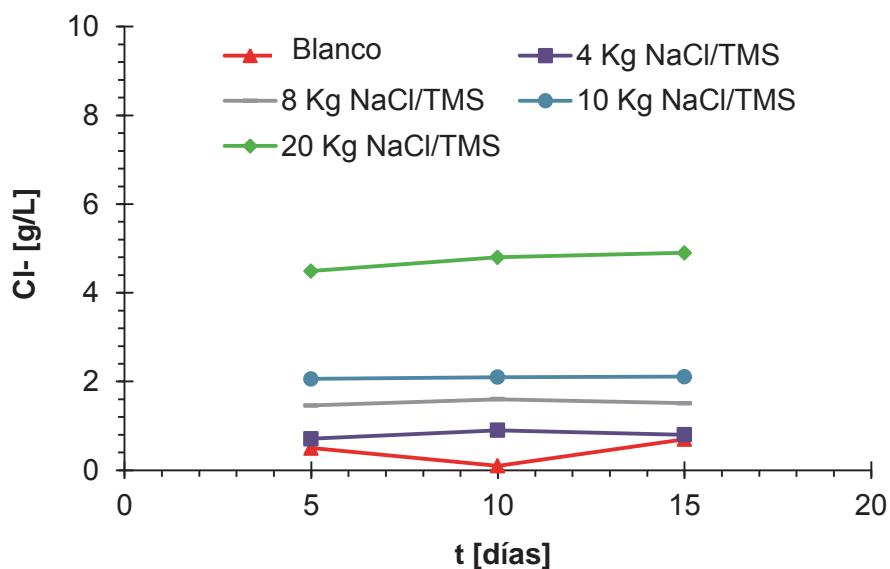


Gráfico 5 Concentración [Cl⁻] g/L en solución, aglomeración de minerales oxidados, ARC 9. Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

El cloro en exceso no sirve como oxidante ya que consume el cobre y disminuye la recuperación de minerales de cobre, por lo que no es recomendable lixiviar minerales oxidados con cloruro de sodio ya que su costo es elevado y en gran medida no sirve.

5.4 Aglomeración ARC 6

El gráfico 6 indica la concentración de cobre de cada muestra luego de la aglomeración con NaCl, a diferencia de la aglomeración de minerales oxidados se agregó una muestra sólida de sulfuros con sulfato férrico como oxidante, esta muestra es la que más se destaca alcanzando una diferencia de 0,33 g/L en comparación con la muestra que contiene 10 Kg NaCl/TMS y 0,61 g/L con el blanco, para un periodo de 20 días de reposo.

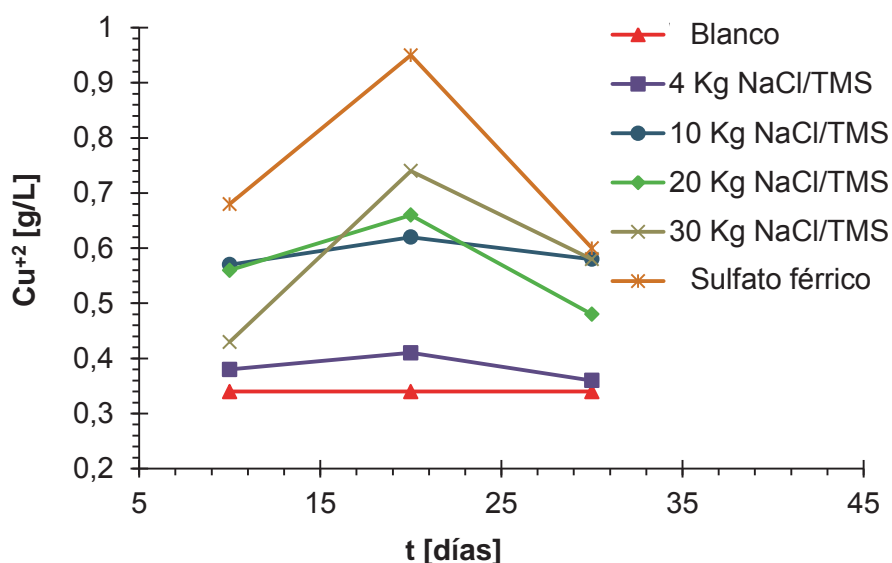
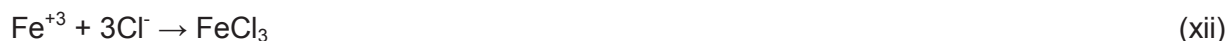


Gráfico 6 Concentración de Cu^{+2} g/L en solución ARC 6

En el caso de los minerales sulfurados es muy difícil lixiviar sólo con ácido sulfúrico, pero esto cambia al usar sal ya que el cobre y el hierro reaccionan con el cloro en solución formando CuCl^+ y FeCl_3 que sirven de catalizadores para las reacciones de cobre:



El gráfico 7 y 8 muestra el potencial y pH en solución de cada muestra, donde el potencial mas elevado corresponde al del sulfato férrico, manteniendo el campo de estabilidad del ión Cu^{+2} según el diagrama de estabilidad Cu- H_2O , logrando así una mayor recuperación de este metal.

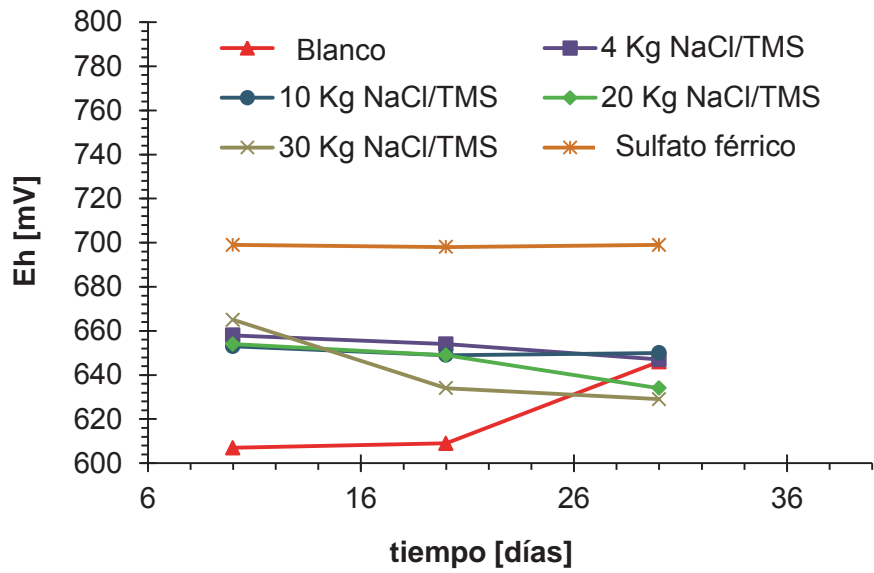


Gráfico 7 Eh mV aglomeración ARC 6

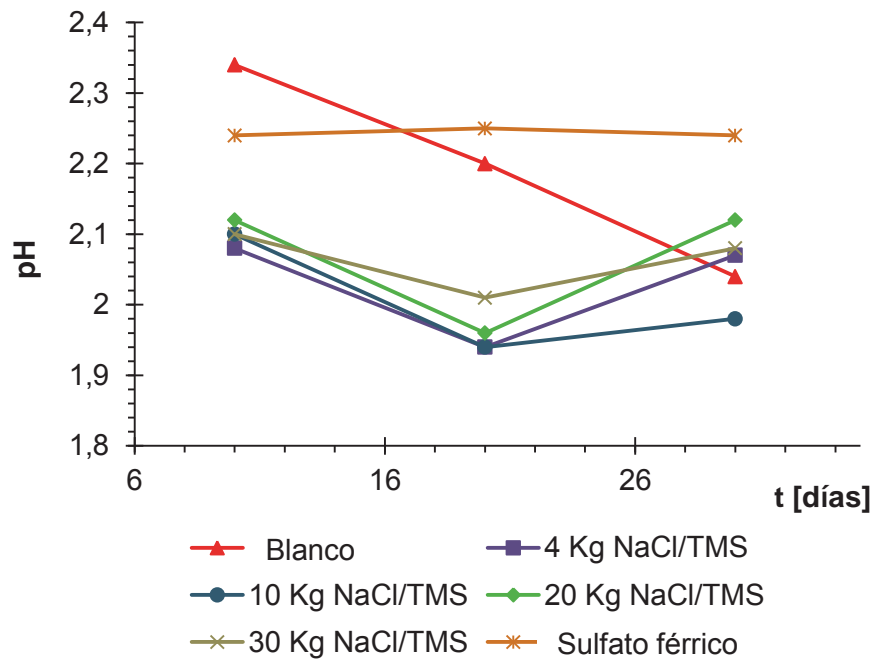


Gráfico 8 pH aglomeración ARC 6

El gráfico 9 se observa el efecto de la sal en los minerales sulfurados, el cual tiene un comportamiento similar a los minerales oxidados, no obstante la muestra que contiene sulfato férrico reacciona con el cloro formando FeCl_3 el que actúa como agente lixiviante.^[20]

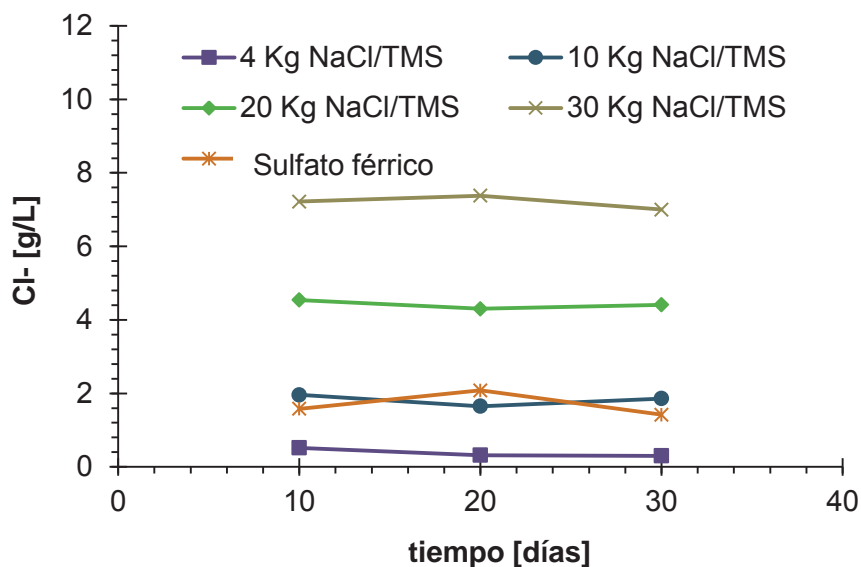


Gráfico 9 Concentración Cl^- g/L en solución, aglomeración de minerales sulfurados, ARC 6. Sistema en medio ácido a 25°C y Presión atmosférica.

Al contrario de lo que se observó en los minerales oxidados, la sal aumenta la recuperación de cobre donde la muestra en blanco que sólo contiene ácido sulfúrico posee una cantidad de cobre en solución constante luego de 30 días, comportamiento típico en minerales sulfurados de cobre atacados con ácido sulfúrico, el cual solo forma ácido sulfhídrico H_2S , sin embargo la cantidad de Cu^{+2} g/L en solución se incrementa a medida que aumenta la dosis de cloruro de sodio agregada en la etapa de aglomeración.

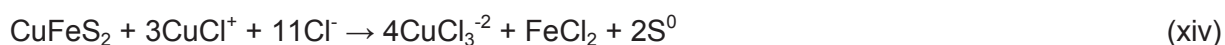
Los mejores resultados se aprecian en las muestras de minerales sulfurados que contienen 4-10-20 Kg NaCl/TMS, además de la muestra que contienen cloruro de sodio y sulfato férrico logrando una diferencia de 0,33 g/L entre las muestras que contienen 10 Kg/TMS NaCl y las que contienen NaCl y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ por un periodo de 20 días.

En el caso de los minerales sulfurados la ocurrencia de las reacciones es mas compleja y necesita de un agente lixivante para lograr la extracción del metal deseado, en el caso de la covelina la reacción ocurre de la siguiente manera:



$$\Delta G_{\text{RXN}} = \Delta G^0 + 2,303 \cdot RT(\log[\text{Cu}^{+2}] + 2\log[\text{Fe}^{+2}] - 2\log[\text{Fe}^{+3}])$$

Para que ocurra la reacción el valor de la concentración del ión férrico debe ser alta, sin embargo las reacciones son catalizadas mediante cloro y férrico según las siguientes reacciones:



La calcopirita puede ser lixiviada de varias formas, por lo que la mezcla que tiene sal y sulfato férrico es la mas beneficiosa ya que el mineral sulfurado es recuperado no solo por el cloro sino que por el férrico y su complejo FeCl_3 que predomina en el rango de Eh-pH que se obtuvo.

Además la pirita FeS_2 que esta presente en gran medida en los minerales sulfurados es lixiviado por el ión férrico, el CuCl_2 formando protones los que mantienen ácido el sistema manteniendo estable el cobre en solución

La reacción de la pirita en medio férrico y clorurado es:



A simple vista se observó la influencia que tiene el cloruro de sodio y el sulfato férrico en la aglomeración de minerales oxidados y sulfurados, sin embargo, es necesario confirmar que el comportamiento es correcto en cada una de las pruebas, por este motivo se realizó un análisis de varianzas, demostrando que todos los análisis tienen inferencia sobre la concentración de cobre liberado.

Dosis de reactivo		[Cu ⁺²] g/L		
[Kg NaCl/TMS]	t [días]	5	10	15
White		0,76	1,1	1,14
4		0,78	1,14	0,82
8		0,77	1,08	0,84
10		0,83	1,04	1,04
20		0,84	1,04	1,06

Tabla 11 Influencia del cloruro de sodio en la concentración de Cu⁺² g/L a diferentes periodos de tiempo.

Con el objetivo de ver el efecto que tiene la sal en la aglomeración de cobre tomaremos las siguientes hipótesis:

H₀: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$ (la dosis de sal no influye en la aglomeración de ARC 9)

H₁: al menos existe un $\mu \neq 0$

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	f calculada
tratamiento	0,024	4	0,006	0,681
bloques	0,207	2	0,1035	
error	0,071	8	0,0088	
Total	0,302	14		

Tabla 12 Resumen análisis de varianzas aglomeración de minerales oxidados en medio ácido y clorurado

dado que:

$$f_{\text{calculado}} > f_{\text{tabla}}$$

se rechaza la hipótesis nula H₀, indicando así que las distintas dosis de cloruro de sodio influyen en la recuperación de cobre durante la aglomeración de minerales oxidados.

5.5 Análisis aglomeración de mezclas artificiales

Los mejores resultados obtenidos en la aglomeración de minerales sulfurados y oxidados (4-10-20 Kg NaCl/TMS y 10 Kg NaCl/TMS junto a 5 Kg $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) fueron aplicados a mezclas artificiales, es decir mezclas proporcionales entre ARC 6 y ARC 9, Anexo A-2.

Las mezclas correspondientes al blanco (mineral que contienen solo 10 Kg $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{TMS}$) tienen el menor porcentaje de recuperación de cobre debido a que el mineral sulfurado no se lixivia con facilidad, esto se aprecia en el hecho de que las razones de solubilidad menores contienen una mayor cantidad de mineral sulfurado y por ende el porcentaje de sulfatación es menor, al agregar cloruro de sodio el porcentaje de sulfatación aumenta aunque sólo hasta 10 Kg NaCl/TMS, más allá de este valor la extracción no justifica el valor económico asociado, en el caso de las mezclas que contienen el ión Fe^{+3} el porcentaje de sulfatación se escapa, obteniendo porcentajes de hasta un 62,8% muy por el contrario del blanco y de las muestras que contienen 10 Kg NaCl/TMS siendo sus mayores valores 27,01% y 33,14%, respectivamente.

En el **gráfico 11** se aprecia la concentración de Cu^{+2} g/L en función de la razón de solubilidad.

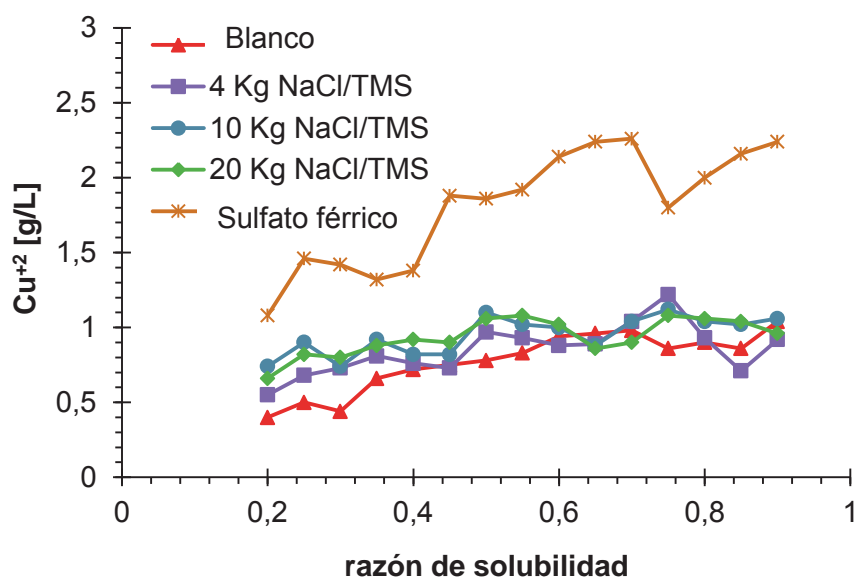


Gráfico 10 Concentración de Cu^{+2} g/L. Aglomeración de mezclas artificiales Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

La concentración de Cu^{+2} g/L cual tiende a aumentar a medida que aumenta la proporción de mineral oxidado, en el caso del blanco esto es correcto debido a que va aumentando la cantidad de mineral oxidado, lo cual hace más fácil la lixiviación con ácido sulfúrico, a medida que se aumenta la dosis de cloruro de sodio también lo hace la concentración de cobre, sin embargo la cantidad de sal agregada disminuye la concentración de cobre a medida que aumenta la razón de solubilidad o mejor dicho la cantidad de mineral oxidado aumenta, esto demuestra el comportamiento previamente visto en la aglomeración de minerales oxidados sin incurrir al mezclamiento

Al analizar el gráfico 12 y 13 se puede ver la influencia del pH y potencial en la aglomeración de las MA, por ejemplo para la razón de solubilidad 0,75 en la muestra con sulfato férrico el cobre en solución es de 0,86 g/L, esta disminución se explica por el aumento de pH alejándose del campo de estabilidad del Cu^{+2} g/L.

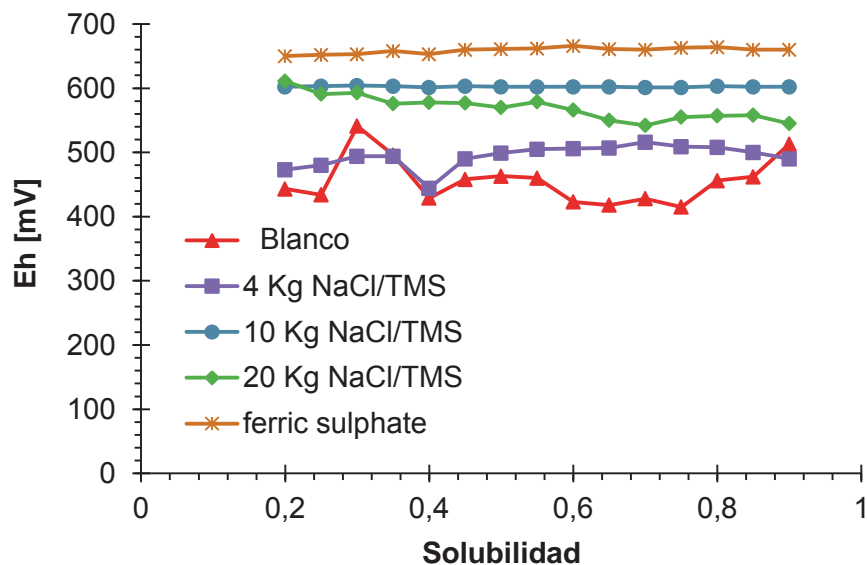


Gráfico 11 Eh mV. Aglomeración de mezclas artificiales Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

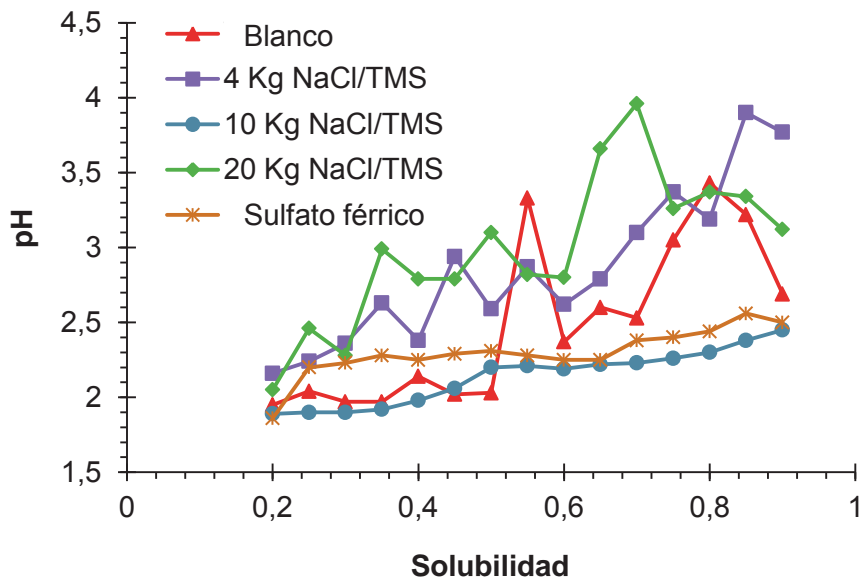


Gráfico 12 pH. Aglomeración de mezclas artificiales Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

5.5.1 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS

Los valores de Eh y pH aumentan en comparación con el blanco, al igual que la cantidad de cloro libre, la formación de complejos suele ser mayor en los minerales sulfurados, es decir, a menores Rs la cantidad de cloro es menor.

Los valores de Eh van aumentando a medida que aumenta la razón de solubilidad, tal como muestra el gráfico 12, al igual que aumenta el valor de pH, esto se debe a que aumenta la proporción de óxidos, volviendo más básica la solución.

La cantidad de Fe^{+3} libre disminuye rápidamente hasta llegar a 0,07 g/L, como la razón de solubilidad 0,9 tiene solo una pequeña cantidad de sulfuros, la concentración de férrico no es muy elevada.

El cloro libre aumenta gradualmente con la razón de solubilidad, el cloro forma complejos con el azufre elemental generado por las reacciones de ácido sulfúrico y mineral sulfurado, y la cantidad de cloro tiende a disminuir a medida que no hay minerales sulfurados.

Las pruebas realizadas a MA con 4 Kg NaCl/TMS alcanzan su máximo porcentaje de sulfatación en las Rs 0,3 y 0,75, cuyos valores son 24,03 y 32,5%, respectivamente.

Al comparar con el Blanco (muestra solo con ácido sulfúrico) la dosis de sal aumentan la sulfatación en 9,55 y 9,59% respectivamente, ahora queda comparar estos resultados con las demás dosis de sal y la prueba que contiene férrico.

5.5.2 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS

En el gráfico 11 se observa que la cantidad de cobre en solución es mayor a la anterior y aumenta a medida que se incrementa la proporción de óxidos, el problema sigue siendo las Rs menores, ya que contienen el mineral que es difícil de lixiviar.

Al igual que en la prueba anterior el pH aumenta al aumentar el mineral oxidado, no obstante el Eh tiene un comportamiento muy variable, esto se refleja en la concentración de cobre obtenida que también varía bastante, debido a que la estabilidad del cobre según el diagrama de Pourbaix se mueve constantemente.

La concentración de Hierro libre disminuye igual que en las pruebas anteriores, lo cual es esperable, sin embargo la concentración de cloro libre se mantiene estable, sufre un pequeño aumento al final, lo que comprueba que sigue la tendencia de los minerales sulfurados a acomplejarse con el cloro.

Al comparar esta prueba con la de 4 Kg NaCl/TMS se lograron mejores resultados en la sulfatación, alcanzando un 7,4% de diferencia y con el blanco un 13,45% a una Rs de 0,25, a mayores Rs no hay un cambio apreciable, esto sigue demostrando que la sal no afecta en mayor medida a los minerales oxidados.

5.5.3 Aglomeración MA 20 Kg NaCl/TMS

Los valores de sulfatación son menores que los que se obtuvieron en la prueba anterior, la máxima diferencia tiene un valor de 3,15% en la razón de solubilidad (Rs): 0,4, y al hacer una comparación con el Blanco se obtuvo una diferencia de 11,85% en la Rs: 0,3.

A pesar que la cantidad de Cu^{+2} g/L en solución aumenta, esta dosis de sal resulta ser inservible, ya que con una dosis de 10 Kg NaCl/TMS se obtienen mejores resultados.

El potencial disminuye a medida que aumenta la Rs, al igual que el pH, por lo que se aleja de la zona de estabilidad del cobre, disminuyendo así la concentración de Cobre.

El cloro libre tiene un compartimiento muy variable por la cantidad de sal agregada, siendo negativo en la recuperación de cobre.

Podemos decir que la sal en exceso tiene un efecto negativo en la aglomeración, disminuyendo la sulfatación y extracción de cobre.

5.5.4 Aglomeración MA 10 Kg NaCl /TMS y 5 Kg Fe₂(SO₄)₃/TMS

Al igual que las muestras de ARC 6 con férrico, las mezclas artificiales muestran un excelente comportamiento frente a este reactivo, llegando a valores de 2,26 g/L de Cu⁺² en comparación con el blanco cuyo máximo valor es de 1,04 g/L.

La sulfatación llegó a un máximo valor de 62,8% para una Rs de 0,65, existiendo una diferencia muy grande con el blanco que en esta Rs tiene un valor de 26,91%

Los valores de potencial son muy diferentes a los de las pruebas anteriores, ya que están sobre los 600 mV, al igual que los valores de pH que son bajos y sólo aumentan al acercarse a los minerales oxidados, o sea, razones de solubilidad elevadas.

Podemos concluir que esta prueba es la mejor, ya que no solo aumenta la sulfatación sino que aumenta el campo de estabilidad del cobre, lo que hace más fácil su solubilidad.

Los resultados de la aglomeración de las mezclas artificiales corroboran lo obtenido en las muestras anteriores de manera individual, en el gráfico 11 se puede apreciar la mayor concentración de cobre que se obtuvo en las muestras que contienen sulfato férrico, cuyos valores son bastante mas altos que las muestras que carecen de este reactivo, alcanzando valores de hasta 2,26 g/L, sin embargo en la razón de solubilidad 0,7 la concentración de cobre disminuye y vuelve a aumentar paulatinamente, esto se debe a la mayor cantidad de mineral oxidado consumiendo el reactivo lixivante alterando así extracción de cobre de la solución.

5.6 Análisis lixiviación en columnas

Las columnas de aproximadamente 50 Kg c/u corresponden a las mejores condiciones aglomeradas (Blanco, 10-20 Kg NaCl/TMS, 10 KgNaCl/TMS junto a sulfato férrico) con un tiempo de reposo de 20 días

Además se montaron cuatro columnas de 25 cm c/u, estas se montaron en serie emulando la columna correspondiente a la mejor condición, Columna Ceres.

Se seleccionó la razón de solubilidad 0,6 debido a los porcentajes de sulfatación obtenido en todas las pruebas, además de su mayor contenido de minerales sulfurados.

Las columnas fueron rotuladas como Hygeia, Vesta, Pallas y Ceres, los nombres tienen su origen en Asteroides, cuya analogía es entre el diámetro de cada uno y la calidad de la condición seleccionada.

La columna Ceres corresponde a la mejor condición obtenida durante la aglomeración de Mezclas Artificiales, esta columna contiene 10 Kg/TMS de ácido sulfúrico, 10 Kg NaCl/TMS y 5 Kg $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ /TMS.

El curado ácido aplicado a las mezclas logra la reacción anticipada de las especies oxidadas de cobre, incluso las mas refractarias, para transformarlas en sulfato de cobre, además neutraliza las gangas y reduce el consumo de ácido en la lixiviación, además permite la evacuación de gases producto de las reacciones favoreciendo la percolación de la solución lixivante.

Una de las razones de la elevada cinética de la columna Ceres se debe a la oxidación de la pirita que contiene el mineral ARC 6, ya que este forma sulfato férrico y ácido sulfúrico según las siguientes reacciones:



El ácido generado ayuda a la lixiviación de la especie de interés, el sulfato férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver minerales sulfurados, en el caso de la calcopirita tenemos la siguiente reacción:



El caso de la calcosina es especial, ya que tiene productos intermedios como la digenita, pero es la covelita que tiene una cinética de lixiviación lenta, las reacciones que describen el proceso son:



$$\Delta G_{\text{RXN}} = \Delta G^\circ + 2,303 \cdot RT(2\log[\text{Cu}^{+2}] \cdot [\text{Fe}^{+2}] - 2\log[\text{Fe}^{+3}])$$

A medida que penetra la solución reactante, se consume el hierro y el cobre, pero mientras progresa la reacción hacia el interior sube el pH y baja el potencial desestabilizando el ión férrico, pero la reacción sigue con H^+ , sin embargo al subir el pH de 3 a 4 es el cobre que cesa de reaccionar y el ión ferroso continua estable y siguen disolviéndose las especies de hierro restantes hacia el interior de la partícula.

Estos fenómenos explican porque el mineral sulfurado en presencia de sulfato férrico aumenta su recuperación de cobre, las columnas siguieron un comportamiento parabólico y según el modelo del núcleo recesivo, Anexo F está controlado por difusión o sea la capacidad que tiene la solución de penetrar el interior de la partícula mineral, como la mezcla tienen una mayor cantidad de mineral sulfurado este fenómeno depende en gran medida de la percolación y el tamaño de partícula que en nuestro caso se mantuvo constante.

5.6.1 Lixiviación columna Ceres

La columna Ceres corresponde a la mejor condición, que contiene 10 Kg NaCl/TMS, 5 Kg $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y ácido sulfúrico, esta columna estuvo en operación durante 61 días con una tasa de riego promedio de 3,2 L/hm², el consumo total de refino fue de 192,48 L, con el cual se obtuvieron 206,77 L de PLS.

Los principales problemas que se presentaron fueron los flujos de PLS y refino, los cuales fueron variables debido a la bomba peristáltica que tenía problemas para generar el empuje del líquido, sin embargo al iniciar el riego la columna se humedeció de forma homogénea.

La columna reventó alcanzando una concentración de Cu^{+2} g/L en el PLS de 16,5 g/L, el líquido tenía un color verde muy oscuro, debido a la alta concentración de cobre. Luego de 61 días, el 1 de Noviembre se paró la bomba que alimentaba la columna con refino, el último valor de concentración de cobre registrado en el PLS fue de 1 g/L.

La cantidad de Cu^{+2} g/L en solución no registró grandes variaciones en la concentración durante la lixiviación, diferente a lo sucedido con el Eh y Ph, los que tuvieron un comportamiento variable, como muestra el gráfico 15 y 16.

5.6.2 Lixiviación Columna Pallas

Esta columna corresponde a una dosis de sal de 20 Kg/TMS, aunque la lixiviación obtuvo elevados valores de concentración alcanzando una recuperación del 61,94%, no se justifica ya que con 10 Kg NaCl/TMS se obtienen recuperaciones del mismo orden.

El volumen de PLS generado durante la lixiviación fue de 87,55 L, utilizando 98,97 L de refino. Al igual que la columna Ceres el flujo tanto de PLS como de refino fueron variables, con una tasa de refino de 3,2 L/hm², Además se tuvo una compactación de la columna de 6 cm de alto.

La cantidad de cobre en solución luego de que la columna reventó fue de 19,7 g/L, esta columna se mantuvo siempre en concentraciones sobre 1 g/L, pero presentó un comportamiento errático en el potencial y pH, la cantidad de hierro libre disminuye y luego sube, lo cual se debe a la variación de la proporción de mineral oxidado

5.6.3 Lixiviación Columna Vesta

La columna Vesta que contiene 10 Kg NaCl/TMS, reventó el día 11 de Octubre obteniendo un valor de 32,2 g/L de Cu^{+2} , el potencial de esta columna es alto pero variable, y tiene los valores de pH más bajos, al contrario de lo que paso en el resto de las columnas el pH disminuye a medida que transcurre el tiempo favoreciendo la extracción, debido al aumento del campo de estabilidad del Cobre. La tasa de riego promedio de refino fue de 3,1 L/hm², alcanzando una recuperación de cobre del 61,05%.

5.6.4 Lixiviación Columna Hygeia

La Columna Hygeia corresponde a la muestra en blanco que solo contiene 10 Kg/TMS de ácido sulfúrico, esta columna generó 130,45 L de PLS, consumiendo 152,7 L de refino, y obtuvo una compactación de solo 2,5 cm.

La columna reventó el día 11 de Octubre obteniendo 21,9 g/L de Cu^{+2} , a pesar de que los valores de potencial son altos y el pH bajo, la recuperación no es alta, ya que es necesario un oxidante para que ocurra la reacción, la tasa de riego promedio fue de 4,5 L/hm², alcanzando una recuperación de cobre del 55,31%.

5.6.5 Cinética de lixiviación columnas

Al comparar las cinéticas de todas las columnas en el gráfico 14, se puede ver que los resultados obtenidos son los esperados, la Columna Hygeia que corresponde al Blanco, obtiene un 55,31% de recuperación por un periodo de lixiviación de 40 días.

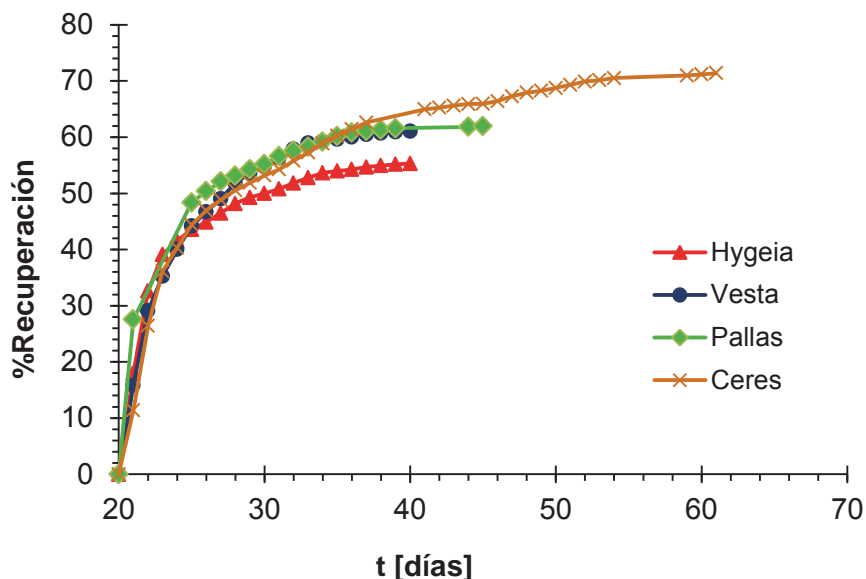


Gráfico 13 %Recuperación de cobre. Lixiviación columnas Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

La Columna Vesta que tiene 10 Kg NaCl/TMS alcanzó un 61,05% de recuperación en el mismo periodo de tiempo que la columna Hygeia.

La Columna Pallas aglomerada con 20 Kg NaCl/TMS, obtuvo un 61,94% de recuperación. La mejor condición, la Columna Ceres obtuvo la mayor recuperación de cobre, con 71,4% de recuperación luego de 61 días de riego.

Las cinéticas son las esperadas, luego del análisis hecho en la aglomeración, sin embargo la columna Pallas tiene una recuperación pobre en comparación a la columna Vesta, por lo cual esta dosis de sal no resulta atractiva económicamente.

El gráfico 15 muestra el potencial en función del tiempo de cada columna durante el periodo de lixiviación de cada una, la columna Hygeia que tuvo la menor recuperación posee potenciales bajos y se aleja del campo de estabilidad del Cu^{+2} en solución, pero se incrementa a medida que transcurre el tiempo, ya que se lixivia el mineral oxidado y no el sulfurado, las demás columnas poseen altos valores de potencial y valores de pH bajos, gráfico 16, favoreciendo la extracción de cobre.

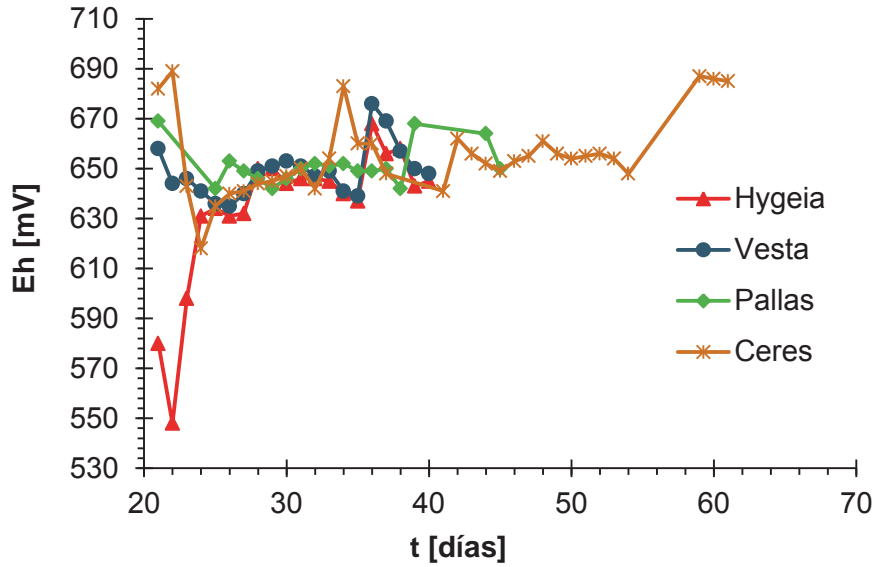


Gráfico 14 Eh mV. Lixiviación columnas
Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

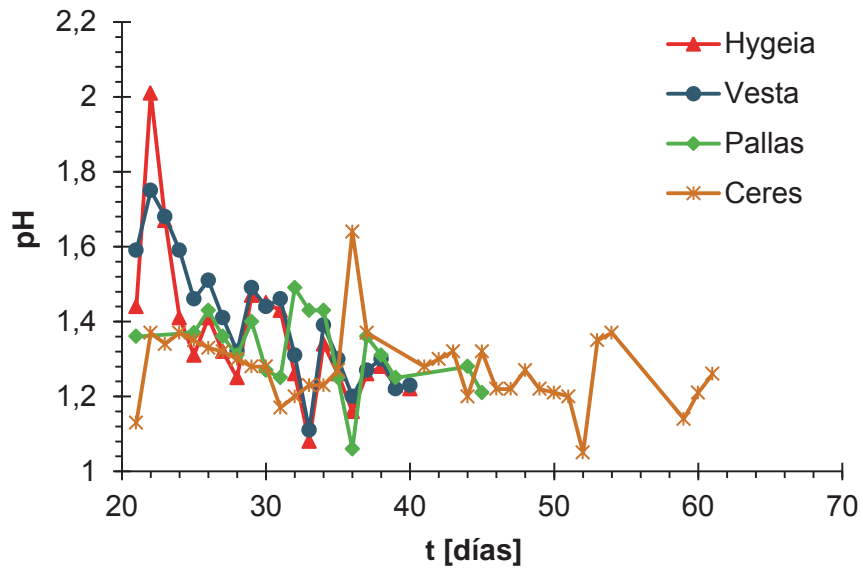


Gráfico 15 pH. Lixiviación columnas
Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

El gráfico 17 muestra la concentración de cloro libre en función del tiempo, donde la concentración es menor en la columna Ceres debido a la formación de FeCl_3 , y a la reacción con azufre elemental.

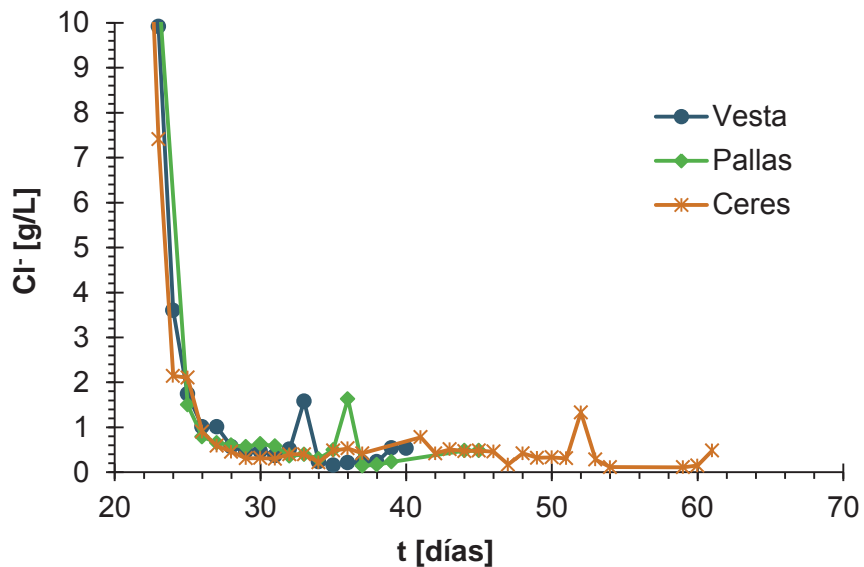


Gráfico 16 Concentración de Cl^- g/L. Lixiviación columnas Sistema en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

5.7 Análisis lixiviación columna Ceres en serie

La columna Ceres corresponde a la mejor condición obtenida en función de la concentración de cobre obtenida y el tiempo de lixiviación, como consecuencia de esto y como una manera de recolectar más información de esta columna, fue registrar lo ocurrido en cada sección de la columna, o sea, que sucede con la permeabilidad del lecho, para ello se montaron cuatro columnas de 25 cm c/u, bajo las mismas condiciones de la columna Ceres de un metro, eso si adaptando el balance de masa a una columna con menor altura, todo esto con el fin de emular el comportamiento, las 4 mini columnas se dispusieron en serie y fueron rotuladas de izquierda a derecha como columna Ceres A, B, C y D, tal como muestra la figura 4.6.2

La tabla 5.6.1 detalla el resumen de los resultados del análisis de líquidos que se obtuvo en cada columna o sección durante el periodo de lixiviación, el volumen de refino consumido y el PLS generado, además de la cantidad de cobre recuperado por sección.

Columna	Ceres A	Ceres B	Ceres C	Ceres D
t riego [días]	37	31	36	39
Consumo refino/PLS (n-1) [L]	121,16	41,04	44,79	34,96
Producción PLS [L]	116,64	33,63	40,78	33,86
Recuperación [%]	61,65	78,8	73,46	76,17

Tabla 13 Resumen resultado análisis de líquidos columna Ceres en serie

El gráfico 18 muestra la comparación entre la concentración de cobre que se obtuvo por sección, donde se puede apreciar que la primera sección tiene valores de Cu^{+2} g/L bajos en contraste a lo ocurrido con las demás secciones, junto a la menor acidez explica el menor valor obtenido en la recuperación de esta sección alcanzando solo el 61,65%.

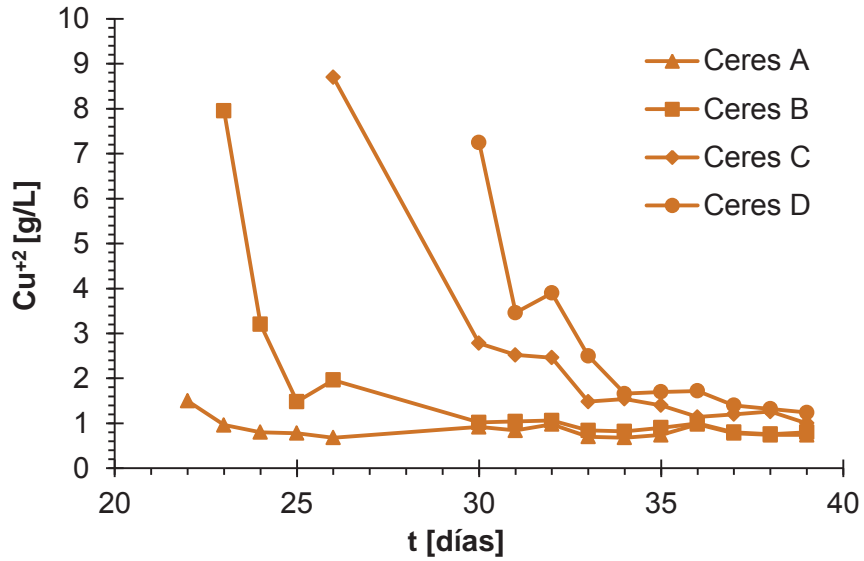


Gráfico 17 Concentración de Cu^{+2} [g/L] en solución, columna Ceres en serie ABCD. Sistema a 25°C y presión atmosférica.

Debido a la variabilidad de datos que entrega la concentración de cobre y como una manera de ordenar los resultados obtenidos en la concentración de cobre se realizó un boxplot, gráfico 19, donde muestra el contraste que existe en la concentración de cobre, a medida que avanza la solución y por ende la sección los valores de Cu^{+2} g/L también aumentan, sin embargo esto podría significar que el PLS tiene un efecto más lixivante que el refino o la mayor cantidad de pirita que se disuelve en medio ácido formando sulfato férrico, ya que hay una brecha entre la concentración de cobre en la sección A y las demás.

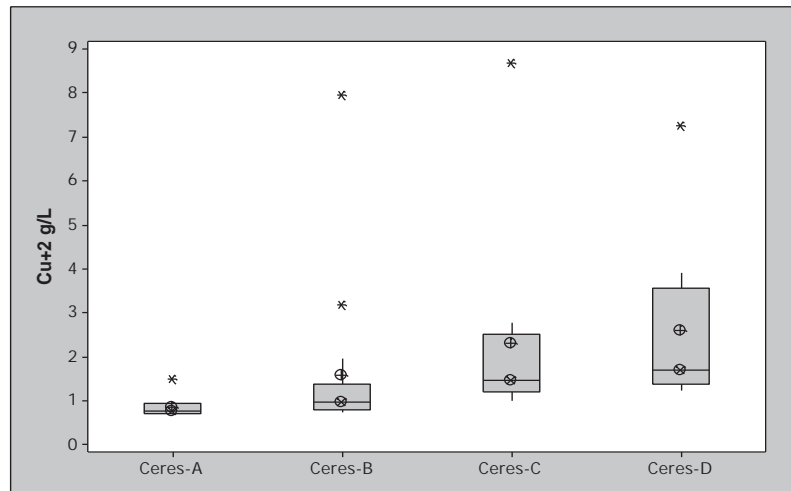


Gráfico 18 Boxplot Cu^{+2} [g/L] columna Ceres en serie ABCD.

El valor de potencial y el pH determinan el campo de estabilidad del Cu^{+2} g/L en solución, en el caso de la columna Ceres en serie estos valores fluctúan mucho, no obstante los valores de potencial de las 4 columnas se encuentran por sobre 640 mV tal como muestra el gráfico 20, y con valores de pH bajo 2, esto explica porque se obtienen tan buenos resultados en la lixiviación con sulfato férrico y cloruro de sodio, junto a la refeneración de sulfato férrico debido a la disolución de pirita.

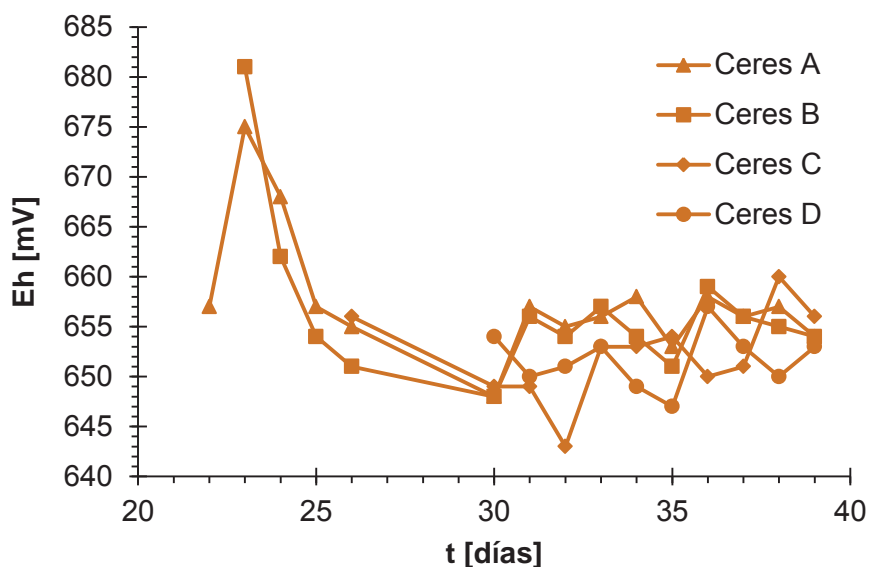


Gráfico 19 Eh [mV] de la solución, columna Ceres en serie ABCD.

Sistema a 25°C y presión atmosférica.

A pesar de que la recuperación de cobre aumenta considerablemente en las columnas que contienen sulfato férrico y sal, muy por encima de la columna Hygeia con una diferencia del 16,09% en comparación a la columna Ceres, el precio de estos reactivos es muy elevado para considerarlos una opción, la única alternativa es que el precio del cobre aumente y se encuentre estable para considerar el proyecto.

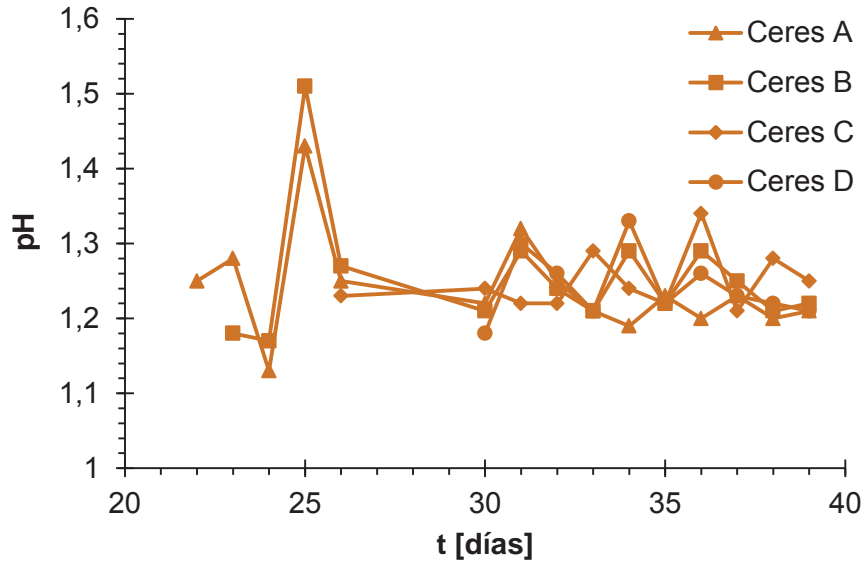


Gráfico 20 pH de la solución, columna Ceres en serie ABCD.
Sistema a 25°C y presión atmosférica.

El gráfico 22 muestra la concentración de cloro en función del tiempo de cada sección de columna, cuya concentración disminuye a medida que van surgiendo las reacciones químicas propias del proceso, el hecho de agregar cloruro de sodio acelera la cinética de extracción de los minerales sulfurados lo que es beneficioso.

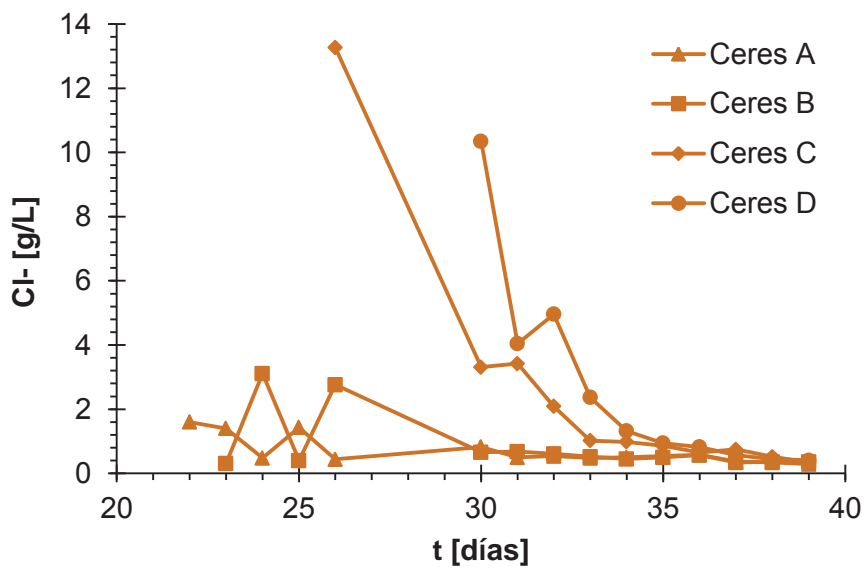


Gráfico 21 Concentración de Cl⁻ [g/L] en solución, columna Ceres en serie ABCD.
Sistema a 25°C y presión atmosférica.

Finalmente al comparar la concentración de cobre en el tiempo, como era de esperar esta aumenta considerablemente, donde la recuperación mas alta corresponde a la columna Ceres B con un valor de 78,8%, como se vio anteriormente el PLS parece ser un mejor lixivante que el refino debido a su elevada acidez y a la acumulación de cobre en solución.

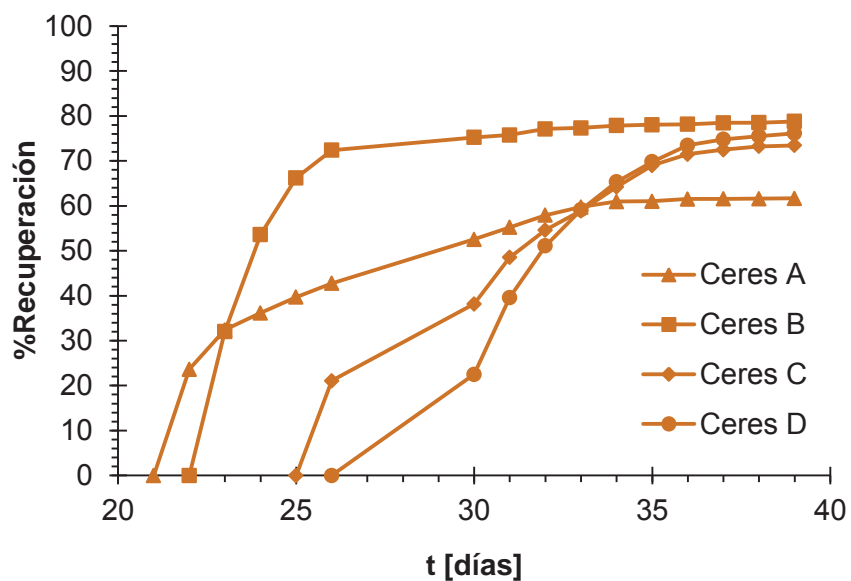


Gráfico 22 Recuperación columna Ceres en serie ABCD.

Sistema a 25°C y presión atmosférica

5.8 Lixiviación Agitada

Una manera de respaldar los resultados obtenidos por las columnas es realizar una prueba de lixiviación agitada, lo que permite corroborar la cinética de extracción del Cobre, para esto se pulverizaron dos muestras de 2 Kg c/u de la mezcla entre ARC 6 y ARC 9, -#100, a una muestra se le adicionó sal y férrico, mientras que la otra se dejó en blanco (sólo con ácido sulfúrico).

La lixiviación se realizó durante seis horas y media, donde se obtuvieron 12 muestras. El gráfico 24 muestra el cobre recuperado en función del tiempo donde se obtuvo sobre un 72% de recuperación, similar a lo obtenido en la columna Ceres, la columna Hygeia obtuvo una recuperación sobre el 50% al igual que la lixiviación agitada.

Estos resultados nos permiten verificar los resultados obtenidos en las Columnas de un metro, dando la seguridad de que el trabajo previo fue bien hecho.

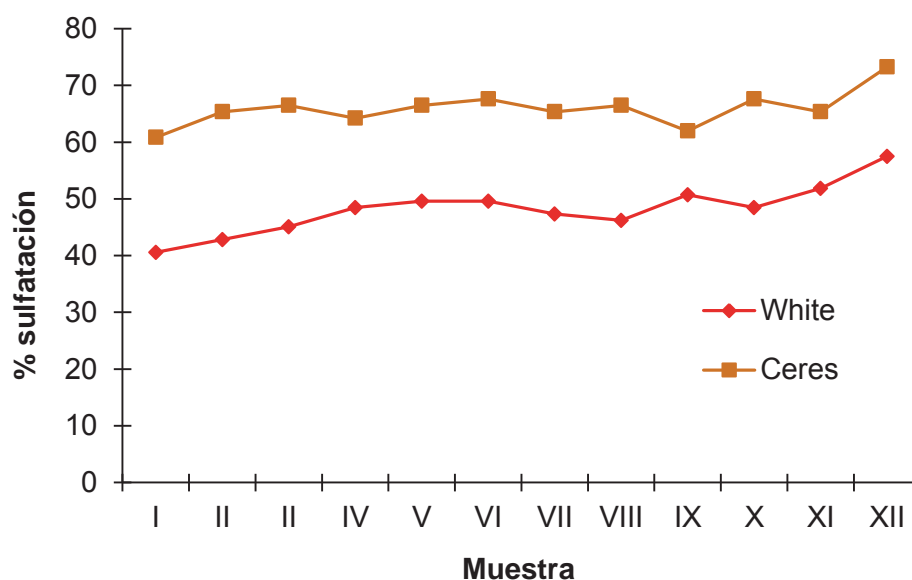


Gráfico 23 Cinética de extracción lixiviación agitada columna Ceres

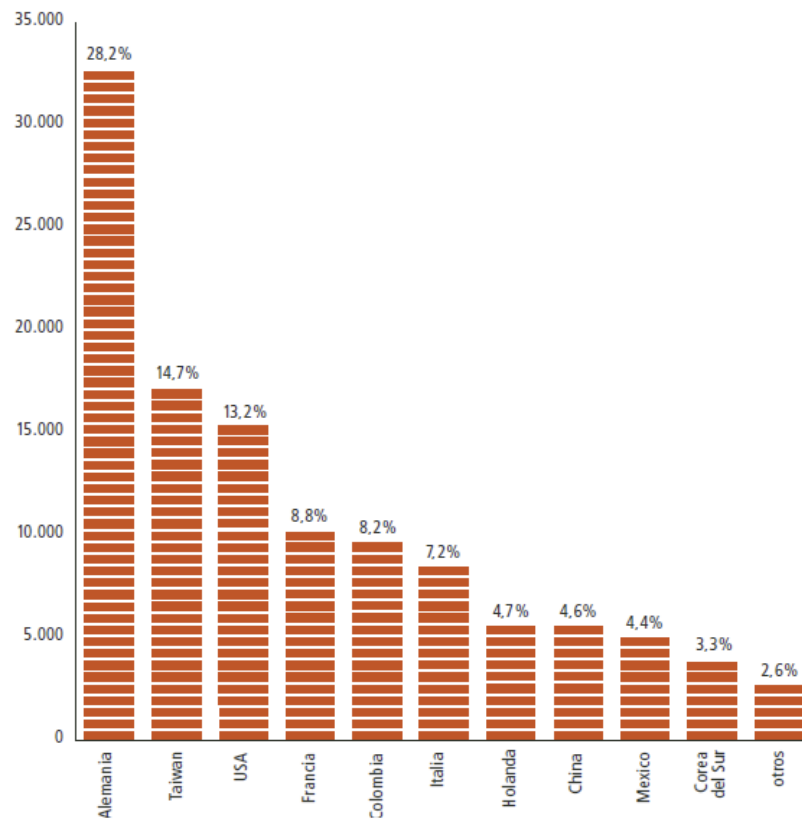
6. ANÁLISIS ECONÓMICO

El presente trabajo entrega excelentes resultados en cuanto a recuperación y cinética de extracción de minerales oxidados y sulfurados mediante la creación de mezclas artificiales, sin embargo es necesario resaltar la importancia económica del uso de reactivos, específicamente sulfato férrico pentahidratado y cloruro de sodio en el costo de producción de cátodos mediante el procesos de electro-obtención.

A continuación se detalla los principales ingresos, gastos y excedentes de un año normal en comparación al costo económico asociado al uso de reactivos aceleradores de reacciones químicas.

Los Ingresos por venta durante un año normal ascienden a US\$810 millones, considerando un precio de cobre de 3,2 US\$/lb, con una venta de 115.135 toneladas de cátodos al año.

Los principales destinos geográficos de ventas son:



Los costos directos de bienes tangibles y servicios ascienden a US\$80 millones, dentro de los cuales se encuentran:

Ítem de costos	MUS\$
Combustibles y lubricantes	27.238
Ácido sulfúrico	17.744
Energía	17.161
Repuestos	12.765
Otros	5.462
TOTAL	80.370

Los gastos salariales ascienden a US\$46 millones, dentro de los cuales se incluyen entre otros las inversiones en capacitación, programa de graduados y las compensaciones por concepto de: salarios, bonos varios, gratificaciones, incentivos por el cumplimiento de metas, reembolsos médicos, becas escolares, deportes y viajes.

En cuanto a contratistas la suma total es de US\$66 millones por concepto de servicios.

La CMCC tiene un total de 752 empleados directos y 1812 contratistas.

El total de impuestos devengados es de US\$119 millones, los que incluyen royalty y el impuesto a la renta, con un total de MUS\$198.831.

Debido a la naturaleza de las operaciones y principales destinos de la producción (hacia el exterior), mensualmente se generan créditos fiscales por concepto de impuesto al valor agregado (IVA).

Impuestos devengados MUS\$119.366

Se realizan aportes a la comunidad, mediante acciones con el fin de proteger y salvaguardar el medio ambiente siguiendo la línea de sustentabilidad de la empresa, monitoreando continuamente temas sensibles, el aporte total a la comunidad y medio ambiente es de \$3.130

Existe un monto retenido en la empresa correspondiente a aquellos dineros que no se distribuyen a algún grupo de interés y se mantienen en la empresa con la finalidad de dar

continuidad a nuestras operaciones, esto incluye las partidas que prevén la reposición o mantenimiento de la capacidad productora al igual que del capital o de su valor social y las utilidades retenidas de la empresa no distribuidas.

Total retenido en la empresa MUS\$495.673

Haciendo el balance de un año normal se obtiene:

	MUS\$	%
Ventas	810.399	100
Costos de bienes tangibles y servicios		
- Costos nacionales	68.315	8,4
- Costos internacionales	12.055	1,5
Subtotal	80.370	9,9
Valor agregado generado	730.029	90,1
Empleados	45.934	6,3
Contratistas	65.926	9,0
Estado	119.366	16,4
Propietarios	0	0,0
Comunidad y medio ambiente	3.130	0,4
Retenido en la empresa	495.673	67,9
Financistas	0	0,0
Valor agregado distribuido	730.023	100

Ahora bien, el costo asociado a los reactivos tiene un valor de NaCl 1,1 US\$/Kg y $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2,0 US\$/Kg.

La planta procesa diariamente 55 KTPD, sabiendo que las dosis de NaCl y sulfato férrico son 10 y 5 Kg/TMS obtenemos:

$$55000 \frac{\text{TMS}}{\text{día}} \cdot 1,1 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg}} \cdot 10 \frac{\text{Kg NaCl}}{\text{TMS}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

$$55000 \frac{\text{TMS}}{\text{día}} \cdot 2 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg}} \cdot 5 \frac{\text{Kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}{\text{TMS}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}}$$

Un costo en reactivos de:

NaCl MUS\$ 220

Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·5H ₂ O	MUS\$ 200
--	-----------

Sin embargo la cinética de extracción disminuye de 480 días a 61 días de riego efectivo, aumentando la eficiencia en 7,9 veces, esto logra obtener una producción de 908.500 toneladas de cátodos al año

Al comparar el costo operacional actual y del reactivo obtenemos:

$$C_{Op} \text{ Actual} = \frac{314.726 \frac{\text{MUS\$}}{\text{año}}}{115.000 \frac{\text{ton}}{\text{año}}} = 2,7 \frac{\text{MUS\$}}{\text{ton}}$$

$$C_{Op} \text{ Nuevo} = \frac{314.726 + 440.000 \frac{\text{MUS\$}}{\text{año}}}{908.000 \frac{\text{ton}}{\text{año}}} = 0,83 \frac{\text{MUS\$}}{\text{ton}}$$

Por lo tanto mediante el uso de reactivos que aumentan la cinética se obtiene una disminución en el costo de producción aumentando la producción.

7. CONCLUSIONES

El resultado obtenido en la aglomeración de minerales oxidados con NaCl indica que este reactivo no tiene una mayor influencia en la sulfatación de este tipo de material, sin embargo luego de haber comparado una prueba en blanco con diferentes pruebas a distintas condiciones de NaCl, se observó que las partículas finas no se adhieren con tanta fuerza en las muestras que no contenían sal mientras que aquellas que si poseían este reactivo mostraban una notable adherencia de los finos a las partículas gruesas, debido a esto puede resultar beneficioso adicionar una pequeña dosis de sal a este tipo de mineral con el objetivo de no perder finos.

Muy por el contrario a lo sucedido con los minerales oxidados, ARC 9, la sal tiene una influencia significativa en la aglomeración de minerales sulfurados, ARC 6, llegando a una diferencia de 12,2 puntos de sulfatación comparado con la prueba sin sal de este mismo mineral por un periodo de 20 días, en cambio el mineral ARC 9 sólo muestra una diferencia de 0,8 puntos respecto al blanco de este mismo mineral con un tiempo de reposo de 10 días. Al utilizar Fe^{+3} en la aglomeración se ve un importante incremento en la sulfatación del mineral ARC 6, debido a que este actúa como un oxidante aumentando la cinética de extracción de los minerales sulfurados. Se observó una diferencia de 11,8 puntos entre la prueba que contenía sólo sal y la que contiene $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 5H_2O$.

7.1 Análisis comparativo entre Columnas

La Columna Ceres obtuvo una recuperación de Cobre de 71,4%, muy superior a las recuperaciones que se obtiene en la lixiviación en Pilas de la compañía, donde varía de un 50% a 70% dependiendo de la cantidad de sulfuros asociada.

Otra variable es el tiempo el que fue sólo de 61 días entre aglomeración y lixiviación, en comparación con el blanco cuyo procesamiento fue de 54 días donde la recuperación permaneció constante en un 55,31%.

Al realizar el balance de masa a la Columna Ceres se obtuvo una recuperación de casi 100% en los minerales oxidados y de un 43.58% de los minerales sulfurados, cuya MA tiene un 65,75% de sulfuros y un 34,25% de Óxidos.

Al contrastar la Columna Ceres y la misma pero en serie se observó que la primera sección, la Columna Ceres A es la más difícil de lixiviar, debido a que el refino tiene una acidez menor en comparación al PLS que alimenta a cada una de las secciones posteriores, aumentando la estabilidad del Cu^{+2} y del ión Fe^{+3} , esto se puede ratificar al realizar el balance de masa y con el resultado del análisis de sólidos de las columna, el cual indica que para cada una de las columnas, es la primera sección la que tiene la mayor cantidad de Cobre no recuperado.

7.2 Recomendaciones

Tal como se comprobó durante el desarrollo de la Tesis, el trabajo dio excelentes resultados en la lixiviación de minerales sulfurados, a pesar de trabajar a temperatura ambiente, sin embargo está lejos de alcanzar recuperaciones sobre el 90% como la mayoría de los estudios teóricos y bibliográficos muestran, la diferencia radica en que este tipo de pruebas se realiza a elevadas temperaturas y agitando la pulpa.

Se debe seguir investigado la manera de recuperar este tipo de minerales, ya que es una problemática en la industria minera, como recomendación general se deja al estudio, la lixiviación bacteriana de este tipo de minerales, ya sea con mayor cantidad de aire y/o temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Esteban Domic. 2001. Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones. Santiago de Chile: Andros Impresores Limitada.
- [2] Fathi Habashi. 1999. Hidrometalurgy Canadá Quebec: Leight University
- [3] Antonio Ballester. 2000. Metalurgia Extractiva: Fundamentos Volumen I España: Síntesis
- [4] K. Biswas W. G. Davenport. 2000. Extractive Metallurgy of Copper. Pergamon.
- [5] Ellis Horwood Limited. 1986. Hydrometallurgical Extraction and Reclamation. New York: Halsted Press.
- [6] Tomás Vargas y Jesús Casas. 1999. Lixiviación Química y Bacteriana de Minerales de Cobre. Universidad de Chile, Chile.
- [7] Portal Minero. 2005/2006. Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras: Tecnología y Procesos Productivos. Chile.
- [8] Y.K. RAO. 1985. Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes. Londres: Cambridge University Press.
- [9] Perry R.H & D.W. Green. 1997. Perry's Chemical Engineers's Handbook McGraw Hill, USA.
- [10] Incropera. 1985. Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa. Prentice Hall, Mexico, 1999
- [11] A.R. Burkin, 2001. Chemical Hydrometallurgy: Theory and principles. Imperial College Pres Imperial College Press,
- [12] Ph.D María Isabel Lázaro. 2001. Electrochemistry of the Leaching of Chalcopyrite. Western Australia: Murdoch University.
- [13] Ph.D Oscar Benavente. 2000. Hidrometalurgia. Antofagasta: Universidad Católica del Norte
- [14] Ph.D María Cristina Ruiz. 2007. Hidrometalurgia. Concepción: Universidad de Concepción.
- [15] Mari Lundstrom, Doctoral Thesis. 2009. Chalcopyrite dissolution in cupric chloride solutions. Helsinki University of Technology
- [16] Jorge S. Aguad, Héctor D. Jordan, Tomás Vargas, "Lixiviación de Minerales Oxidados de Cobre con Soluciones Acidas de Alta Carga Iónica", Centro de Estudios Avanzados en Hidrometalurgia-Electrometalurgia, Santiago de Chile

- [17] O. Herreros, N. Bernal, R. Quiroz, G. Fuentes y J. Viñals. "Lixiviación de Concentrados de Cobre Utilizando NaCl y el Cobre Soluble Aportado por el Propio Concentrado", Rev. Metal. Madrid 41 2005
- [18] G. Velarde, manejo de la dosis de ácido para el curado de mineral a lixiviación, Sociedad Minera Cerro Verde, Perú, Proceeding of the III International Copper Hydrometallurgy Workshop, Noviembre 23 al 25 de 2005, Santiago, Chile.
- [19] C. Avendaño, estudios de casos de lixiviación: problemas y soluciones, Sociedad Terral S.A. Revista Minerale Vol. 53 N°224, Octubre/Diciembre de 1998.
- [20] Daniel Florencio Dávila, Modelamiento matemático en los procesos de lixiviación de minerales auríferos y cupríferos en sistemas químicos.
- [21] Carolina Salhe, Tomás Vargas, "Estudio del Mecanismo de Disolución de Sulfuros de Cobre Durante la Lixiviación férrico de Sulfuros de Baja Ley", Universidad de Chile, HydroCopper 2005
- [22] René Winand, "Chloride Hydrometallurgy", Hydrometallurgy Colume 27, Pages 285-316, 1991.
- [23] Wei-Lun Hsu, Mon-Jyh Lin, and Jyh-Ping Hsu, "Dissolution of Solid Particles in Liquids: Shrinking Core Model", World Academy of Science, Engineering and Technology, Volumen 53, Pages 913-918, 2009.
- [24] Kealeboga Busang, Colin Poole. School of Process, Environmental and Materials Engineering, Faculty of Engineering "Ferric Chloride Leaching of Copper from Chalcopyrite"

ANEXOS

- Anexo A:** Memoria de cálculo
- Anexo B:** Procedimientos de laboratorio
- Anexo C:** Registro fotográfico trabajo experimental
- Anexo D:** Resultados trabajo experimental
- Anexo E:** Regresión lineal modelo del núcleo recesivo
(Control químico y difusional)

ANEXO A

A-1. Análisis granulométrico

El gráfico 23 y 24 muestra el análisis granulométrico del mineral sulfurado y oxidado, don de el P80 fue calculado mediante una interpolación, donde se obtuvo un tamaño de partícula de 0,75 pulg (1,905 cm) para el mineral oxidado y para el sulfurado 0,55 pulg (1,4 cm).

Tamiz	Abertura [mm]	m _{retenida} [Kg]	% p/p	% Retenido	% Pasante acum.
5/8"	16,00	0	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	400,00	35,08	35,08	64,92
3/8"	9,50	283,00	24,82	59,91	40,09
1/4"	6,30	200,00	17,54	77,45	22,55
#4	4,75	90,00	7,89	85,34	14,66
#16	1,18	79,00	6,93	92,27	7,73
#40	0,43	41,38	3,63	95,90	4,10
#70	0,21	22,73	1,99	97,89	2,11
#100	0,15	10,00	0,88	98,77	1,23
-#100	<0,150	14,00	1,23	100,00	0,00
Total		1140,11			

Tabla 14 Análisis granulométrico mineral sulfurado

Tamiz	Abertura [mm]	m _{retenida} [Kg]	% p/p	% Retenido	% Pasante acum.
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00
7/8"	22,17	24,89	1,98	1,98	98,02
3/4"	19,00	235,45	18,77	20,76	79,24
5/8"	16,00	232,62	18,55	39,30	60,70
1/2"	12,50	154,25	12,30	51,60	48,40
3/8"	9,50	114,59	9,14	60,74	39,26
1/4"	6,30	160,63	12,81	73,54	26,46
#4	4,75	56,82	4,53	78,07	21,93
#16	1,18	185,30	14,77	92,85	7,15
#40	0,43	37,54	2,99	95,84	4,16
#70	0,21	19,57	1,56	97,40	2,60
#100	0,15	8,45	0,67	98,08	1,92
-#100	<0.150	24,14	1,92	100,00	0,00
Total		1254,25			

Tabla 15 Análisis granulométrico mineral oxidado

El grafico 23 y 24 muestra el análisis granulométrico de ambos minerales.

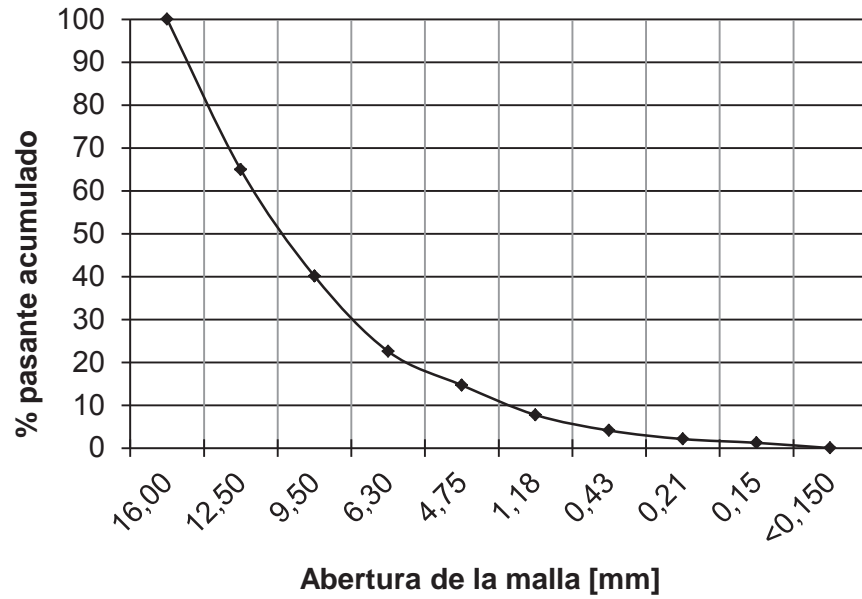


Gráfico 24 Análisis granulométrico PSD mineral sulfurado ARC 6

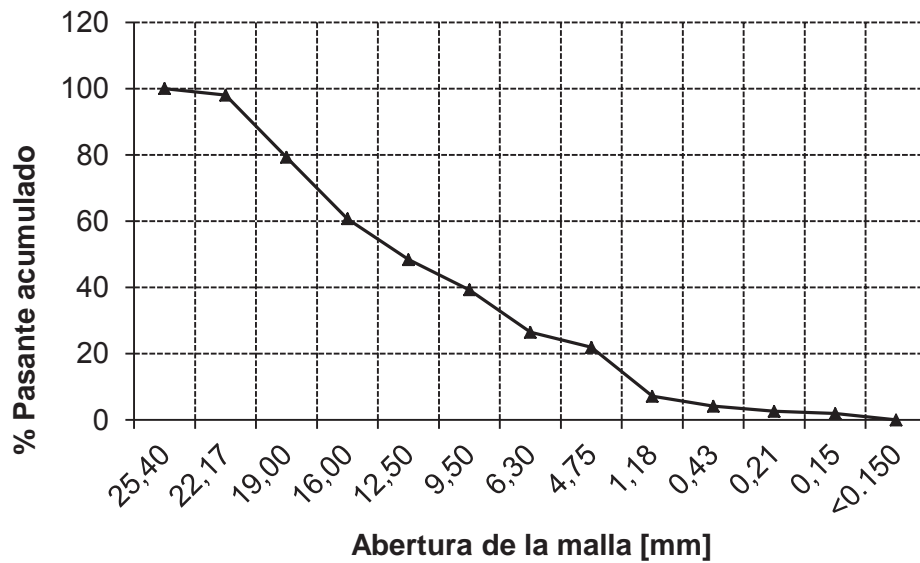


Gráfico 25 Análisis granulométrico PSD mineral sulfurado ARC 9

A-2. Mezclas artificiales entre ARC 6 y ARC 9

Las mezclas entre ARC 6 y ARC 9 se crearon proporcionalmente, y el cálculo de la razón de solubilidad se desarrollo de la siguiente manera:

$$m_{\text{ARC 6 MA}} = \frac{m_{\text{mineral}}[\text{g}](R_s \% \text{CuS}_{\text{ARC 9}} - \% \text{CuT}_{\text{ARC 9}})}{R_s (\% \text{CuT}_{\text{ARC 6}} - \% \text{CuS}_{\text{ARC 9}}) - (\% \text{CuS}_{\text{ARC 6}} - \% \text{CuT}_{\text{ARC 9}})}$$

La masa de ARC 9 se calcula por diferencia.

Rs	Masa ARC 9 [g]	Masa ARC 6 [g]	% ARC 9	% ARC 6	%CuT _{teórico}	%CuS _{teórico}
0,20	77,09	1922,91	3,85	96,15	0,59	0,12
0,25	142,08	1857,92	7,10	92,90	0,61	0,15
0,30	209,82	1790,18	10,49	89,51	0,62	0,19
0,35	280,50	1719,50	14,03	85,97	0,63	0,22
0,40	354,31	1645,69	17,72	82,28	0,65	0,26
0,45	431,47	1568,53	21,57	78,43	0,66	0,30
0,50	512,20	1487,80	25,61	74,39	0,68	0,34
0,55	596,75	1403,25	29,84	70,16	0,69	0,38
0,60	685,42	1314,58	34,27	65,73	0,71	0,43
0,65	778,51	1221,49	38,93	61,07	0,73	0,47
0,70	876,34	1123,66	43,82	56,18	0,75	0,52
0,75	979,31	1020,69	48,97	51,03	0,77	0,57
0,80	1087,82	912,18	54,39	45,61	0,79	0,63
0,85	1202,33	797,67	60,12	39,88	0,81	0,69
0,90	1323,35	676,65	66,17	33,83	0,83	0,75

Tabla 16 Resumen creación de mezclas artificiales

A-3. Cálculo de reactivos aglomeración de minerales

Para aglomerar el mineral oxidado y sulfurado es necesario calcular las dosis de reactivos de cloruro de sodio, refino, ácido sulfúrico y sulfato férrico pentahidratado que se va a agregar a cada muestra, este procedimiento se explica a continuación.

Los datos con que se trabajó son:

Masa mineral = 5000 [g]	$\rho_{\text{refino}} = 1,05 \text{ [g/cm}^3\text{]}$
Humedad mineral = 3%	$\rho_{\text{ácido sulfúrico}} = 1,84 \text{ [g/cm}^3\text{]}$
Humedad _{ARC 9} = 10%	Pureza _{H₂SO₄} = 96%
Humedad _{ARC 6} = 8%	Acidez _{refino} = 12 [g/L]
ARC 9: 4-8-10-20 Kg NaCl/TMS mineral	ARC 6: 4-10-20-30 Kg NaCl/TMS mineral,
PM Fe ₂ (SO ₄) ₃ = 399,7 g/mol	10 Kg NaCl/TMS + 5 Kg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /TMS
PM Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·5H ₂ O = 489,7 g/mol	

Como caso general se verá la muestra que contiene sulfato férrico y sal, junto una serie de formulas con que se calculan las dosis de reactivos al igual que una tabla resumen con las dosis agregadas.

Primero se calculó la cantidad de mineral seco:

$$m_{\text{mineral seco}}[\text{g}] = 5000 [\text{g}] \frac{97\%}{100\%} = 4850 [\text{g}]$$

para calcular la masa de líquido total, para alcanzar la condición de un 8% de humedad en el glómero para el caso del mineral sulfurado:

$$m_{\text{líquido total}} [\text{g}] = m_{\text{mineral seco}} \times \frac{\frac{\text{humedad del mineral} [\%]}{100\%}}{\left(1 - \frac{\text{humedad del mineral} [\%]}{100\%}\right)}$$

$$m_{\text{líquido total}} [\text{g}] = 4850 [\text{g}] \times \frac{\frac{8\%}{100\%}}{\left(1 - \frac{8\%}{100\%}\right)} = 421,74 [\text{g}]$$

para calcular la masa de ácido sulfúrico en el refino debemos calcular la masa de refino de la siguiente manera:

$$m_{\text{refino}} [\text{g}] = \frac{\left(m_{\text{líquido total}} [\text{g}] \cdot m_{\text{mineral}} [\text{g}] \frac{[\%] \text{ humedad mineral}}{100\%} \right) \cdot \frac{[\%] \text{ pureza}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{100\%} - \text{Kg} \frac{\text{H}_2\text{SO}_4}{\text{TMS}} m_{\text{mineral seco}} [\text{g}]}{\frac{[\%] \text{ pureza}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{100\%} - \frac{\text{acidez}_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right]}{1000 \cdot \rho_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}}$$

$$m_{\text{refino}} [\text{g}] = \frac{\left(421,74[\text{g}] - 5000 [\text{g}] \cdot \frac{3\%}{100\%} \right) \cdot \frac{96\%}{100\%} - \frac{10 \text{ Kg} \frac{\text{H}_2\text{SO}_4}{\text{TMS}} \cdot 4850 [\text{g}]}{\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ TMS}}}}{\frac{96\%}{100\%} - \frac{12 \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right]}{\frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}} \cdot 1,05 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}} = 223,88 [\text{g}]$$

entonces la masa de ácido en el refino será:

$$m_{\text{ácido en refino}} [\text{g}] = \frac{m_{\text{refino}} [\text{g}] \cdot \text{acidez}_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right]}{\rho_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \cdot \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}}}$$

$$m_{\text{ácido en refino}} [\text{g}] = \frac{223,88 [\text{g}] \cdot 12 \left[\frac{\text{g}}{\text{L}} \right]}{1,05 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \cdot \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ L}}} = 2,56 [\text{g}]$$

utilizando la masa de ácido aportada por el refino es posible calcular el resto de ácido que se debe agregar para alcanzar los 10 Kg H⁺/TMS:

$$m_{\text{ácido puro}} [\text{g}] = \left(m_{\text{líquido total}} [\text{g}] - m_{\text{mineral}} [\text{g}] \frac{[\%] \text{ humedad mineral}}{100\%} - m_{\text{refino}} [\text{g}] \right) \frac{[\%] \text{ pureza}_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{100\%}$$

$$m_{\text{ácido puro}} [\text{g}] = \left(421,74[\text{g}] - 5000 [\text{g}] \frac{3\%}{100\%} - 223,88[\text{g}] \right) \frac{96\%}{100\%} = 45,94 [\text{g}]$$

dado que el ácido utilizado esta al 96% es necesario adicionar una cantidad mayor, dando:

$$m_{\text{ácido (96\%)}} \text{ [g]} = m_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ puro}} \text{ [g]} \cdot \frac{100\%}{96\%}$$

$$m_{\text{ácido (96\%)}} \text{ [g]} = 45,94 \text{ [g]} \cdot \frac{100\%}{96\%} = 47,86 \text{ [g]}$$

finalmente el volumen de refino, ácido, NaCl y sulfato férrico se calcula como:

$$V_{\text{refino}} \text{ [cm}^3\text{]} = \frac{m_{\text{refino}} \text{ [g]}}{\rho_{\text{refino}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}$$

$$V_{\text{ácido}} \text{ [cm}^3\text{]} = \frac{m_{\text{ácido (96\%)}} \text{ [g]}}{\rho_{\text{ácido}} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}$$

$$m_{\text{NaCl}} \text{ [g]} = \frac{\frac{\text{Kg NaCl}}{\text{TMS}}}{\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ TMS}}} \cdot m_{\text{mineral seco}} \text{ [g]}$$

$$m_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}} \text{ [g]} = \frac{\frac{\text{Kg Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{\text{TMS}}}{\frac{1000 \text{ Kg}}{1 \text{ TMS}}} \cdot \frac{PM_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}}{PM_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}} \cdot m_{\text{mineral seco}} \text{ [g]}$$

Aplicando estas formulas es posible calcular las dosis de reactivos para cada aglomeración realizada durante la tesis, ya sea mineral sulfurado, oxidado, mezclas artificiales o columnas.

A continuación se entrega una tabla resumen con las dosis de reactivos agregadas en cada aglomeración.

Parámetros	MMO0	MMO4	MMO8	MMO10	MMO20
Masa [Kg]	5	5	5	5	5
NaCl [g]	-	19,4	38,8	48,5	97
H ₂ SO ₄ [cm ³]	10,1	25,24	25,24	25,24	25,24
Refino [cm ³]	130,46	326,14	326,14	326,14	326,14

Tabla 17 Resumen dosis de reactivo aglomeración mineral oxidado de cobre ARC 9

Parámetros	MMS0	MMS4	MMS10	MMS20	MMS30	MMS10F5
Masa [Kg]	5	5	5	5	5	5
NaCl [g]	-	19,4	48,5	97	145,5	48,5
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	-	-	-	-	-	24,25
H ₂ SO ₄ [cm ³]	10,1	26,01	26,01	26,01	25,24	25,24
Refino [cm ³]	85,29	213,22	213,22	213,22	326,14	326,14

Tabla 18 Resumen dosis de reactivo aglomeración mineral sulfurado de cobre ARC 6

Parámetros	Hygeia	Vesta	Pallas	Ceres
Masa [Kg]	48	48	48	52
NaCl [g]	-	465,6	931,2	504,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	-	-	-	252,2
H ₂ SO ₄ [cm ³]	249,68	249,68	249,68	270,49
Refino [cm ³]	2046,94	2046,94	2046,94	2217,51

Tabla 19 Resumen dosis de reactivos aglomeración columnas

Parámetros	Ceres ABCD
Masa [Kg]	6
NaCl [g]	116,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	58,2
H ₂ SO ₄ [cm ³]	62,42
Refino [cm ³]	511,73

Tabla 20 Resumen dosis de reactivo aglomeración columna Ceres en serie ABCD

A-4. Balance de masa columnas

La dosis de reactivos para la aglomeración de columnas se calcula de la misma manera, la diferencia reside en la cantidad de mineral a aglomerar.

Parámetros	Hygeia	Vesta	Pallas	Ceres
Masa [Kg]	48	48	48	52
NaCl [g]	-	465,6	931,2	504,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	-	-	-	252,2
H ₂ SO ₄ [cm ³]	249,68	249,68	249,68	270,49
Refino [cm ³]	2046,94	2046,94	2046,94	2217,51

Tabla 21 Dosis de reactivos procedimiento experimental aglomeración Columnas

Parámetros	Ceres ABCD
Masa [Kg]	6
NaCl [g]	116,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ [g]	58,2
H ₂ SO ₄ [cm ³]	62,42
Refino [cm ³]	511,73

Tabla 22 Dosis de reactivos procedimiento experimental aglomeración Columna Ceres en Serie ABCD

A-5. Balance de masa columna Ceres en serie

Lo primero que debemos calcular es el porcentaje de cobre total y soluble teórico de nuestra mezcla artificial, para ello tomaremos el análisis de líquidos inicial.

Cálculo de cobre total y soluble teórico columna Ceres en serie:

La masa total de la mezcla artificial fue de 6000 g, que contiene 3944 g de ARC 6 y 2056 g de ARC 9, para el caso del mineral sulfurado el cobre total y soluble es:

$$mCuT_{ARC6} = 3944 \text{ g} \frac{0,58\%}{100\%} = 22,87 \text{ g}$$

$$mCuS_{ARC6} = 3944 \text{ g} \frac{0,08\%}{100\%} = 3,15 \text{ g}$$

y para el mineral oxidado:

$$mCuT_{ARC9} = 2056 \text{ g} \frac{1,09\%}{100\%} = 22,41 \text{ g}$$

$$mCuS_{ARC9} = 2056 \text{ g} \frac{0,96\%}{100\%} = 19,73 \text{ g}$$

al sumar la masa de cobre total y soluble teórico en ambos casos se obtienen:

$$mCuT_{MA} = 45,28 \text{ g}$$

$$mCuS_{MA} = 22,88 \text{ g}$$

finalmente al dividir ambos valores por la masa total de la mezcla obtenemos el porcentaje de cobre total y soluble teórico:

$$\%CuT_{MA} = 0,75$$

$$\%CuS_{MA} = 0,38$$

Para realizar el balance de masa a la columna Ceres en serie, se utilizaron las muestras iniciales y finales de la columna Ceres que fueron enviadas a análisis de cobre total, cuyos resultados se muestran en la tabla xx.

Análisis Sólidos			
Columna	%CuT _{inicial}	%CuT _{final}	m _{final} [g]
Ceres A	0,7	0,25	5410
Ceres B	0,81	0,2	5120
Ceres C	0,79	0,23	5260
Ceres D	0,96	0,26	5030

Tabla 23 Resumen análisis de sólidos columna Ceres ABCD

En base al análisis de sólidos la recuperación real de cada columna fue:

$$\%R_{\text{real Ceres A}} = \frac{6000 \text{ g} \frac{0,7\%}{100\%} - 5410 \text{ g} \frac{0,25\%}{100\%}}{6000 \text{ g} \frac{0,7\%}{100\%}} \times 100\% = 67,8\%$$

$$\%R_{\text{real Ceres B}} = \frac{6000 \text{ g} \frac{0,81\%}{100\%} - 5120 \text{ g} \frac{0,2\%}{100\%}}{6000 \text{ g} \frac{0,81\%}{100\%}} \times 100\% = 78,93\%$$

$$\%R_{\text{real Ceres C}} = \frac{6000 \text{ g} \frac{0,79\%}{100\%} - 5260 \text{ g} \frac{0,23\%}{100\%}}{6000 \text{ g} \frac{0,79\%}{100\%}} \times 100\% = 74,48\%$$

$$\%R_{\text{real Ceres D}} = \frac{6000 \text{ g} \frac{0,96\%}{100\%} - 5030 \text{ g} \frac{0,26\%}{100\%}}{6000 \text{ g} \frac{0,96\%}{100\%}} \times 100\% = 77,3\%$$

La tabla xx muestra la comparación entre la recuperación real obtenida mediante el análisis de sólidos inicial y final a las columnas Ceres ABCD y el teórico que se obtuvo mediante el análisis de PLS que se realizó diariamente.

Recuperación		
Columna	%R _{real}	%R _{teórico}
Ceres A	67,80	61,65
Ceres B	78,93	78,8
Ceres C	74,48	73,46
Ceres D	77,30	76,17

Tabla 24 Comparación recuperación de cobre columna Ceres ABCD

ANEXO B

B-1. Procedimientos de laboratorio

En esta sección se explican los procedimientos utilizados para el análisis de líquidos en las pruebas de aglomeración y lixiviación de minerales oxidados y sulfurados

Test de sulfatación (TS)

Para determinar el efecto de los reactivos agregados en la aglomeración es necesario realizar un análisis químico una vez transcurrido el tiempo de reposo, para ello se utilizó el Test de Sulfatación, el cual nos permite determinar la cantidad de cobre que se encuentra en solución, cuando el mineral ha sido atacado químicamente.

El procedimiento consiste en preparar una pulpa, en un recipiente con agua a una razón S/L : 1/2, luego se mezcla la pulpa mediante un agitador a una velocidad promedio de 150 rpm, durante aproximadamente 30 minutos, para permitir una correcta homogenización de la pulpa, en el minuto 28 se agrega floculante, permitiendo la sedimentación de las partículas, aprox. 20 cm³, en el minuto 30 se detiene la agitación y se deja reposar por 10 minutos.

Luego se extraen 2 muestras líquidas de 200 cm³ c/u, una de testigo y la otra para el análisis, el agua es eliminada mediante filtración.

Una vez que la muestra ha sido filtrada se agrega nuevamente cantidad de agua que se agregó al comienzo, agitando la pulpa por 20 minutos, se deja reposar y se elimina el agua, el sólido se deposita en una bandeja y se envía a la estufa de secado por 8 horas para luego enviar la muestra a análisis de sólidos, para el cálculo de %CuT, %CuS, %FeT y %FeS.

La muestra líquida de 200 cm³ se filtra y se envía análisis por Cu⁺² g/L, FeT g/L, Fe⁺² g/L, acidez g/L, Eh mV, pH y Cl⁻ g/L.



Figura 20 Agitador mecánico laboratorio CIMM

Determinación de cobre soluble

Mediante muestreo se selecciona un 1 gramo de mineral el cual se deposita en un matraz, de preferencia Erlenmeyer de 250 ml, se agregan 50 ml de ácido cítrico con una concentración 1 M y se somete a agitación durante una hora a 200 rpm y temperatura ambiente. La solución es aforada a 250 ml con agua destilada para luego filtrar con filtro Whatman N°42.

Se toma una alícuota de la solución obtenida para realizar el contenido de cobre disuelto por absorción atómica.



Figura 21 Campana laboratorio CIMM

Determinación del ión ferroso y hierro total

La determinación del ión ferroso y hierro total (por diferencia se obtiene la concentración del ión férrico) se realiza por el método colorimétrico de la orto-fenantrolina.

La determinación calorimétrica se realiza utilizando un espectrofotómetro Lambda 1, Perkin Elmer 110B y midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 510 nm, contra un blanco del medio ácido utilizado.

Medición de Eh y pH

La medición de pH se realiza mediante un pH meter digital Cole-Palmer 540 y un electrodo de pH.

La medición de Eh se realiza utilizando un electrodo de referencia de Ag/AgCl.

Determinación del ácido libre

Se utiliza valorando la solución obtenido por medio de una solución de hidróxido de sodio 0,1 a 0,5 N en agua destilada utilizando fenolftaleína como indicador.

ANEXO C

C-1 Fotografías aglomeración de minerales oxidados ARC 9



Figura 22 Aglomeración ARC 9 muestra Blanco. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]



Figura 23 Aglomeración ARC 9 muestra Blanco. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 24 Aglomeración ARC 9 muestra Blanco. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]



Figura 25 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]



Figura 26 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 27 Aglomeración ARC 9 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]



Figura 28 Aglomeración ARC 9 muestra 8 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]



Figura 29 Aglomeración ARC 9 muestra 8 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 30 Aglomeración ARC 9 muestra 8 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]



Figura 31 Aglomeración ARC 9 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]



Figura 32 Aglomeración ARC 9 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 33 Aglomeración ARC 9 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]



Figura 34 Aglomeración ARC 9 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [5 días]



Figura 35 Aglomeración ARC 9 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 36 Aglomeración ARC 9 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [15 días]

C-2 Fotografías aglomeración de minerales sulfurados ARC 6



Figura 37 Aglomeración ARC 6 muestra Blanco. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 38 Aglomeración ARC 6 muestra 4 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 39 Aglomeración ARC 6 muestra 10 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 40 Aglomeración ARC 6 muestra 20 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 41 Aglomeración ARC 6 muestra 30 Kg NaCl/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]



Figura 42 Aglomeración ARC 6 muestra 10 Kg NaCl/TMS, 5 Kg Fe₂(SO₄)₃/TMS. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [10 días]

C-3 Fotografías aglomeración de mezclas artificiales



Figura 43 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,2]



Figura 44 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,25]



Figura 45 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,3]



Figura 46 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,35]

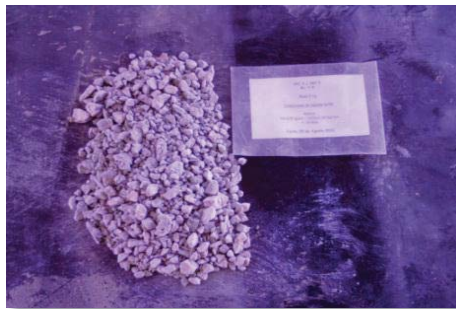


Figura 47 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,4]

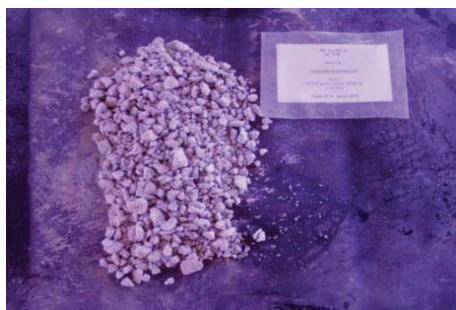


Figura 48 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,45]



Figura 49 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,5]

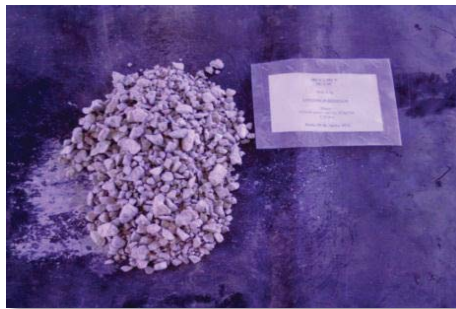


Figura 50 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,55]



Figura 51 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,6]



Figura 52 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,65]

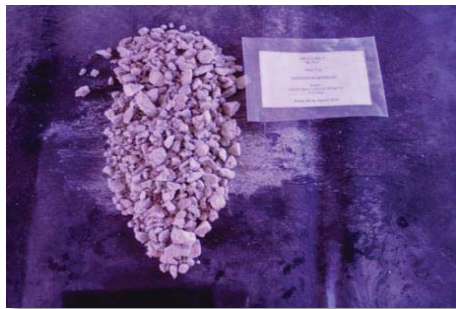


Figura 53 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,7]



Figura 54 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,75]



Figura 55 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,8]

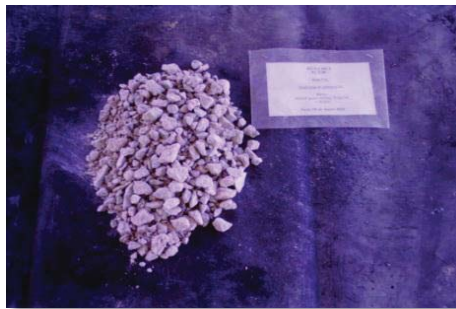


Figura 56 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,85]



Figura 57 Aglomeración MA Blanco. 20 días. 10 Kg H_2SO_4 /TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s : 0,9]



Figura 58 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,2]



Figura 59 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,25]



Figura 60 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,3]



Figura 61 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,35]



Figura 62 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,4]



Figura 63 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,45]

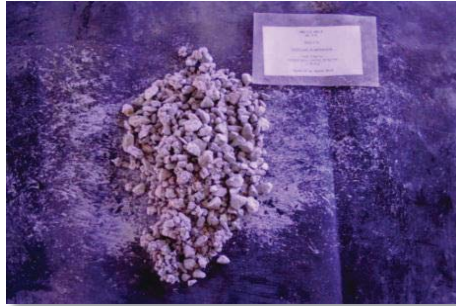


Figura 64 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,5]



Figura 65 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,55]



Figura 66 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,6]



Figura 67 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,65]



Figura 68 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,7]



Figura 69 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,75]



Figura 70 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,8]



Figura 71 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,85]



Figura 72 Aglomeración MA 4 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,9]



Figura 73 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,2]



Figura 74 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,25]



Figura 75 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,3]



Figura 76 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,35]

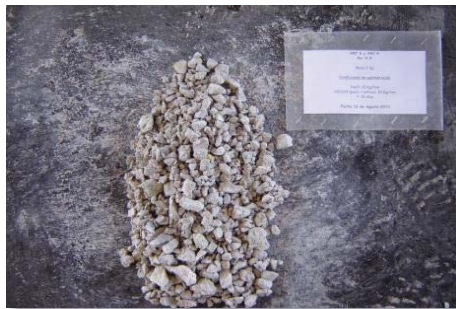


Figura 77 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,4]



Figura 78 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,45]



Figura 79 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,5]



Figura 80 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,55]



Figura 81 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,6]



Figura 82 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,65]



Figura 83 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,7]



Figura 84 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,75]



Figura 85 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,8]



Figura 86 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,85]



Figura 87 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. 20 días. 10 Kg H₂SO₄/TMS, a 25°C y Presión atmosférica. [R_s: 0,9]

C-4 Fotografías aglomeración de columnas de un metro



Figura 88 Aglomeración MA Blanco. Columna Hygeia [R_s : 0,6]



Figura 89 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS. Columna Vesta [R_s : 0,6]



Figura 90 Aglomeración MA 20 Kg NaCl/TMS. Columna Pallas [R_s: 0,6]



Figura 91 Aglomeración MA 10 Kg NaCl/TMS y 5 Kg Fe₂(SO₄)₃/TMS. Columna Ceres [R_s: 0,6]

C-5 Fotografías aglomeración de columnas en serie



Figura 92 Aglomeración MA Columna Ceres A [R_s : 0,6]



Figura 93 Aglomeración MA Columna Ceres B [R_s : 0,6]



Figura 94 Aglomeración MA Columna Ceres C [R_s : 0,6]



Figura 95 Aglomeración MA Columna Ceres D [R_s : 0,6]

C-6. Fotografías columnas montadas en la Planta Piloto



Figura 96 Lixiviación en Columnas Planta Piloto CMCC



Figura 97 Lixiviación Columna Ceres en Serie Planta Piloto CMCC

ANEXO D

D-1 Resultados experimentales aglomeración ARC 9

White							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
5	0,76	0,02	0,02	<0,5	668	2,86	0,5
10	1,10	0,02	0,02	<0,5	642	3,28	0,1
15	1,14	0,04	0,02	<0,5	638	3,27	0,7

Tabla 25 MMO0: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica

4 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
5	0,78	0,02	0,02	<0,5	701	2,92	0,71
10	1,14	0,02	0,02	0,24	692	2,44	0,9
15	0,82	0,02	0,02	<0,5	604	3,98	0,8

Tabla 26 MMO4: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica

8 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
5	0,77	0,02	0,02	<0,5	692	3,23	1,46
10	1,08	0,04	0,02	<0,5	614	4,02	1,6
15	0,84	0,02	0,02	<0,5	560	4,48	1,51

Tabla 27 MMO8: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica

10 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
5	0,83	0,02	0,02	<0,5	702	3,14	2,06
10	1,04	0,04	0,02	<0,5	584	4,25	2,1
15	1,04	0,02	0,02	<0,5	596	3,96	2,11

Tabla 28 MMO10: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

20 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
5	0,84	0,02	0,02	<0,5	694	3,22	4,49
10	1,04	0,04	0,02	<0,5	606	3,86	4,8
15	1,06	0,02	0,02	<0,5	582	4,05	4,9

Tabla 29 MMO20: análisis químico de líquidos, TS ARC 9 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

D-2 Resultados experimentales aglomeración ARC 6

White							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10	0,34	0,17	0,16	<0,5	607	2,34	-
20	0,34	0,15	0,13	<0,5	609	2,2	-
30	0,34	0,2	0,2	0,8	646	2,04	-

Tabla 30 MMS0: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

4 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10	0,38	0,13	0,1	0,8	658	2,08	0,52
20	0,41	<0,02	0,1	5	654	1,94	0,32
30	0,36	0,12	0,1	0,72	647	2,07	0,3

Tabla 31 MMS4: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

10 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10	0,57	0,12	0,1	0,7	653	2,1	1,96
20	0,62	<0,02	0,1	5	649	1,94	1,65
30	0,58	0,12	0,12	0,96	650	1,98	1,86

Tabla 32 MMS10: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

20 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10	0,56	0,14	0,12	0,7	654	2,12	4,54
20	0,66	<0,02	0,12	5	649	1,96	4,3
30	0,48	0,1	0,08	0,6	634	2,12	4,41

Tabla 33 MMS20: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

30 Kg NaCl/TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10	0,43	0,13	0,12	0,7	665	2,1	7,22
20	0,74	<0,02	0,12	6	634	2,01	7,38
30	0,58	0,12	0,12	0,64	629	2,08	7

Tabla 34 MMS30: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

10 Kg NaCl/TMS + 5 Kg Fe ₂ (SO ₄) ₃ /TMS							
t [días]	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10	0,68	1,16	0,44	<0,5	699	2,24	1,58
20	0,95	0,13	0,48	<0,05	698	2,25	2,08
30	0,6	2,28	0,52	<0,5	699	2,24	1,42

Tabla 35 MMSSSF: análisis químico de líquidos, TS ARC 6 con cloruro de sodio en medio ácido a 25°C y presión atmosférica.

D-3 Resultados experimentales aglomeración mezclas artificiales

Rs: 0,2							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,4	0,26	0,12	1,1	443	1,95	-
RS4	0,55	0,22	0,07	< 0,5	473	2,16	351
RS10	0,74	0,42	0,08	1,04	602	1,89	2,27
RS20	0,66	0,08	0,06	0,72	611	2,05	4,29
RSssf	1,08	1,32	0,3	0,8	650	1,86	1,48

Tabla 36 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,2]

Rs: 0,25							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,5	0,24	0,14	0,9	434	2,04	-
RS4	0,68	0,21	0,08	< 0,5	480	2,24	435
RS10	0,9	0,42	0,06	1,03	603	1,9	2,16
RS20	0,82	0,06	0,06	< 0,5	591	2,46	4,9
RSssf	1,46	1,22	0,28	< 0,5	652	2,2	1,71

Tabla 37 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,25]

Rs: 0,3							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,44	0,2	0,12	1	541	1,97	-
RS4	0,73	0,15	0,04	< 0,5	494	2,36	588
RS10	0,74	0,44	0,08	1,04	604	1,9	2,29
RS20	0,8	0,04	0,04	< 0,5	593	2,28	4,33
RSssf	1,42	1,4	0,24	< 0,5	653	2,23	1,8

Tabla 38 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,3]

Rs: 0,35							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,66	0,22	0,14	1,1	496	1,97	-
RS4	0,81	0,15	0,04	< 0,5	494	2,63	617
RS10	0,92	0,44	0,08	1,04	603	1,92	2,33
RS20	0,88	0,04	0,04	< 0,5	576	2,99	4,37
RSssf	1,32	1,32	0,28	< 0,5	658	2,28	1,67

Tabla 39 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,35]

Rs: 0,4							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,72	0,2	0,14	<0,5	429	2,14	-
RS4	0,76	0,17	0,07	< 0,5	444	2,38	484
RS10	0,82	0,42	0,06	1,03	601	1,98	2,26
RS20	0,92	0,02	0,02	< 0,5	578	2,79	4,46
RSssf	1,38	1,24	0,24	< 0,5	653	2,25	1,68

Tabla 40 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,4]

Rs: 0,45							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,75	0,2	0,12	0,9	458	2,02	-
RS4	0,73	0,12	0,03	< 0,5	490	2,94	613
RS10	0,82	0,42	0,04	1,01	603	2,06	2,13
RS20	0,9	0,02	0,02	< 0,5	577	2,79	4,19
RSssf	1,88	1,12	0,2	< 0,5	660	2,29	2,02

Tabla 41 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,45]

Rs: 0,5							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,78	0,26	0,16	0,9	463	2,03	-
RS4	0,97	0,15	0,05	< 0,5	499	2,59	519
RS10	1,1	0,4	0,1	< 0,5	602	2,2	2,3
RS20	1,06	0,02	0,02	< 0,5	570	3,1	4,52
RSssf	1,86	1,4	0,3	< 0,5	661	2,31	2,32

Tabla 42 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,5]

Rs: 0,55							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,83	0,15	0,13	< 0,5	460	3,33	-
RS4	0,93	0,14	0,04	< 0,5	505	2,87	711
RS10	1,02	0,36	0,08	< 0,5	602	2,21	2,32
RS20	1,08	0,04	0,04	< 0,5	579	2,82	4,72
RSssf	1,92	1,2	0,26	< 0,5	662	2,28	1,95

Tabla 43 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,55]

Rs: 0,6							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,94	0,14	0,12	< 0,5	423	2,37	-
RS4	0,88	0,13	0,03	< 0,5	506	2,62	716
RS10	1	0,4	0,08	< 0,5	602	2,19	2,29
RS20	1,02	0,04	0,04	< 0,5	566	2,8	4,38
RSssf	2,14	1,26	0,3	< 0,5	666	2,25	2,06

Tabla 44 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,6]

Rs: 0,65							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,96	0,12	0,1	< 0,5	418	2,6	-
RS4	0,89	0,12	0,03	< 0,5	507	2,79	677
RS10	0,88	0,4	0,06	< 0,5	602	2,22	2,29
RS20	0,86	0,02	0,02	< 0,5	550	3,66	4,38
RSssf	2,24	1,3	0,34	< 0,5	661	2,25	2,07

Tabla 45 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,65]

Rs: 0,7							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,98	0,12	0,1	< 0,5	428	2,53	-
RS4	1,04	0,13	0,03	< 0,5	516	3,1	687
RS10	1,04	0,36	0,06	< 0,5	601	2,23	2,61
RS20	0,9	0,04	0,04	< 0,5	542	3,96	4,53
RSssf	2,26	1,4	0,28	< 0,5	660	2,38	2,11

Tabla 46 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,7]

Rs: 0,75							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,86	0,1	0,08	< 0,5	415	3,05	-
RS4	1,22	0,11	0,03	< 0,5	509	3,37	869
RS10	1,12	0,36	0,04	< 0,5	601	2,26	2,34
RS20	1,08	0,02	0,02	< 0,5	555	3,26	4,42
RSssf	1,8	1,3	0,26	< 0,5	663	2,4	1,86

Tabla 47 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA.
25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,75]

Rs: 0,8							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,9	0,08	0,06	< 0,5	456	3,43	-
RS4	0,93	0,12	0,03	< 0,5	508	3,19	632
RS10	1,04	0,34	0,08	< 0,5	603	2,3	2,26
RS20	1,06	0,02	0,02	< 0,5	557	3,37	4,86
RSssf	2	1,1	0,22	< 0,5	664	2,44	2,12

Tabla 48 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,8]

Rs: 0,85							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	0,86	0,08	0,06	< 0,5	462	3,22	-
RS4	0,71	0,1	0,02	< 0,5	500	3,9	667
RS10	1,02	0,36	0,06	< 0,5	602	2,38	2,34
RS20	1,04	0,02	0,02	< 0,5	558	3,34	4,95
RSssf	2,16	1,2	0,24	< 0,5	660	2,56	2,24

Tabla 49 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,85]

Rs: 0,9							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
RSw	1,04	0,1	0,08	< 0,5	513	2,69	-
RS4	0,92	0,09	0,02	< 0,5	490	3,77	741
RS10	1,06	0,34	0,04	< 0,5	602	2,45	2,25
RS20	0,96	0,02	0,02	< 0,5	545	3,12	4,57
RSssf	2,24	1,2	0,26	< 0,5	660	2,5	2,32

Tabla 50 Resumen análisis químico de líquidos aglomeración MA. 25°C y presión atmosférica. [Rs: 0,9]

D-4 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales

Muestra	% Sulfatación					
	Rs	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
RSw		13,73	16,81	14,49	21,27	22,70
RS4		18,88	22,86	24,03	26,10	23,96
RS10		25,40	30,26	24,36	29,65	25,85
RS20		22,65	27,57	26,34	28,36	29,01
RSssf		37,07	49,09	46,75	42,54	43,51

Tabla 51 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales. Rs: 0,2 – 0,4

Muestra	% Sulfatación					
	Rs	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
RSw		23,12	23,50	24,43	27,01	26,91
RS4		22,51	29,23	27,37	25,29	24,95
RS10		25,28	33,14	30,02	28,73	24,67
RS20		27,75	31,94	31,79	29,31	24,11
RSssf		57,96	56,04	56,51	61,49	62,80

Tabla 52 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales. Rs: 0,45 – 0,65

Muestra	% Sulfatación					
	Rs	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
RSw		26,79	22,91	23,35	21,71	25,53
RS4		28,43	32,50	24,13	17,92	22,58
RS10		28,43	29,84	26,98	25,75	26,02
RS20		24,60	28,77	27,50	26,25	23,56
RSssf		61,78	47,95	51,88	54,53	54,98

Tabla 53 Cálculo porcentaje de sulfatación mezclas artificiales. Rs: 0,7 – 0,9

D-5 Resultados experimentales control de columnas

Hygeia							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
10-oct	20	-	-	-	-	-	-
11-oct	21	19:00	3000	2,6	7000	4,9	-
15-oct	22	17:00	3500	2,4	8350	5,8	-
16-oct	23	17:00	5010	3,5	5600	3,9	-
17-oct	24	17:00	4840	3,3	5760	4	-
18-oct	25	17:00	4850	3,4	5390	3,8	-
19-oct	26	12:20	3950	2,8	5300	3,7	2,5
20-oct	27	9:33	4600	3,4	5900	4	-
21-oct	28	16:50	12350	8,6	14000	9,5	-
22-oct	29	17:30	7700	5,4	7500	5,2	-
23-oct	30	10:10	4200	3	4800	3,3	-
24-oct	31	9:02	6450	4,4	8500	5,9	-
25-oct	32	14:15	8350	5,8	8400	5,8	0
26-oct	33	10:00	5250	3,6	5200	3,6	-
27-oct	34	10:30	6800	4,7	7600	5,3	-
28-oct	35	10:25	7350	5,1	7800	5,5	-
02-nov	36	16:30	13400	9,3	14000	9,8	-
03-nov	37	18:33	6100	4,2	9000	6,1	-
04-nov	38	9:20	4600	3,2	5000	3,5	-
05-nov	39	14:50	8550	5,9	8100	5,2	-
07-nov	40	18:53	9600	6,8	9500	6,7	-

Tabla 54 Resumen control de columnas – Columna Hygeia. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Vesta							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
10-oct	20	-	-	-	-	-	-
11-oct	21	19:00	1800	1	6500	4,2	-
15-oct	22	17:00	2540	1,8	4780	3,3	-
16-oct	23	17:00	2900	2	3690	2,5	-
17-oct	24	17:00	4050	2,4	4320	3	-
18-oct	25	17:00	4970	3,5	5140	3,5	-
19-oct	26	12:20	3600	2,5	3200	2,2	5
20-oct	27	9:33	3600	2,5	3200	2,5	-
21-oct	28	16:50	8750	6	7700	5	-
22-oct	29	17:30	6900	4,8	6500	4,5	-
23-oct	30	10:10	4050	2,81	3000	2	-
24-oct	31	9:02	5250	3,6	4400	3	-
25-oct	32	14:15	6700	4,5	5500	3,9	6
26-oct	33	10:00	4100	2,8	3500	2,4	-
27-oct	34	10:30	5050	3,5	8300	5,8	-
28-oct	35	10:25	4900	3,4	4650	3,2	-
02-nov	36	16:30	11200	8	12000	8,3	-
03-nov	37	18:33	4000	3	4500	3	-
04-nov	38	9:20	2500	1,8	2400	1,7	-
05-nov	39	14:50	6000	4,2	5200	3,6	-
07-nov	40	18:53	7100	4,9	6600	4,2	-

Tabla 55 Resumen control de columnas – Columna Vesta. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Pallas							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
10-oct	20	-	-	-	-	-	-
11-oct	21	19:00	5000	3,5	7400	5,1	-
15-oct	25	17:00	4630	3,2	5160	3,6	-
16-oct	26	17:00	5050	3,6	5560	3,9	-
17-oct	27	17:00	4860	3,5	5470	3,5	-
18-oct	28	17:00	3960	2,9	4780	3,4	-
19-oct	29	12:20	4050	2,8	3800	2,5	6
20-oct	30	9:33	3550	2,5	4000	2,8	-
21-oct	31	16:50	5800	4	5800	4	-
22-oct	32	17:30	4750	3,3	5500	3,9	-
23-oct	33	10:10	3650	2,5	3700	2,6	-
24-oct	34	9:02	5350	3,8	5000	3,5	-
25-oct	35	14:15	6850	4,5	6700	4,7	0
26-oct	36	10:00	3950	2,7	4100	2,9	-
27-oct	37	10:30	6000	4,3	9100	6,3	-
28-oct	38	10:25	5400	3,6	5900	4	-
03-nov	39	18:33	2800	2,1	4200	2,8	-
04-nov	44	9:20	3600	2,6	4700	3,5	-
05-nov	45	14:50	8300	5,8	8100	5,4	-

Tabla 56 Resumen control de columnas – Columna Pallas. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Ceres							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
24-sep	20	-	-	-	-	-	-
25-sep	21	18:28	2710	2	5700	3,5	-
26-sep	22	18:00	5400	3,5	4850	3,2	-
27-sep	23	18:20	5800	4	5000	3,2	7,5
28-sep	24	11:00	5680	3,8	5840	4,0	-
29-sep	25	10:50	5720	4	6100	4,2	-
30-sep	26	10:33	5470	3,8	5740	3,8	-
01-oct	27	11:05	5150	3,4	5500	3,8	-
02-oct	28	11:16	5210	3,8	5400	3,8	-
03-oct	29	10:53	5150	3,6	5640	3,9	-
04-oct	30	11:20	5380	4	5730	4,0	-
05-oct	31	11:12	3700	2,6	3300	2,2	8
06-oct	32	10:32	5200	3,6	4300	3,0	-
07-oct	33	11:44	6500	4,4	5300	3,5	-
08-oct	34	11:08	7400	5	6300	4,3	-
09-oct	35	11:43	7850	5,4	6500	4,5	-
10-oct	36	12:15	7650	5,3	5900	4,0	-
11-oct	37	19:00	8900	6,2	7300	4,7	-
15-oct	40	17:00	4810	3,2	5650	4,0	-
16-oct	41	17:00	4600	3,3	5500	3,8	-
17-oct	42	17:00	3890	2,8	4620	3,2	-
18-oct	43	17:00	3850	3	4460	3,2	-
19-oct	44	12:20	3800	3,1	5400	3,7	9,5
20-oct	45	9:33	4400	3	4100	2,8	-
21-oct	46	16:50	7450	5	6300	4,2	-
22-oct	47	17:30	5850	4	4800	3,3	-
23-oct	48	10:10	3950	2,6	3300	2,3	-
24-oct	49	9:02	5200	3,6	4000	2,7	-
25-oct	50	14:15	9250	6,5	7800	5,3	-
26-oct	51	10:00	5800	4	4800	3,3	-
27-oct	52	10:30	7500	5,1	8500	5,9	-
28-oct	53	10:25	7700	5	6350	4,1	-
02-nov	58	16:30	17200	11	12000	8,3	-
03-nov	59	18:33	7650	5,3	6500	4,4	-
04-nov	60	9:20	5000	3,5	4000	2,7	-

Tabla 57 Resumen control de columnas – Columna Ceres. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

D-6 Resultados experimentales análisis de líquidos columnas

Hygeia						
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH
10-oct	-	-	-	-	-	-
11-oct	21,9	9,6	5,34	10,6	580	1,44
15-oct	15,7	6,8	4,72	2,7	548	2,01
16-oct	5,12	6,12	3,94	6,3	598	1,67
17-oct	2,5	6,6	2,78	10,3	631	1,41
18-oct	2,04	5,74	2,58	10,9	634	1,31
19-oct	2	5	2,22	10,8	631	1,41
20-oct	1,98	5,74	2,74	11,3	632	1,32
21-oct	1,26	5,54	2,16	12,4	650	1,25
22-oct	1,16	5,86	2,2	12,7	650	1,47
23-oct	1,38	5,36	2,44	12,3	644	1,45
24-oct	1,34	5,36	2,4	12,9	646	1,43
25-oct	1,14	5,68	2,3	12,9	646	1,26
26-oct	1,3	5,78	2,34	12,9	645	1,08
27-oct	1,22	6,42	2,54	13,2	640	1,34
28-oct	1,26	5,9	2,4	13,9	637	1,26
02-nov	1,16	6,05	2,34	13,1	668	1,16
03-nov	1,76	7,05	3,06	11,3	656	1,26
04-nov	1,32	7,1	2,52	12,7	658	1,28
05-nov	1,08	6,1	2,28	13,7	643	1,23
07-nov	1,08	6,85	2,38	13,6	645	1,22

Tabla 58 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Hygeia

Vesta							
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10-oct	-	-	-	-	-	-	-
11-oct	32,2	7,6	1,66	5,7	658	1,59	23,64
15-oct	19	7,4	2,06	4,6	644	1,75	28,95
16-oct	8	6,24	2,16	6	646	1,68	9,92
17-oct	4,66	6,5	2,32	7,1	641	1,59	3,6
18-oct	3,52	6,08	2,34	8,1	636	1,46	1,74
19-oct	2,9	5,6	1,88	9,5	635	1,51	1,01
20-oct	2,78	5,9	2,28	9,4	640	1,41	1,01
21-oct	1,72	5,68	2,04	11	649	1,32	0,57
22-oct	1,52	5,92	2	11,8	651	1,49	0,46
23-oct	1,52	5,46	2,14	12,3	653	1,44	0,47
24-oct	1,56	5,36	2,12	12,2	651	1,46	0,37
25-oct	1,36	5,84	2,1	12	647	1,31	0,51
26-oct	1,5	5,82	2,2	12,2	649	1,11	1,58
27-oct	1,34	6,24	2,4	12,4	641	1,39	0,232
28-oct	1,28	6,18	2,3	13,1	639	1,3	0,158
02-nov	1,24	6,15	2,1	12,5	676	1,2	0,21
03-nov	1,54	6,65	2,36	11	669	1,27	0,22
04-nov	1,34	6,5	2,06	11,7	657	1,3	0,23
05-nov	1,02	6,35	1,94	14	650	1,22	0,54
07-nov	1,02	6,45	2,02	13	648	1,23	0,53

Tabla 59 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Vesta

Pallas							
Fecha	Cu ²⁺ [g/L]	FeT [g/L]	Fe ²⁺ [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10-oct	-	-	-	-	-	-	-
11-oct	19,7	7	1,7	7,3	669	1,36	20,1
15-oct	16	5,92	1,96	9,9	642	1,37	1,5
16-oct	2,06	5,94	2,06	10,1	653	1,43	0,79
17-oct	1,88	6	2,14	10,9	649	1,36	0,65
18-oct	1,66	6,06	2,22	11,3	646	1,31	0,6
19-oct	1,52	5,5	1,96	11,7	642	1,4	0,57
20-oct	1,6	5,98	2,2	11,7	646	1,27	0,63
21-oct	1,54	5,76	2,2	12,2	650	1,25	0,58
22-oct	1,5	6,35	2,3	12,6	652	1,49	0,36
23-oct	1,34	5,7	2,24	13,6	651	1,43	0,4
24-oct	1,24	5,62	2,24	13,6	652	1,43	0,3
25-oct	1,18	6,08	2,22	13,5	649	1,25	0,5
26-oct	1,3	6,12	2,28	13,5	649	1,06	1,63
27-oct	1,2	6,8	2,5	13,7	650	1,36	0,144
28-oct	1,28	6,6	2,28	14,6	642	1,31	0,168
03-nov	1,88	7,2	3,02	12,6	668	1,25	0,23
04-nov	1,6	7	2,62	12,3	664	1,28	0,48
05-nov	1,06	7,05	2,16	14,3	650	1,21	0,48

Tabla 60 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Pallas

Ceres							
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
24-sep	-	-	-	-	-	-	-
25-sep	16,5	11,5	3,2	13,0	682	1,13	29,56
26-sep	10,7	10,05	3,32	9,4	689	1,37	15,27
27-sep	6,6	7,6	2,98	9,3	643	1,34	7,41
28-sep	3,24	5,68	2,22	9,9	618	1,37	2,14
29-sep	3,14	5,48	2,26	10,1	635	1,35	2,10
30-sep	2,22	5,16	2,16	1,5	640	1,33	0,90
01-oct	1,88	4,8	2,14	10,6	641	1,32	0,59
02-oct	1,7	4,86	2,1	10,8	644	1,3	0,45
03-oct	1,46	4,64	2,06	11,0	645	1,28	0,31
04-oct	1,42	4,42	2,02	11,2	647	1,28	0,32
05-oct	1,5	5,6	2,4	11,2	650	1,17	0,30
06-oct	1,5	5,18	2,38	11,1	642	1,2	0,40
07-oct	1,22	5,18	2,3	11,8	654	1,23	0,40
08-oct	1,22	5,7	2,1	13,2	683	1,23	0,22
09-oct	1,16	5,6	2,18	11,4	660	1,27	0,48
10-oct	1,04	5,62	2	10,2	660	1,64	0,53
11-oct	1	5,92	2,02	12,8	648	1,37	0,42
15-oct	2,54	6,02	2,06	11,5	641	1,28	0,78
16-oct	0,96	5,7	1,84	12,2	662	1,3	0,42
17-oct	1,1	5,66	1,8	12,3	656	1,32	0,51
18-oct	0,98	5,64	1,9	12,4	652	1,2	0,47
19-oct	0,92	4,86	1,92	12,4	649	1,32	0,48
20-oct	0,98	5,56	1,88	12,9	653	1,22	0,46
21-oct	1,02	5,48	1,86	13,1	655	1,22	0,17
22-oct	0,98	6,08	2	13,9	661	1,27	0,42
23-oct	0,9	5,7	2,04	14	656	1,22	0,32
24-oct	0,88	5,44	2,02	14	654	1,21	0,33
25-oct	0,82	6	1,96	13,8	655	1,2	0,31
26-oct	0,94	5,66	2,44	13,6	656	1,05	1,33
27-oct	0,92	6,2	2,16	13,4	654	1,35	0,282
28-oct	1,04	6,24	2,02	14,2	648	1,37	0,114
02-nov	0,82	6,1	1,84	13,6	687	1,14	0,11
03-nov	0,98	6,45	2,1	12,4	686	1,21	0,15
04-nov	1	6,22	1,9	12,9	685	1,26	0,48

Tabla 61 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres

D-7 Resultados experimentales control y análisis de líquidos

Columna Ceres en serie

Ceres A							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
05-oct	20	-	-	-	-	-	-
06-oct	21	-	-	-	-	-	-
07-oct	22	12:05	10230	7,1	11000	2,8	-
08-oct	23	11:08	8000	5,6	8200	3,8	-
09-oct	24	11:43	10300	4,2	10700	3,2	-
10-oct	25	12:15	10500	4	10800	4,2	-
11-oct	26	19:00	16500	2,5	16000	3,0	-
15-oct	29	17:00	6560	4,5	3000	3,0	-
16-oct	30	17:00	4600	2,4	4400	3,4	-
17-oct	31	17:00	4000	2,8	4460	3,2	-
18-oct	32	17:00	5900	4	5400	3,2	-
19-oct	33	12:20	3850	2,7	3400	3,2	1
20-oct	34	9:33	9500	7	11300	4,3	-
21-oct	35	16:50	12000	8	16500	8,0	-
22-oct	36	17:30	9100	6,1	10100	6,2	-
23-oct	37	10:10	5600	3	5900	4,0	-

Tabla 62 Resumen control de columnas – Columna Ceres A. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Ceres A							
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
05-oct	-	-	-	-	-	-	-
06-oct	-	-	-	-	-	-	-
07-oct	1,5	5,4	2,4	13	657	1,25	1,6
08-oct	0,96	5,64	2,26	12,1	675	1,28	1,4
09-oct	0,8	5,48	1,82	12,6	668	1,13	0,48
10-oct	0,78	5,5	1,86	11,5	657	1,43	1,43
11-oct	0,68	5,16	1,82	13,8	655	1,25	0,44
15-oct	0,92	5,92	1,7	13	648	1,22	0,82
16-oct	0,84	6,02	1,7	13,1	657	1,32	0,5
17-oct	0,98	5,7	1,86	13,3	655	1,25	0,54
18-oct	0,7	5,48	1,78	13,5	656	1,21	0,48
19-oct	0,68	4	1,7	13,9	658	1,19	0,5
20-oct	0,74	5,28	1,74	13,1	653	1,23	0,54
21-oct	0,98	5,48	1,92	13,6	658	1,2	0,58
22-oct	0,78	6,02	2	14,4	656	1,23	0,37
23-oct	0,74	5,42	1,88	14,1	657	1,2	0,34
24-oct	0,74	5,34	1,96	14,3	654	1,21	0,29
25-oct	0,7	5,58	1,96	13,9	653	1,19	0,36
26-oct	0,84	5,6	1,94	13,7	655	1,04	128

Tabla 63 Resumen análisis químico de líquidos. *Control de columnas – Columna Ceres A*

Ceres B							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
05-oct	20	-	-	-	-	2,8	-
06-oct	21	-	-	-	-	3,3	-
07-oct	22	-	-	-	-	2,5	-
08-oct	23	11:08	2440	1,7	3830	2,4	-
09-oct	24	11:43	4100	3	4100	3,1	-
10-oct	25	12:15	8600	6	9200	7,0	-
11-oct	26	19:00	5000	3,6	9200	6,4	-
15-oct	29	17:00	4400	3,2	4800	3,3	-
16-oct	30	17:00	4800	3	5184	3,6	-
17-oct	31	17:00	4290	3,1	4720	3,2	-

Tabla 64 Resumen control de columnas – Columna Ceres B. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Ceres B							
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
05-oct	-	-	-	-	-	-	-
06-oct	-	-	-	-	-	-	-
07-oct	-	-	-	-	-	-	-
08-oct	7,95	8,8	2,8	1,36	681	1,18	0,31
09-oct	3,2	6,48	2,44	11,7	662	1,17	3,11
10-oct	1,48	5,78	2,02	11,2	654	1,51	0,4
11-oct	1,96	5,68	2,08	13,2	651	1,27	2,76
15-oct	1,02	6,22	1,9	13,3	648	1,21	0,66
16-oct	1,04	6,08	1,82	13,7	656	1,29	0,68
17-oct	1,06	5,9	1,84	13,7	654	1,24	0,61
18-oct	0,84	5,52	1,86	13,5	657	1,21	0,52
19-oct	0,82	3,6	1,96	14	654	1,29	0,45
20-oct	0,9	5,44	1,88	13,5	651	1,22	0,5
21-oct	1	5,3	1,8	13,4	659	1,29	0,57
22-oct	0,8	5,78	1,86	13,9	656	1,25	0,34
23-oct	0,76	5,34	1,9	13,9	655	1,21	0,36
24-oct	0,8	5,38	1,86	14,3	654	1,22	0,36
25-oct	0,74	5,66	2	14,4	655	1,19	0,37
26-oct	0,94	5,82	2,12	14,1	654	1,02	123

Tabla 65 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres B

Ceres C							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
10-oct	25	-	-	-	-	-	-
11-oct	26	19:00	2000	1,7	2000	1,3	-
13-oct	27	17:00	4100	2,9	2100	1,5	-
14-oct	28	17:00	2760	1,9	2500	1,8	-
15-oct	29	17:00	2900	2	4360	3,0	-
16-oct	30	17:00	4540	3,1	4620	3,0	-
17-oct	31	17:00	3960	2,9	4580	3,2	-
18-oct	32	17:00	4176	2,8	4630	3,0	-
19-oct	33	12:20	3700	2,5	3500	2,6	1
20-oct	34	9:33	3600	2,5	3900	2,3	-
21-oct	35	16:50	4700	3,3	7000	5,0	-
22-oct	36	17:30	4350	3	5600	3,3	-

Tabla 66 Resumen control de columnas – Columna Ceres C. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Ceres C							
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
10-oct	-	-	-	-	-	-	-
11-oct	8,7	9	3,04	13,9	656	1,23	13,27
13-oct	2,78	6,45	2,3	13,5	649	1,24	3,31
14-oct	2,52	6,96	2,2	13,3	649	1,22	3,42
15-oct	2,46	7,3	2,4	12,9	643	1,22	2,09
16-oct	1,48	6,42	2,06	13,4	653	1,29	1,02
17-oct	1,54	6,1	2,1	13,4	653	1,24	0,98
18-oct	1,4	5,72	2	13,4	654	1,22	0,86
19-oct	1,14	2,4	2,02	13,9	650	1,34	0,65
20-oct	1,2	5,7	2,06	13,4	651	1,21	0,75
21-oct	1,26	5,58	1,98	13,7	660	1,28	0,52
22-oct	1	5,56	1,92	13,8	656	1,25	0,34

Tabla 67 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres C

Ceres D							
Fecha	tiempo [días]	Hora	Volumen PLS [cm ³]	Flujo PLS [cm ³ /min]	Volumen refino [cm ³]	Flujo refino [cm ³ /min]	Compactación [cm]
12-oct	27	-	-	-	-	2,3	-
13-oct	28	-	-	-	-	2,2	-
14-oct	29	-	-	-	-	3,0	-
15-oct	30	17:00	4250	3,2	4550	3,5	-
16-oct	31	17:00	5670	2,8	5010	3,5	-
17-oct	32	17:00	3210	3,6	5150	3,4	-
18-oct	33	17:00	4600	3,2	5250	3,5	-
19-oct	34	12:20	3280	3,5	2000	2,6	2
20-oct	35	9:33	2800	2,9	2500	2,6	-
21-oct	36	16:50	3000	3	3000	3,0	-
22-oct	37	17:30	3100	2,8	3000	3,0	-
23-oct	38	10:10	1750	1,5	2000	1,9	-
24-oct	39	9:02	2200	2,5	2500	2,4	-

Tabla 68 Resumen control de columnas – Columna Ceres D. (Tiempo - Volumen PLS – Flujo PLS – Volumen refino – Flujo refino – Compactación)

Ceres D							
Fecha	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
12-oct	-	-	-	-	-	-	-
13-oct	-	-	-	-	-	-	-
14-oct	-	-	-	-	-	-	-
15-oct	7,25	9,7	2,82	13,5	654	1,18	10,35
16-oct	3,46	7,5	2,6	12,9	650	1,3	4,04
17-oct	3,9	2,66	2,6	12,7	651	1,26	4,96
18-oct	2,5	6,35	2,36	13,2	653	1,21	2,37
19-oct	1,66	2,68	2,22	13,7	649	1,33	1,32
20-oct	1,7	5,9	2,2	13,2	647	1,22	0,94
21-oct	1,72	5,82	2,24	13,3	657	1,26	0,82
22-oct	1,4	5,78	2,16	13,7	653	1,23	0,57
23-oct	1,32	5,58	2,1	13,9	650	1,22	0,44
24-oct	1,24	5,46	2,06	13,9	653	1,21	0,41

Tabla 69 Resumen análisis químico de líquidos. Control de columnas – Columna Ceres D

D-8 Resultados experimentales balance de masa columnas (Extracción y recuperación de cobre)

Hygeia		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
20	0,00	0,00
21	18,00	18,00
22	14,60	32,61
23	6,51	39,12
24	2,50	41,62
25	1,92	43,54
26	1,35	44,90
27	1,60	46,50
28	1,69	48,19
29	1,08	49,27
30	0,71	49,98
31	0,79	50,77
32	1,07	51,84
33	0,93	52,77
34	0,87	53,65
35	0,34	53,98
36	0,29	54,27
37	0,40	54,68
38	0,26	54,93
39	0,24	55,17
40	0,14	55,31

Tabla 70 Porcentaje de extracción y recuperación columna Hygeia

Vesta		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
20	0,00	0,00
21	15,82	15,82
22	13,29	29,12
23	6,14	35,25
24	4,75	40,00
25	4,20	44,20
26	2,48	46,68
27	2,35	49,04
28	2,83	51,87
29	1,74	53,61
30	1,19	54,80
31	1,50	56,30
32	1,54	57,85
33	1,09	58,93
34	0,28	59,21
35	0,42	59,64
36	0,41	60,05
37	0,43	60,48
38	0,25	60,73
39	0,21	60,94
40	0,11	61,05

Tabla 71 Porcentaje de extracción y recuperación columna Vesta

Pallas		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
20	0,00	0,00
21	27,56	27,56
25	20,80	48,35
26	2,04	50,40
27	1,69	52,08
28	1,06	53,14
29	1,12	54,26
30	0,94	55,19
31	1,43	56,62
32	0,96	57,59
33	0,68	58,26
34	0,92	59,18
35	1,00	60,18
36	0,66	60,84
37	0,24	61,08
38	0,23	61,31
39	0,26	61,57
44	0,26	61,83
45	0,11	61,94

Tabla 72 Porcentaje de extracción y recuperación columna Pallas

Ceres		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
20	0,00	0,00
21	11,37	11,37
22	15,02	26,39
23	9,72	36,11
24	4,23	40,33
25	4,07	44,41
26	2,54	46,95
27	1,91	48,86
28	1,70	50,55
29	1,30	51,86
30	1,32	53,18
31	1,07	54,25
32	1,55	55,81
33	1,46	57,27
34	1,63	58,89
35	1,37	60,27
36	1,16	61,43
37	1,18	62,62
41	2,36	64,98
42	0,27	65,25
43	0,38	65,63
44	0,27	65,91
45	0,04	65,95
46	0,48	66,42
47	0,86	67,29
48	0,64	67,93
49	0,34	68,27
50	0,48	68,75
51	0,58	69,33
52	0,57	69,89
53	0,26	70,15
54	0,38	70,53
59	0,44	70,97
60	0,20	71,17
61	0,23	71,40

Tabla 73 Porcentaje de extracción y recuperación columna Ceres

**D-9 Resultados experimentales balance de masa columnas en serie
(Extracción y recuperación de cobre)**

Ceres A		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
20	-	-
21	0,00	0,00
22	23,63	23,63
23	8,79	32,42
24	3,77	36,19
25	3,51	39,69
26	3,05	42,74
30	9,80	52,55
31	2,67	55,21
32	2,71	57,92
33	1,84	59,76
34	1,20	60,96
35	0,06	61,01
36	0,49	61,50
37	0,07	61,57
38	0,03	61,60
39	0,05	61,65

Tabla 74 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres A

Ceres B		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
22	0,00	0,00
23	32,05	32,05
24	21,56	53,61
25	12,60	66,21
26	6,16	72,37
30	2,87	75,24
31	0,52	75,76
32	1,37	77,13
33	0,21	77,35
34	0,52	77,87
35	0,18	78,05
36	0,12	78,16
37	0,30	78,46
38	0,05	78,51
39	0,29	78,80

Tabla 75 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres B

Ceres C		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
25	0,00	0,00
26	21,08	21,08
30	17,09	38,17
31	10,34	48,51
32	6,10	54,62
33	4,28	58,89
34	5,28	64,18
35	4,81	68,99
36	2,51	71,50
37	0,99	72,48
38	0,76	73,24
39	0,22	73,46

Tabla 76 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres C

Ceres D		
t [días]	%Extracción	%Recuperación
29	0,00	0,00
30	22,49	22,49
31	17,12	39,61
32	11,50	51,10
33	8,02	59,12
34	6,21	65,33
35	4,48	69,81
36	3,66	73,47
37	1,31	74,79
38	0,73	75,52
39	0,65	76,17

Tabla 77 Porcentaje de extracción y recuperación Columna Ceres D

D-10 Resultados experimentales lixiviación agitada

White							
Muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
I	1,76	5,8	2,72	10,8	610	1,24	0,16
II	1,8	6,06	2,68	10,8	604	1,24	0,22
II	1,84	6,16	2,84	11	602	1,23	0,22
IV	1,9	6,06	2,8	10,8	597	1,24	0,23
V	1,92	6,16	2,8	11	596	1,23	0,18
VI	1,92	6,3	2,82	11	595	1,23	0,2
VII	1,88	6,1	2,86	11	595	1,23	0,2
VIII	1,86	6,2	3	10,8	593	1,24	0,18
IX	1,94	6,3	2,9	11	593	1,23	0,24
X	1,9	6,2	2,88	11	590	1,23	0,23
XI	1,96	6,4	2,9	10,8	586	1,24	0,24
XII	2,06	6,6	3,08	11	585	1,23	0,3

Tabla 78 Resumen análisis de líquidos lixiviación agitada columna Hygeia

Ceres							
muestra	Cu ⁺² [g/L]	FeT [g/L]	Fe ⁺² [g/L]	acidez [g/L]	Eh [mV]	pH	Cl ⁻ [g/L]
I	1,82	6,36	2,76	8,6	590	1,35	1,56
II	1,9	6,3	2,76	8,3	587	1,37	1,58
II	1,92	6,3	2,82	8,3	586	1,37	1,58
IV	1,88	6,26	2,84	8,4	585	1,36	1,58
V	1,92	6,16	2,78	8,3	584	1,37	1,61
VI	1,94	6,2	2,88	8,4	584	1,36	1,64
VII	1,9	6,36	2,84	8,3	581	1,37	1,55
VIII	1,92	6,2	2,84	8,1	578	1,38	1,61
IX	1,84	6,16	2,76	8	579	1,39	1,61
X	1,94	6,56	2,92	8,1	577	1,38	1,65
XI	1,9	6,4	2,9	8,1	576	1,38	1,61
XII	2,04	6,6	3,12	8,1	575	1,38	1,66

Tabla 79 Resumen análisis de líquidos lixiviación agitada columna Ceres

ANEXO E

E-1. Regresión lineal modelo núcleo recesivo columnas

Hygeia			
t [días]	X_B	$1-(1-X_B)^{1/3}$	$1-3(1-X_B)^{2/3} + 2(1-X_B)$
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,18	0,0640	0,0118
2	0,33	0,1233	0,0418
3	0,39	0,1525	0,0626
4	0,42	0,1642	0,0721
5	0,44	0,1735	0,0799
6	0,45	0,1802	0,0857
7	0,46	0,1882	0,0929
8	0,48	0,1968	0,1010
9	0,49	0,2024	0,1064
10	0,50	0,2062	0,1100
11	0,51	0,2104	0,1142
12	0,52	0,2162	0,1200
13	0,53	0,2213	0,1252
14	0,54	0,2261	0,1302
15	0,54	0,2280	0,1322
16	0,54	0,2296	0,1339
17	0,55	0,2319	0,1363
18	0,55	0,2333	0,1379
19	0,55	0,2347	0,1394
20	0,55	0,2355	0,1402

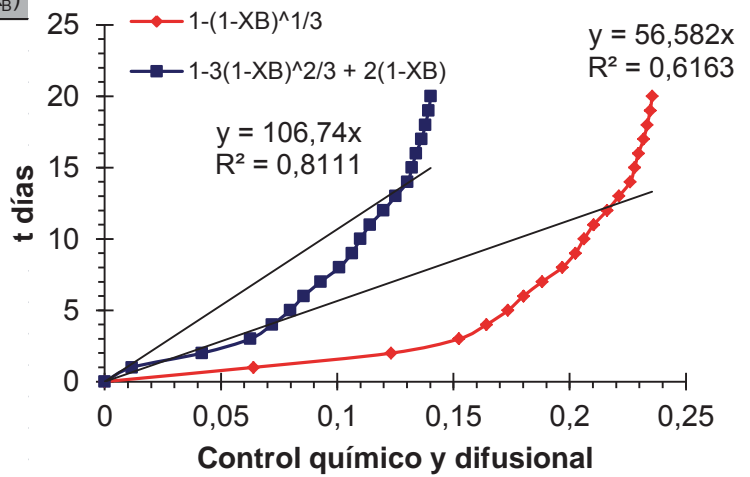


Gráfico 26 Modelo del núcleo recesivo columna Hygeia

Tabla 80 RL columna Hygeia

Vesta			
t	X _B	1-(1-X _B) ^{1/3}	1-3(1-X _B) ^{2/3} + 2(1-X _B)
0	0	0,0000	0,0000
1	0,2	0,0558	0,0090
2	0,29	0,1084	0,0327
3	0,35	0,1349	0,0497
4	0,40	0,1566	0,0659
5	0,44	0,1767	0,0827
6	0,47	0,1891	0,0938
7	0,49	0,2012	0,1052
8	0,52	0,2163	0,1202
9	0,54	0,2259	0,1300
10	0,55	0,2326	0,1371
11	0,56	0,2412	0,1464
12	0,58	0,2502	0,1565
13	0,59	0,2567	0,1639
14	0,59	0,2584	0,1658
15	0,6	0,2610	0,1688
16	0,6	0,2635	0,1717
17	0,6	0,2662	0,1748
18	0,6	0,2677	0,1767
19	0,6	0,2690	0,1782
20	0,6	0,2697	0,1790

Tabla 81 RL columna Vesta

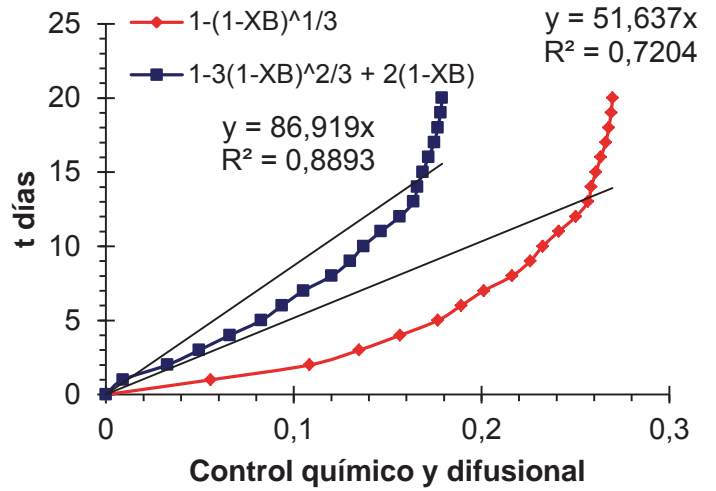


Gráfico 27 MNR columna Vesta

Pallas			
t	X _B	1-(1-X _B) ^{1/3}	1-3(1-X _B) ^{2/3} + 2(1-X _B)
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,28	0,1019	0,0290
5	0,48	0,1977	0,1018
6	0,50	0,2084	0,1122
7	0,52	0,2175	0,1213
8	0,53	0,2233	0,1273
9	0,54	0,2295	0,1338
10	0,55	0,2348	0,1395
11	0,57	0,2430	0,1485
12	0,58	0,2487	0,1547
13	0,58	0,2527	0,1593
14	0,59	0,2582	0,1656
15	0,60	0,2643	0,1726
16	0,61	0,2684	0,1774
17	0,61	0,2699	0,1792
18	0,61	0,2713	0,1809
19	0,62	0,2730	0,1829
24	0,62	0,2746	0,1848
25	0,62	0,2753	0,1856

Tabla 82 RL columna Pallas

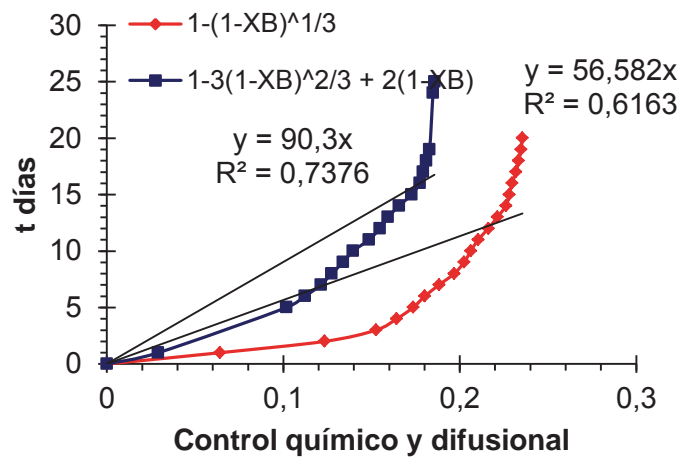


Gráfico 28 MNR columna Pallas

Ceres			
t	X _B	1-(1-X _B) ^{1/3}	1-3(1-X _B) ^{2/3} + 2(1-X _B)
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,11	0,0394	0,0045
2	0,26	0,0971	0,0264
3	0,36	0,1387	0,0524
4	0,40	0,1581	0,0671
5	0,44	0,1777	0,0835
6	0,47	0,1905	0,0950
7	0,49	0,2003	0,1043
8	0,51	0,2092	0,1130
9	0,52	0,2162	0,1201
10	0,53	0,2235	0,1275
11	0,54	0,2295	0,1338
12	0,56	0,2383	0,1433
13	0,57	0,2468	0,1526
14	0,59	0,2565	0,1636
15	0,60	0,2648	0,1733
16	0,61	0,2721	0,1818
17	0,63	0,2796	0,1908
21	0,65	0,2951	0,2099
22	0,65	0,2969	0,2122
23	0,66	0,2995	0,2154
24	0,66	0,3014	0,2178
25	0,66	0,3017	0,2181
26	0,66	0,3050	0,2223
27	0,67	0,3110	0,2300
28	0,68	0,3155	0,2358
29	0,68	0,3179	0,2390
30	0,69	0,3214	0,2435
31	0,69	0,3256	0,2490
32	0,70	0,3298	0,2545
33	0,70	0,3317	0,2571
34	0,71	0,3345	0,2609
39	0,71	0,3379	0,2653
40	0,71	0,3394	0,2674
41	0,71	0,3411	0,2697

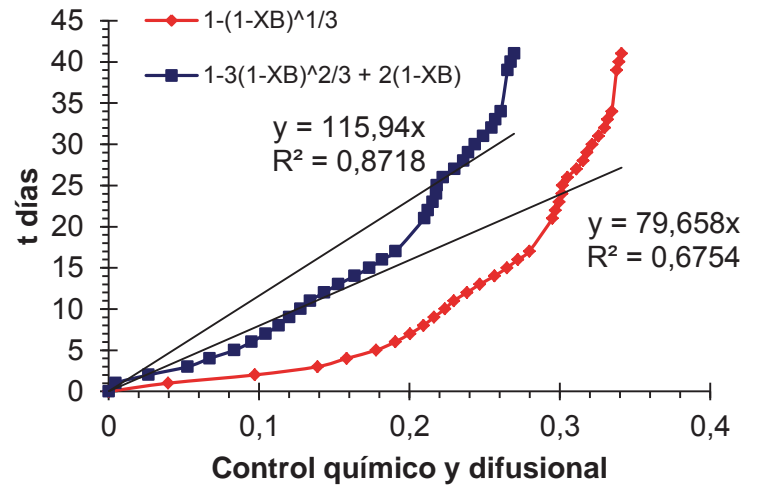


Gráfico 29 MNR columna Ceres

Tabla 83 RL columna Ceres

E-2. Regresión lineal modelo núcleo recesivo C. Ceres en serie

A continuación se aprecia la regresión lineal aplicando el modelo del núcleo recesivo a los resultados de la columna Ceres en serie, donde el modelo se ajusta de mejor manera al control difusional en cada una de las secciones lixiviadas.

Ceres A			
t [días]	X _B	1-(1-X _B) ^{1/3}	1-3(1-X _B) ^{2/3} + 2(1-X _B)
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,24	0,0859	0,0209
2	0,32	0,1224	0,0413
3	0,36	0,1391	0,0526
4	0,40	0,1551	0,0647
5	0,43	0,1696	0,0766
9	0,53	0,2200	0,1239
10	0,55	0,2349	0,1396
11	0,58	0,2507	0,1570
12	0,60	0,2617	0,1696
13	0,61	0,2691	0,1783
14	0,61	0,2695	0,1787
15	0,62	0,2726	0,1824
16	0,62	0,2730	0,1829
17	0,62	0,2732	0,1831
18	0,62	0,2735	0,1835

Tabla 84 RL columna Ceres A

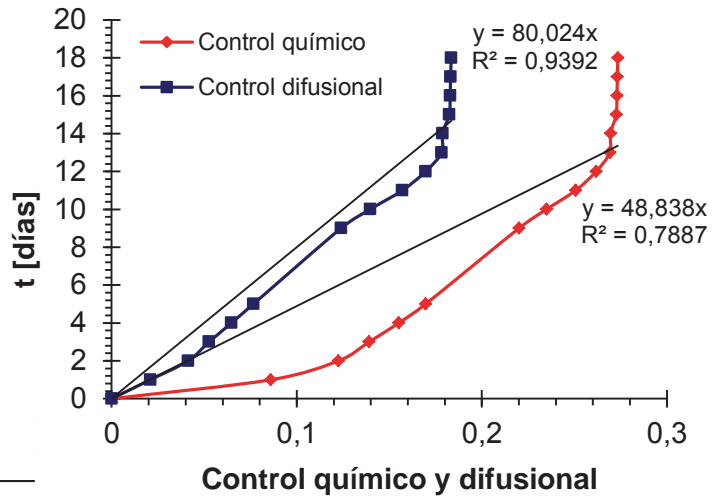


Gráfico 30 MNR columna Ceres A

Ceres B			
t [días]	X _B	1-(1-X _B) ^{1/3}	1-3(1-X _B) ^{2/3} + 2(1-X _B)
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,32	0,1208	0,0403
2	0,54	0,2259	0,1300
3	0,66	0,3035	0,2204
4	0,72	0,3487	0,2799
8	0,75	0,3721	0,3123
9	0,76	0,3765	0,3186
10	0,77	0,3885	0,3355
11	0,77	0,3904	0,3382
12	0,78	0,3951	0,3450
13	0,78	0,3967	0,3473
14	0,78	0,3978	0,3489
15	0,78	0,4006	0,3528
16	0,79	0,4010	0,3535
17	0,79	0,4038	0,3574

Tabla 85 RL columna Ceres B

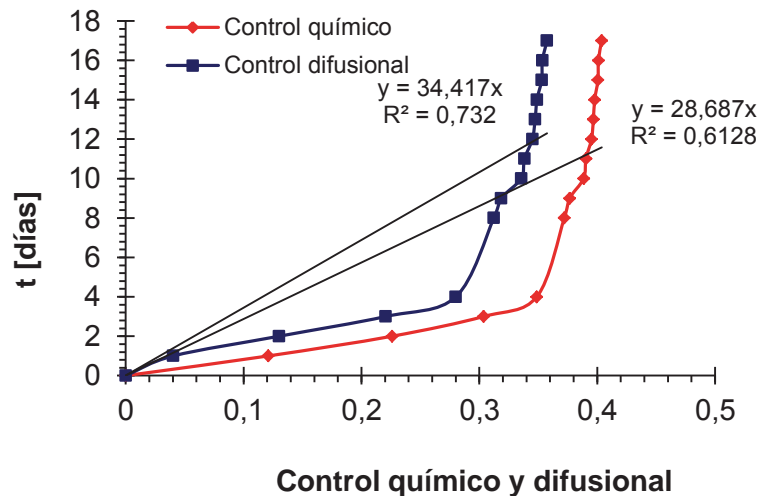


Gráfico 31 MNR columna Ceres B

Ceres C			
t [días]	X_B	$1-(1-X_B)^{1/3}$	$1-3(1-X_B)^{2/3} + 2(1-X_B)$
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,21	0,0000	0,0403
5	0,38	0,2259	0,1300
6	0,49	0,3035	0,2204
7	0,55	0,3487	0,0000
8	0,59	0,3721	0,3123
9	0,64	0,3765	0,3186
10	0,69	0,3885	0,3355
11	0,71	0,3904	0,3382
12	0,72	0,3951	0,3450
13	0,73	0,3967	0,3473
14	0,73	0,3978	0,3489

Tabla 86 RL columna Ceres C

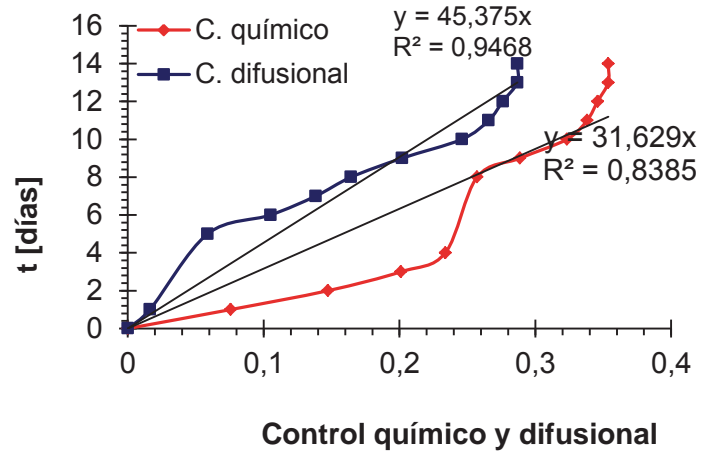


Gráfico 32 MNR columna Ceres C

Ceres D			
t [días]	X_B	$1-(1-X_B)^{1/3}$	$1-3(1-X_B)^{2/3} + 2(1-X_B)$
0	0,00	0,0000	0,0000
1	0,22	0,0814	0,0188
2	0,40	0,1547	0,0644
3	0,51	0,2122	0,1160
4	0,59	0,2578	0,1651
5	0,65	0,2975	0,2128
6	0,70	0,3292	0,2537
7	0,73	0,3575	0,2920
8	0,75	0,3683	0,3070
9	0,76	0,3744	0,3156
10	0,76	0,3800	0,3235

Tabla 87 RL columna Ceres D

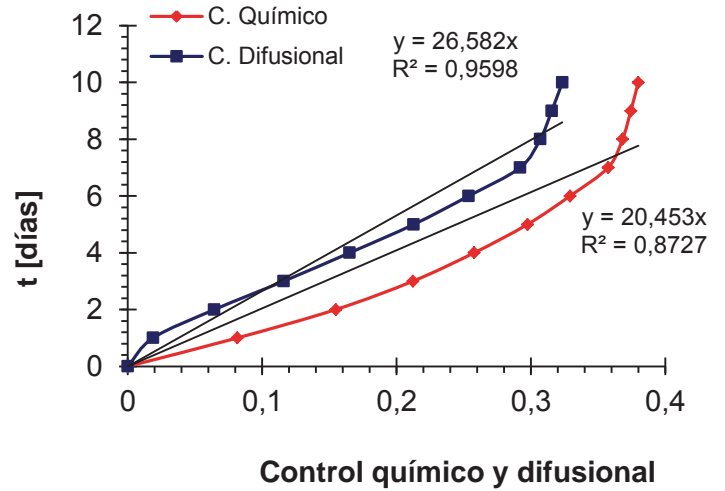


Gráfico 33 MNR columna Ceres D