



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas

**ESTUDIO DE SURFACTANTES C-F EN LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE
COBRE**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Metalurgia

NELSON SEBASTIAN HERRERA NÚÑEZ

Profesor guía: Dr. Gerardo Fuentes Cáceres

**Antofagasta, Chile
2012**

DEDICATORIA

A mis padres Pilar y Víctor junto a mi hermana Alexandra que me han acompañado en este largo camino ya que sin su apoyo y amor esto no sería posible. Los amo.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco en primer lugar a mis padres por estar siempre en las buenas y malas; por su paciencia, confianza y en darnos la oportunidad de cumplir nuestro sueños tanto a mi hermana como a mí. Este logro es tanto de ustedes como mío.

A Lorena por ayudarme en las etapas finales de este proyecto. Por su apoyo y amor. Te amo.

A David Torres, Norman Toro, Samuel Viza y Gonzalo Solar que gracias a su dedicación fueron claves para lograr los objetivos de este proyecto.

A Felipe, Víctor G., Tania, Ricardo, Luis, Camilo, Víctor Q., Evelyn, Nanette, Andrea y Larry por todo el apoyo incondicional.

A la Dra. Lilian Velásquez, Dra. María Cecilia Hernández, Dr. Oscar Benavente y a mi tutor Dr. Gerardo Fuentes por cada enseñanza, consejo, apoyo y respaldo entregado. Cada uno de ustedes hizo que este trabajo tomara forma y sea lo que es ahora.

Finalmente gracias a 3M Chile por el financiamiento y confianza entregada y a la Universidad Católica del Norte por facilitar la infraestructura para el desarrollo de la investigación.

ÍNDICE

| | Pág. |
|---|-----------|
| NOMENCLATURA | 16 |
| RESUMEN | 17 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 18 |
| 1.1. ANTECEDENTES GENERALES | 19 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.2.1. <i>Objetivo general</i> | 20 |
| 1.2.2. <i>Objetivos secundarios</i> | 20 |
| 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS | 21 |
| 2.1. LIXIVIACIÓN | 21 |
| 2.1.1. <i>Lixiviación en pilas</i> | 22 |
| 2.1.2. <i>Balance en una etapa lixiviante</i> | 25 |
| 2.1.2.1. Sólido a lixiviar..... | 26 |
| 2.1.2.2. Solvente..... | 26 |
| 2.1.2.3. Sólido lixiviado..... | 26 |
| 2.1.2.4. Solución de lixiviación..... | 26 |
| 2.2. FISICOQUÍMICA DE SUPERFICIES | 28 |
| 2.2.1. <i>Tensión superficial</i> | 29 |
| 2.2.1.1. Cálculo de la tensión superficial | 30 |
| 2.2.1.2. Propiedades de la tensión superficial | 31 |
| 2.2.2. <i>Fuerzas de atracción y repulsión entre moléculas</i> | 32 |
| 2.2.2.1. Fuerza dipolo-dipolo | 32 |
| 2.2.2.2. Fuerzas de Van der Waals | 33 |
| 2.2.2.3. Puente de hidrógeno o enlace de hidrógeno | 33 |
| 2.2.2.4. Fuerza ión-dipolo..... | 34 |
| 2.3. TENSOACTIVOS | 35 |
| 2.3.1. <i>Clasificación de los tensoactivos</i> | 36 |
| 2.3.1.1. Tensoactivos iónicos | 37 |
| 2.3.1.1.1. Tensoactivos aniónicos | 37 |
| 2.3.1.1.2. Tensoactivos catiónicos | 37 |
| 2.3.1.1.3. Tensoactivos anfóteros ó anfotéricos..... | 38 |
| 2.3.1.2. Tensoactivos No-iónicos..... | 38 |
| 2.4. SURFACTANTES FLUOROCARBONADOS EN LA LIXIVIACIÓN DE METALES | 38 |
| 2.4.1. TENSOACTIVOS FLUOROCARBONADOS PARA LIXIVIACIÓN DE COBRE | 41 |
| 2.4.1.1. Propiedades químicas | 42 |
| 3. INVESTIGACIONES PREVIAS | 44 |
| 3.1. EVALUACIÓN EN COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN POR MAGMA COPPER CO..... | 44 |
| 3.2. EVALUACIÓN DE EXTRACCIÓN DE COBRE EN PILAS DE LIXIVIACIÓN | 46 |
| 3.3. MEDICIONES FISICOQUÍMICAS EN PRESENCIA DE SURFACTANTE | 47 |
| 3.4 EVALUACIÓN DE CUBIERTA DE ESTUCO PARA AGLOMERACIÓN DE MINERALES PARA LIXIVIACIÓN EN PILAS | 49 |

| | |
|---|-----------|
| 3.5. POLIACRILAMIDA COMO ADITIVO DE AGLOMERACIÓN PARA LIXIVIACIÓN EN PILAS | 53 |
| 3.5. LIXIVIACIÓN DE ORO EN PRESENCIA DE AGENTES SURFACTANTES FLUOROCARBONADOS | 59 |
| 3.5.1. <i>Surfactantes utilizados</i> | 60 |
| 4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN | 63 |
| 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL..... | 65 |
| 4.1. AGLOMERACIÓN Y CURADO DE MUESTRAS | 65 |
| 4.1.1. <i>Preparación de solución aglomerante</i> | 67 |
| 4.1.2. <i>Procedimiento de aglomerado y curado</i> | 68 |
| 4.2. PRUEBAS ISO-PH | 69 |
| 4.2.1. <i>Procedimiento de pruebas ISO-pH</i> | 71 |
| 4.3. PRUEBAS EN COLUMNAS..... | 73 |
| 4.3.1. <i>Características de pruebas columnares</i> | 75 |
| 4.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS SOLUCIONES ACUOSAS | 76 |
| 4.4.1. <i>Análisis Químico</i> | 76 |
| 4.4.2. <i>Densidad</i> | 76 |
| 4.4.3. <i>Viscosidad</i> | 77 |
| 4.4.4. <i>Tensión superficial</i> | 79 |
| 4.4.5. <i>Concentración micelar crítica (CMC)</i> | 81 |
| 4.5. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS MINERALES | 82 |
| 4.5.1. <i>Análisis Granulométrico</i> | 83 |
| 4.5.2. <i>Análisis Químico</i> | 83 |
| 4.5.3. <i>Difracción de Rayos X</i> | 84 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES | 86 |
| 5.1. CARACTERIZACIÓN DE SURFACTANTES | 86 |
| 5.1.1. <i>Mediciones de densidad</i> | 86 |
| 5.1.2. <i>Mediciones de viscosidad</i> | 87 |
| 5.1.3. <i>Tensión superficial</i> | 88 |
| 5.1.4. <i>Concentración micelar crítica</i> | 88 |
| 5.2. CARACTERIZACIÓN DE MINERALES | 91 |
| 5.2.1. <i>Análisis de mineral oxidado de cobre</i> | 92 |
| 5.2.2. <i>Análisis de mineral mixto de cobre</i> | 94 |
| 5.2.3. <i>Análisis de mineral sulfurado de cobre</i> | 95 |
| 5.2.4. <i>Análisis Químico</i> | 97 |
| 5.2.4.1. Mineral Oxidado de Cobre | 98 |
| 5.2.4.2. Mineral Mixto | 102 |
| 5.2.4.3. Mineral Sulfurado de Cobre | 105 |
| 5.3. PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN DE MINERALES | 109 |
| 5.3.1. <i>Pruebas de lixiviación ISO-pH</i> | 109 |
| 5.3.1.1. Mineral Oxidado de Cobre | 109 |
| 5.3.1.2. Mineral Mixto | 114 |
| 5.3.1.3. Mineral Sulfurado de Cobre | 118 |
| 5.3.2. <i>Lixiviación en columnas</i> | 123 |
| 5.3.2.1. Aglomeración de minerales | 124 |
| 5.3.2.2. Mineral Oxidado de Cobre | 126 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.3.2.3. | Mineral mixto de cobre | 130 |
| 5.3.2.4. | Mineral sulfurado de cobre | 135 |
| 5.4. | <i>Análisis por difracción de rayos X</i> | 139 |
| 5.4.1. | Difracción de rayos X de muestra de minerales oxidados | 139 |
| 5.4.2. | Difracción de rayos X de muestras mixtas | 141 |
| 5.4.3. | Difracción de rayos X de muestras sulfuradas | 143 |
| 5.5. | MEDICIÓN DE PH Y POTENCIAL DE LA SOLUCIÓN (EH) | 145 |
| 5.5.1. | <i>Mineral oxidado de cobre</i> | 145 |
| 5.5.2. | <i>Mineral mixto de cobre</i> | 148 |
| 5.5.3. | <i>Mineral sulfurado de cobre</i> | 151 |
| 5.6. | TENSIÓN SUPERFICIAL, DENSIDAD Y CONSUMO DE ÁCIDO | 155 |
| 5.6.1. | <i>Mineral oxidado de cobre</i> | 155 |
| 5.6.2. | <i>Mineral mixto</i> | 160 |
| 5.6.3. | <i>Mineral sulfurado de cobre</i> | 165 |
| 5.7. | VISCOSIDAD | 169 |
| 5.7.1. | <i>Mineral Oxidado de Cobre</i> | 169 |
| 5.8. | COMPARACIÓN SURFACTANTES C-F/C-H | 173 |
| 5.8.1. | <i>Disolución de cobre en presencia de surfactante C-H</i> | 174 |
| 5.8.2. | <i>Densidad, tensión superficial y viscosidad</i> | 175 |
| 5.9. | PRUEBAS COLUMNARES CON RECIRCULACIÓN | 177 |
| 5.9.1. | <i>Disolución de Columna con surfactante C-H</i> | 178 |
| 5.9.2. | <i>Densidad, tensión superficial y viscosidad</i> | 180 |
| 6. | CONCLUSIONES | 183 |
| 6.1. | CONCLUSIONES GENERALES | 183 |
| 6.2. | MINERAL OXIDADO DE COBRE | 183 |
| 6.3. | MINERAL MIXTO DE COBRE | 185 |
| 6.4. | MINERAL SULFURADO DE COBRE | 185 |
| 7. | RECOMENDACIONES | 187 |
| 8. | BIBLIOGRAFIA | 188 |
| ANEXO A | | 192 |
| Anexo A.1: | <i>Análisis granulométricos ripios pruebas ISO-pH</i> | 193 |
| Anexo A.2: | <i>Análisis granulométricos ripios pruebas columnas unitarias</i> | 196 |
| Anexo A.3: | <i>Análisis granulométricos pruebas columnas unitarias con recirculación</i> .. | 199 |
| ANEXO B | | 200 |
| Anexo B.1: | <i>Tabla datos pruebas de lixiviación ISO-pH</i> | 201 |
| Anexo B.2: | <i>Tabla datos pruebas de lixiviación columnas unitarias</i> | 207 |
| Anexo B.3: | <i>Tabla datos pruebas de lixiviación columnas unitarias con recirculación</i> | 214 |
| Anexo B.4: | <i>Balance de masa pruebas de lixiviación ISO-pH</i> | 215 |
| Anexo B.5: | <i>Balance de masa pruebas de lixiviación columnas unitarias</i> | 216 |
| Anexo B.6: | <i>Balance de masa pruebas de lixiviación columnas unitarias recirculación</i> | 218 |
| ANEXO C | | 219 |
| Anexo C.1: | <i>Tabla de pH y potencial (Eh) pruebas de lixiviación columnas unitarias</i> .. | 220 |
| ANEXO D | | 223 |

| | |
|---|------------|
| <i>Anexo D.1: Difracción de rayos X muestras de cabeza y ripios</i> | <i>224</i> |
| <i>Anexo D.2: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido pruebas columnas unitarias</i> | <i>229</i> |
| <i>Anexo D.3: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido pruebas de lixiviación Columnar unitaria con recirculación</i> | <i>236</i> |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| TABLA 1: COMPARACIÓN ENTRE LIXIVIACIONES EN PILA (DOMIC, 2001)..... | 24 |
| TABLA 2: MINERALOGÍA DE MUESTRAS MINERALES UTILIZADAS EN PRUEBAS DE AGLOMERACIÓN | 50 |
| TABLA 3: ANÁLISIS MINERALÓGICO DE MUESTRAS A LIXIVIAR..... | 54 |
| TABLA 4: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MUESTRAS MINERALES | 55 |
| TABLA 5: TENSIÓN SUPERFICIAL EN PRESENCIA DE DIFERENTES SURFACTANTES... .. | 62 |
| TABLA 6: CONDICIONES DE AGLOMERACIÓN PARA PRUEBAS EN COLUMNAS E ISO-PH | 66 |
| TABLA 7: CÁLCULO DE DOSIFICACIÓN PARA SOLUCIONES INICIALES | 67 |
| TABLA 8: CONDICIONES DE AGLOMERACIÓN PARA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN | 68 |
| TABLA 9: CONDICIONES OPERACIONALES DE PRUEBAS ISO-PH | 70 |
| TABLA 10: CONDICIONES OPERACIONALES DE PRUEBAS COLUMNARES | 74 |
| TABLA 11: CARACTERÍSTICAS DE BOLITAS DE VISCOSÍMETRO DE GILMONT | 79 |
| TABLA 12: RESULTADOS DE PICNOMETRÍA REALIZADAS A SURFACTANTES | 86 |
| TABLA 13: RESULTADOS DE MEDICIÓN DE VISCOSIDAD A CADA SURFACTANTE..... | 87 |
| TABLA 14: TENSIÓN SUPERFICIAL A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SURFACTANTE..... | 88 |
| TABLA 15: CMC REALIZADA A PRODUCTOS SURFACTANTES..... | 89 |
| TABLA 16: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MINERAL OXIDADO | 93 |
| TABLA 17: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MINERAL MIXTO. | 94 |
| TABLA 18: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL MINERAL SULFURADO DE COBRE..... | 96 |
| TABLA 19: ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS MINERALES HECHO POR MINERA ZALDÍVAR..... | 97 |
| TABLA 20: ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS DE MINERAL OXIDADO..... | 98 |
| TABLA 21: ANÁLISIS DE COBRE TOTAL Y SOLUBLE FINO EN MINERAL OXIDADO. | 99 |
| TABLA 21: INFORMACIÓN DE LEYES POR MALLA DE MINERAL OXIDADO..... | 101 |
| TABLA 23: LEYES DE COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE DEL MINERAL OXIDADO..... | 101 |
| TABLA 24: ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS DE MINERAL MIXTO..... | 102 |
| TABLA 25: ANÁLISIS DE COBRE TOTAL Y SOLUBLE FINO EN MINERAL MIXTO..... | 103 |
| TABLA 26: INFORMACIÓN DE LEYES POR MALLA DE MINERAL MIXTO..... | 105 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 27: LEYES DE COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE DEL MINERAL MIXTO..... | 105 |
| TABLA 28: ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS DE MINERAL SULFURADO..... | 106 |
| TABLA 29: ANÁLISIS DE COBRE TOTAL Y SOLUBLE FINO EN MINERAL SULFURADO.. | 107 |
| TABLA 30: INFORMACIÓN DE LEY DE COBRE POR MALLA DE MINERAL MIXTO..... | 108 |
| TABLA 31: LEYES DE COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE DEL MINERAL SULFURADO | 108 |
| TABLA 32: ESPECIES MINERALÓGICAS DE COBRE EN MINERAL OXIDADO PARA DIFERENTE FRACCIÓN OBTENIDAS POR DRX. | 140 |
| TABLA 33: ESPECIES MINERALÓGICAS DE COBRE EN RIPIOS DE MINERAL OXIDADO PARA DIFERENTE FRACCIÓN OBTENIDAS POR DRX..... | 140 |
| TABLA 34: ESPECIES MINERALÓGICAS DE COBRE EN MINERAL MIXTO PARA DIFERENTE FRACCIÓN OBTENIDAS POR DRX. | 141 |
| TABLA 35: ESPECIES MINERALÓGICAS DE COBRE EN RIPIOS DE MINERAL MIXTO PARA DIFERENTE FRACCIÓN OBTENIDAS POR DRX. | 142 |
| TABLA 36: ESPECIES MINERALÓGICAS DE COBRE EN MINERAL SULFURADO PARA DIFERENTE FRACCIÓN OBTENIDAS POR DRX. | 143 |
| TABLA 37: ESPECIES MINERALÓGICAS DE COBRE EN RIPIOS DE MINERAL SULFURADO PARA DIFERENTE FRACCIÓN OBTENIDAS POR DRX..... | 143 |
| TABLA 38: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL OXIDO..... | 193 |
| TABLA 39: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL MIXTO..... | 194 |
| TABLA 40: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL SULFURO..... | 195 |
| TABLA 41: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL OXIDO..... | 196 |
| TABLA 42: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL MIXTO..... | 197 |
| TABLA 43: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL SULFURO..... | 198 |
| TABLA 44: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS MINERAL OXIDO..... | 199 |
| TABLA 45: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL OXIDO..... | 201 |
| TABLA 46: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL MIXTO..... | 203 |
| TABLA 47: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL SULFURO..... | 205 |
| TABLA 48: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL OXIDO..... | 207 |
| TABLA 49: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL MIXTO..... | 209 |
| TABLA 50: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL SULFURO..... | 212 |
| TABLA 51: TABLA DE DATOS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN MINERAL OXIDO..... | 214 |
| TABLA 52: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ISO-PH MINERAL OXIDO... | 215 |
| TABLA 53: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ISO-PH MINERAL MIXTO... | 215 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 54: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ISO-PH MINERAL SULFURO | 216 |
| TABLA 55: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS MINERAL ÓXIDO | 216 |
| TABLA 56: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS MINERAL MIXTO | 217 |
| TABLA 57: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS MINERAL SULFURO | 217 |
| TABLA 58: BALANCE DE MASA PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS MINERAL ÓXIDO CON RECIRCULACIÓN | 218 |
| TABLA 59: TABLA DE PH Y POTENCIAL (EH) PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS UNITARIAS MINERAL ÓXIDO | 220 |
| TABLA 60: TABLA DE PH Y POTENCIAL (EH) PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS UNITARIAS MINERAL MIXTO..... | 221 |
| TABLA 61: TABLA DE PH Y POTENCIAL (EH) PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN COLUMNAS UNITARIAS MINERAL SULFURO..... | 222 |
| TABLA 62: DIFRACCIÓN DE RAYOS X MUESTRA DE CABEZA ÓXIDO | 224 |
| TABLA 63: DIFRACCIÓN DE RAYOS X MUESTRA DE CABEZA MIXTO | 224 |
| TABLA 64: DIFRACCIÓN DE RAYOS X MUESTRA DE CABEZA SULFURO..... | 225 |
| TABLA 65: DIFRACCIÓN DE RAYOS X MUESTRA RIPIO ÓXIDO | 226 |
| TABLA 66: DIFRACCIÓN DE RAYOS X MUESTRA RIPIO MIXTO | 227 |
| TABLA 67: DIFRACCIÓN DE RAYOS X MUESTRA RIPIO SULFURO | 228 |
| TABLA 68: DENSIDAD, TENSIÓN SUPERFICIAL, VISCOSIDAD Y CONSUMO DE ÁCIDO MINERAL ÓXIDO PRUEBAS COLUMNAS UNITARIAS | 229 |
| TABLA 69: DENSIDAD, TENSIÓN SUPERFICIAL, VISCOSIDAD Y CONSUMO DE ÁCIDO MINERAL MIXTO PRUEBAS COLUMNAS UNITARIAS..... | 232 |
| TABLA 70: DENSIDAD, TENSIÓN SUPERFICIAL, VISCOSIDAD Y CONSUMO DE ÁCIDO MINERAL SULFURO PRUEBAS COLUMNAS UNITARIAS..... | 234 |
| TABLA 71: DENSIDAD, TENSIÓN SUPERFICIAL, VISCOSIDAD Y CONSUMO DE ÁCIDO MINERAL ÓXIDO PRUEBAS COLUMNAS UNITARIAS CON RECIRCULACIÓN | 236 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| FIGURA 1: LIXIVIACIÓN EN PILAS DINÁMICAS (MINERA SPENCE S.A.)..... | 23 |
| FIGURA 2: BALANCE DE UNA OPERACIÓN DE LIXIVIACIÓN | 25 |
| FIGURA 3: ESQUEMA DE CARACTERIZACIÓN EN UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN | 27 |
| FIGURA 4: DOS FASES EN CONTACTO ALFA Y BETA A TRAVÉS DE UNA INTERFASE SIGMA (CASTELLAN, 1992). | 28 |
| FIGURA 5: PUENTE DE HIDROGENO ENTRE DOS MOLÉCULAS DE AGUA..... | 34 |
| FIGURA 6: CAPA SUPERFICIAL DE UN TENSOACTIVO SOBRE UNA SUPERFICIE DE AGUA | 35 |
| FIGURA 7: ESTRUCTURAS POLAR Y NO POLAR PRESENTES EN UN TENSOACTIVO | 36 |
| FIGURA 8: MOLÉCULA DE SULFONATO DE SODIO | 37 |
| FIGURA 9: PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE COBRE POR FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS EN PILAS. (MAGMA INC., 1991). | 45 |
| FIGURA 10: MEDICIÓN DE CAPILARIDAD A DIFERENTES DOSIS DE SURFACTANTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (OLAVE, 1998). | 47 |
| FIGURA 11: SIMULACIÓN DEL EFECTO DE SURFACTANTE SOBRE EL ÁNGULO DE CONTACTO DE SOLUCIÓN EN PARTÍCULAS FINAS. (HELLER, 2000). | 49 |
| FIGURA 12: ALIMENTACIÓN, MEZCLADOR DE CEMENTO Y MATERIAL AGLOMERADO . | 50 |
| FIGURA 13: INSPECCIÓN VISUAL DE LOS RESULTADOS DE DIFERENTES PRUEBAS DE AGLOMERACIÓN | 51 |
| FIGURA 14: COMPARACIÓN EN RECUPERACIÓN DE COBRE DESDE COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN CON AGLOMERADO | 52 |
| FIGURA 15: FOTOGRAFÍAS DE AGLOMERADOS SIN PRESENCIA DE ESTUCO (IZQUIERDA) Y PRESENCIA DE ESTUCO (DERECHA)..... | 53 |
| FIGURA 16: TEST DE HUMEDAD CON SOLUCIÓN ACIDA | 55 |
| FIGURA 17: DISMINUCIÓN DE PORCENTAJES DE MIGRACIÓN DE FINOS CON DIFERENTES PRODUCTOS | 57 |
| FIGURA 18: POTENCIAL Z DE PRUEBAS DE HUMEDAD PARA DIFERENTES FRACCIONES MINERALES | 58 |
| FIGURA 19: CADENA DE POLIACRILAMIDA CON ENLACES DE HIDROGENO (IZQUIERDA) Y CADENA DE ACETATO POLIVINILICO SIN ENLACES DISPONIBLES PARA ÁTOMOS DE HIDROGENO (DERECHA) | 59 |
| FIGURA 20: MEDICIÓN DE PH EN SOLUCIONES CON PRESENCIA DE DIFERENTES SURFACTANTES | 62 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 21: AGLOMERACIÓN DE MUESTRAS MINERALES | 66 |
| FIGURA 22: PRUEBA DE LIXIVIACIÓN ISO-PH | 71 |
| FIGURA 23: PRUEBAS COLUMNARES DE LIXIVIACIÓN | 75 |
| FIGURA 24: PICNÓMETRO Y BALANZA ANALÍTICA PARA MEDICIÓN DE DENSIDAD..... | 77 |
| FIGURA 25: VISCOSÍMETRO DE GILMONT. | 78 |
| FIGURA 26: TENSÍOMETRO DE DUNOUY | 80 |
| FIGURA 27: GRÁFICO DE CMC REALIZADA A PRODUCTOS SURFACTANTES CF. | 90 |
| FIGURA 28: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN RO-TAP | 92 |
| FIGURA 29: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MINERAL OXIDADO DE COBRE..... | 93 |
| FIGURA 30: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MINERAL MIXTO DE COBRE. | 95 |
| FIGURA 31: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE MINERAL SULFURADO DE COBRE. | 96 |
| FIGURA 32: GRÁFICA DE LEY DE COBRE PRESENTE EN MINERAL OXIDADO. | 99 |
| FIGURA 33: COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE FINO PRESENTE EN MINERAL OXIDADO. | 100 |
| FIGURA 34: GRÁFICA DE LEY DE COBRE PRESENTE EN EL MINERAL MIXTO. | 103 |
| FIGURA 35: COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE FINO PRESENTE EN EL MINERAL MIXTO. | 104 |
| FIGURA 36: GRÁFICA DE LEY DE COBRE PRESENTE EN MINERAL SULFURADO..... | 106 |
| FIGURA 37: COBRE TOTAL Y COBRE SOLUBLE FINO PRESENTE EN MINERAL SULFURADO. | 107 |
| FIGURA 38: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L- 15767. | 110 |
| FIGURA 39: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L- 20886. | 111 |
| FIGURA 40: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L- 21199. | 111 |
| FIGURA 41: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 20 PPM. | 112 |
| FIGURA 42: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 50 PPM. | 113 |
| FIGURA 43: COMPARACIÓN DE DISOLUCIONES EN MINERAL OXIDADO CON DIFERENTES SURFACTANTES. | 113 |
| FIGURA 44: DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L- 15767. | 114 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 45: DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-20886. | 115 |
| FIGURA 46: DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-21199. | 116 |
| FIGURA 47: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 20 PPM. | 116 |
| FIGURA 48: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 50 PPM. | 117 |
| FIGURA 49: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE COBRE EN MINERAL MIXTO CON DIFERENTES SURFACTANTES. | 118 |
| FIGURA 50: DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-15767. | 119 |
| FIGURA 51: DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-20886. | 119 |
| FIGURA 52: DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-21199. | 120 |
| FIGURA 53: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 20 PPM. | 121 |
| FIGURA 54: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 50 PPM. | 122 |
| FIGURA 55: COMPARACIÓN DE EXTRACCIONES DE COBRE EN MINERAL SULFURADO CON DIFERENTES SURFACTANTES. | 122 |
| FIGURA 56: AGLOMERACIÓN DE MINERAL SIN SURFACTANTE (1), 20 PPM (2) Y 50 PPM (3) DE SURFACTANTE L-20886. | 124 |
| FIGURA 57: AGLOMERACIÓN DE MINERAL OXIDADO DE COBRE CON UNA DOSIFICACIÓN DE 20 PPM DE L-15767. | 125 |
| FIGURA 58: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-15767. | 126 |
| FIGURA 59: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-20886. | 127 |
| FIGURA 60: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-21199. | 127 |
| FIGURA 61: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 20 PPM. | 128 |
| FIGURA 62: COMPARACIÓN DE DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 50 PPM. | 129 |
| FIGURA 63: COMPARACIÓN DE EXTRACCIONES DE COBRE EN MINERAL OXIDADO CON DIFERENTES SURFACTANTES. | 129 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 64: DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-15767. | 130 |
| FIGURA 65: DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-20886. | 131 |
| FIGURA 66: DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-21199. | 132 |
| FIGURA 67: COMPARACIÓN DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 20 PPM. | 132 |
| FIGURA 68: COMPARACIÓN DISOLUCIÓN DE MINERAL MIXTO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 50 PPM. | 133 |
| FIGURA 69: COMPARACIÓN DE EXTRACCIONES DE COBRE EN MINERAL MIXTO CON DIFERENTES SURFACTANTES. | 134 |
| FIGURA 70: DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-15767. | 135 |
| FIGURA 71: DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-20886. | 136 |
| FIGURA 72: DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO EN PRESENCIA DE SURFACTANTE L-21199. | 136 |
| FIGURA 73: COMPARACIÓN DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 20 PPM. | 137 |
| FIGURA 74: COMPARACIÓN DISOLUCIÓN DE MINERAL SULFURADO CON DIFERENTES SURFACTANTES A 50 PPM. | 138 |
| FIGURA 75: COMPARACIÓN DE EXTRACCIONES DE COBRE EN MINERAL SULFURADO CON DIFERENTES SURFACTANTES. | 138 |
| FIGURA 76: MEDICIÓN DE PH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL OXIDADO A 20 PPM. | 145 |
| FIGURA 77: MEDICIÓN DE EH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL OXIDADO A 20 PPM. | 146 |
| FIGURA 78: MEDICIÓN DE PH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL OXIDADO A 50 PPM. | 147 |
| FIGURA 79: MEDICIÓN DE EH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL OXIDADO A 50 PPM. | 147 |
| FIGURA 80: MEDICIÓN DE PH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL MIXTO A 20 PPM. | 149 |
| FIGURA 81: MEDICIÓN DE EH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL MIXTO A 20 PPM. | 149 |
| FIGURA 82: MEDICIÓN DE PH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL MIXTO A 50 PPM. | 150 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 83: MEDICIÓN DE EH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL MIXTO A 50 PPM..... | 151 |
| FIGURA 84: MEDICIÓN DE PH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL SULFURADO A 20 PPM..... | 152 |
| FIGURA 85: MEDICIÓN DE EH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL SULFURADO A 20 PPM..... | 153 |
| FIGURA 86: MEDICIÓN DE PH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL SULFURADO A 50 PPM..... | 153 |
| FIGURA 87: MEDICIÓN DE EH EN PRUEBAS EN COLUMNAS DE MINERAL SULFURADO A 50 PPM..... | 154 |
| FIGURA 88: DENSIDAD DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 155 |
| FIGURA 89: TENSIÓN SUPERFICIAL DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 156 |
| FIGURA 90: CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 158 |
| FIGURA 91: DENSIDAD DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 50 PPM..... | 158 |
| FIGURA 92: TENSIÓN SUPERFICIAL DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 50 PPM..... | 159 |
| FIGURA 93: CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 50 PPM..... | 160 |
| FIGURA 94: DENSIDAD DEL MINERAL MIXTO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 160 |
| FIGURA 95: TENSIÓN SUPERFICIAL DEL MINERAL MIXTO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 161 |
| FIGURA 96: CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL MIXTO CON SURFACTANTES A 20 PPM. | 162 |
| FIGURA 97: DENSIDAD DEL MINERAL MIXTO CON SURFACTANTES A 50 PPM..... | 163 |
| FIGURA 98: TENSIÓN SUPERFICIAL DEL MINERAL MIXTO CON SURFACTANTES A 50 PPM..... | 163 |
| FIGURA 99: CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL MIXTO CON SURFACTANTES A 50 PPM. | 164 |
| FIGURA 100: DENSIDAD DEL MINERAL SULFURADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. | 165 |
| FIGURA 101: TENSIÓN SUPERFICIAL DEL MINERAL SULFURADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. | 166 |
| FIGURA 102: CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL SULFURADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 167 |
| FIGURA 103: DENSIDAD DEL MINERAL SULFURADO CON SURFACTANTES A 50 PPM. | 167 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 104: TENSIÓN SUPERFICIAL DEL MINERAL SULFURADO CON SURFACTANTES A 50 PPM. | 168 |
| FIGURA 105: CONSUMO DE ÁCIDO DEL MINERAL SULFURADO CON SURFACTANTES A 50 PPM..... | 169 |
| FIGURA 106: VISCOSIDAD DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTE L-15767. | 170 |
| FIGURA 107: VISCOSIDAD DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTE L-21199. | 171 |
| FIGURA 108: VISCOSIDAD DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTE L-20886. | 171 |
| FIGURA 109: VISCOSIDAD DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM.. | 172 |
| FIGURA 110: VISCOSIDAD DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 50 PPM.. | 173 |
| FIGURA 111: DISOLUCIÓN DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM.... | 174 |
| FIGURA 112: EXTRACCIÓN DEL MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. | 175 |
| FIGURA 113: DENSIDAD DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 175 |
| FIGURA 114: TENSIÓN SUPERFICIAL DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 176 |
| FIGURA 115: VISCOSIDAD DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. ... | 177 |
| FIGURA 116: PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNAS CON RECIRCULACIÓN | 178 |
| FIGURA 117: DISOLUCIÓN DE PRUEBAS DE RECIRCULACIÓN MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. | 179 |
| FIGURA 118: EXTRACCIÓN DE PRUEBAS DE RECIRCULACIÓN MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. | 179 |
| FIGURA 119: DENSIDAD DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 180 |
| FIGURA 120: VISCOSIDAD DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM. ... | 181 |
| FIGURA 121: TENSIÓN SUPERFICIAL DE MINERAL OXIDADO CON SURFACTANTES A 20 PPM..... | 182 |

NOMENCLATURA

| | | |
|----------|---|-------------------------------|
| cP | : | Centipoise |
| γ | : | Tensión superficial |
| RPM | : | Revoluciones por minuto |
| CMC | : | Concentración micelar crítica |
| DRX | : | Difracción de rayos X |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar la utilización de agentes surfactantes fluorocarbonados en una etapa de lixiviación determinando su comportamiento físico-químico y su impacto en la extracción de cobre. La búsqueda de incrementar esta recuperación de cobre desde minerales tanto oxidados como sulfurados utilizando nuevos agentes que mejoren las propiedades de las soluciones es una temática que se ha investigado durante años. Lewandowski y Nassier por medio de aglomerantes artificiales han logrado incrementar las extracciones de cobre desde un mineral oxidado entre un 5 y 7%. Por otro lado Wadell ha logrado utilizando surfactantes fluorocarbonados mejorar las recuperaciones de cobre hasta un 10% en minerales oxidados.

Este proyecto evalúa el impacto de surfactantes fluorocarbonados por medio de lixivaciones columnares y pruebas ISO-pH a diferentes dosificaciones de 20 y 50 ppm. Este análisis incluye la utilización de una muestra mineral oxidada en presencia de Atacamita y Calcosiderita, una muestra sulfurada con Calcopirita y Calcosina, además de una muestra mixta que contiene ambos tipos de minerales. Las variables medidas corresponden a tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido.

De los resultados obtenidos se observa como en presencia de surfactantes C-F se logran mejoras en una etapa lixivante siendo el surfactante L-15767 el que presenta un aumento de 10% y 7% en extracción desde minerales oxidados y mixtos de cobre respectivamente. Las mejores condiciones para trabajar con estos surfactantes son para minerales oxidados de cobre potenciales bajo 535 mV y pH 1,4 y para el mineral mixto de cobre a 520 mV y pH 1,4.

ABSTRACT

This research aims to analyze the use of fluorocarbon surfactants in a leaching process and analyze their physicochemical behavior and its impact on copper extraction. Searching to increase copper recovering from both oxidized and sulfide ores using new agents that improve the properties of the solutions is a topic that has been researched for years. Lewandowski and Nassier through artificial binders have succeeded in increasing the extraction of copper from oxide ore between 5 and 7%. Furthermore Wadell achieved using fluorocarbon surfactants improve recoveries of up to 10% copper in oxide ores.

This project evaluates the impact of fluorocarbon surfactants in ISO-pH testing and column leaching at different concentrations of 20 and 50 ppm. The analysis includes the use of a oxidized ore sample in presence of Chalcosiderite with Atacamite and a sulfur sample with Chalcopyrite and Chalcocite. A third mixed sample containing both types of minerals is also used. The measured variables correspond to surface tension, density, viscosity and acid consumption.

From the results observed in the presence of C-F surfactants improvements are achieved in a leaching stage being the surfactant L-15767 which shows an increase of 10% and 7% in mineral extraction from copper oxide and mixed respectively. The best conditions for working with these surfactants are for a potential under 535 mV and pH 1.4 on copper oxide ores and 520 mV and pH 1.4 on mixed copper ores.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes generales

Los surfactantes fluoroquímicos han sido utilizados en procesos hidrometalúrgicos tanto en pruebas a escala de planta piloto como en operaciones comerciales. El uso de estos aditivos es favorable debido a la elevada resistencia del enlace flúor-carbón, lo que se traduce en su habilidad para actuar sin degradarse al ser utilizados bajo las condiciones cada día más exigentes de los procesos metalúrgicos (Olave, 1998). Aunque diferentes estudios como los realizados por Waddell han comprobado que la utilización de este tipo de surfactantes incrementa la recuperación de cobre, no se ha realizado estudios metalúrgicos que analicen el comportamiento que poseen estos aditivos al momento de ser utilizados. La posibilidad de analizar variables fisicoquímicas como son la tensión superficial, viscosidad y densidad pueden entregar información para identificar de qué forma actúan estos surfactantes en el incremento de la extracción de cobre.

Con el fin de realizar de forma adecuada el estudio y como parte fundamental en los estudios metalúrgicos, se debe realizar una caracterización de los productos surfactantes así como del mineral de mena utilizado. Además de los análisis a realizar en las soluciones lixiviantes, caracterizar el mineral de cabeza y los rípios obtenidos toma importancia para determinar cómo responden las especies minerales a los surfactantes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Demostrar el incremento en la extracción de cobre en pilas de lixiviación mediante el uso de agentes surfactantes fluoroquímicos.

1.2.2. Objetivos secundarios

- Realizar una caracterización química y mineralógica tanto del mineral como de surfactantes a utilizar.
- Evaluar diferentes reactivos surfactantes y el efecto de variación de dosificaciones en lixivaciones bajo iguales condiciones operacionales.
- Realizar estudios fisicoquímicos de densidad, viscosidad, superficie de contacto y tensión superficial en presencia y ausencia de agentes surfactantes.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1. Lixiviación

La lixiviación o extracción sólido-líquido se define como un proceso hidrometalúrgico que tiene por objetivo realizar la disolución selectiva de un metal o metales de interés por medio de un agente químico externo. Esta transferencia hacia la fase acuosa, permite la separación del metal contenido en la fase sólida de sus acompañantes no solubles obteniéndose un solvente y un soluto.

Este proceso tiene gran importancia en la recuperación de cobre utilizando ácido sulfúrico y oro en presencia de cianuro. Para mejorar el proceso se realizan etapas de preparación y pretratamiento del mineral a lixiviar para lograr una posterior disolución de los valores metálicos.

En algunos casos las pequeñas fases del material soluble están completamente rodeadas de matrices de material insoluble que actúan de forma refractaria. Para estas situaciones el disolvente debe penetrar en la masa y la solución resultante debe difundir hacia el exterior antes de poder lograr una separación. En el plano de la metalurgia el uso de procesos de conminución como chanchado y molienda de estos sólidos produce una aceleración de la acción lixiviante gracias a la disponibilidad de más superficie de contacto en el material soluble.

Las operaciones de lixiviación se pueden generalizar en dos técnicas: rociar el líquido sobre el sólido o sumergir el sólido completamente en el líquido. La técnica a utilizar depende de la forma física de los sólidos y del costo del proceso. Las partículas sólidas de granulometría más gruesa generalmente se tratan en lechos fijos mediante métodos de percolación,

mientras que los sólidos finamente divididos, que pueden mantenerse más fácilmente en suspensión, pueden dispersarse en todo el líquido como es el caso de procesos agitados.

Dependiendo de las condiciones de la ley del mineral y de sus características químicas y mineralógicas (sulfuros, óxidos o mixtos) va a variar la técnica de lixiviación a utilizar. En metalurgia existen 5 tipos de lixiviación destacados, los cuales son:

- Lixiviación in situ
- Lixiviación en botaderos
- Lixiviación en pilas
- Lixiviación por percolación
- Lixiviación por Agitación

2.1.1. Lixiviación en pilas

Esta técnica es usada como método primario de tratamiento de minerales oxidados y mezcla de óxidos y sulfuros secundarios.

Las pilas a nivel industrial pueden variar en altura entre 3 y 10 metros y el riego de las pilas es variable llegando en promedio para minerales oxidados entre 45 a 60 días, tiempo en que se ha agotado casi completamente la cantidad de cobre lixiviable. El material restante o ripio es transportado mediante correas a botaderos donde dependiendo de la ley presente en el mineral, se puede iniciar un segundo proceso de lixiviación (Domic, 2001).

Se distinguen tres tipos de pilas:

- Dinámica
- Permanente
- Run of mine (ROM)

Normalmente, la lixiviación en pilas se utiliza cuando el mineral tiene una ley económicamente rentable para un tratamiento de chancado, de tipo secundario y terciario y aglomerado para mejorar la permeabilidad del lecho del mineral.

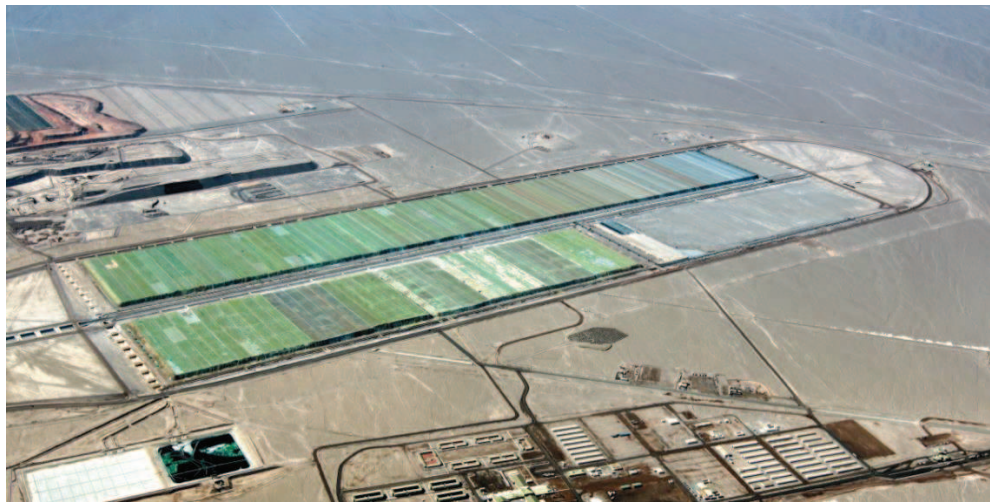


Figura 1: Lixiviación en pilas dinámicas (Minera Spence S.A.)

En la minería del cobre el ácido sulfúrico es el disolvente usual a utilizar en menas oxidadas de cobre. De esta lixiviación se obtienen soluciones de sulfato de cobre (CuSO_4) con concentraciones de hasta 9 g/L denominadas

pregnant leaching solution (PLS) que son llevadas a diversos estanques donde se limpian eliminándose las partículas sólidas que pudieran haber sido arrastradas.

El cobre es recuperado posteriormente desde la solución mediante electrólisis y el electrolito gastado es regenerado y recirculado al circuito de lixiviación.

Tabla 1: Comparación entre lixivaciones en Pila (Domic, 2001)

| Características | Dinámica | Estática | ROM |
|-------------------|---------------|---------------------|---------------------|
| Ley | Media | Media | Baja |
| Mineralización | Óxido | Óxido/mixto/sulfuro | Óxido/mixto/sulfuro |
| Carguío | Apilador | Apilador | Camiones |
| Curado | Tambor/Correa | Tambor/Correa | In-Situ |
| Costo operacional | Alto | Medio | Bajo |
| Control | Bueno | Bueno | Bajo |
| Área | Baja | Alta | Alta |
| Recuperación | 70-90 | 70-90 | 30-50 |

La lixiviación como proceso de extracción de cobre desde minerales oxidados es el más utilizado en Chile, debido en gran parte a la menor inversión de capital en terrenos, máquinas y preparación. A lo anterior se suma además los menores costos operativos en conceptos de energía y personal (Olave, 1998).

Pese a esto existen desventajas considerables en el proceso, como la facultad de controlar y predecir la extracción de valores del yacimiento,

problemas de superficie y contaminación presentes en el proceso junto a la más significativa que son los tiempos necesarios para alcanzar recuperaciones aceptables (Olave, 1998).

Las desventajas presentadas en el párrafo anterior serán los puntos a estudiar e investigar para mejorar las virtudes que presenta este proceso hidrometalúrgico.

2.1.2. Balance en una etapa lixiviante

Para analizar de mejor forma este proceso, es posible expresar esquemáticamente una operación de lixiviación. Este esquema incluye la operación completa: mezcla y separación de las fases:

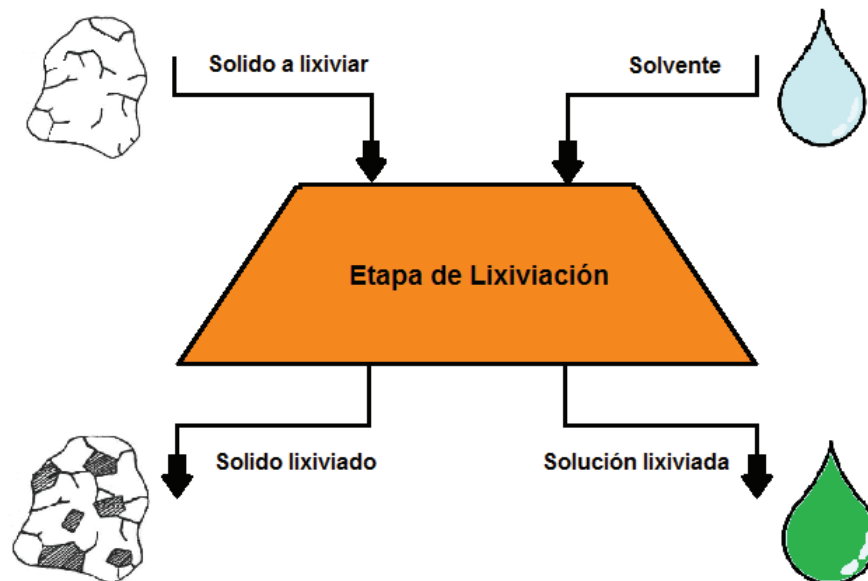


Figura 2: Balance de una operación de lixiviación

A partir de la información expuesta en la Figura 2 es posible analizar cada componente presente en el balance:

2.1.2.1. Sólido a lixiviar

Está compuesto por el sólido insoluble y la totalidad del soluto. En el caso de que el sólido que provenga de una operación anterior en que ya haya entrado en contacto con el solvente, su composición estará dada por el sólido insoluble, una cantidad de solvente y el soluto asociado al sólido (Smith, 2002).

2.1.2.2. Solvente

Este líquido lixivante está compuesto por solvente puro o por solvente con algo de soluto que se denomina refino (si provienen de operaciones anteriores).

2.1.2.3. Sólido lixiviado

Después de la operación de lixiviación se separan las dos fases y el sólido lixiviado quedará con algo de solución remanente asociada al sólido.

2.1.2.4. Solución de lixiviación

Esta corriente es la solución concentrada, la cual se encuentra compuesta por solvente y soluto en solución.

La lixiviación se presenta como una gran “caja negra”, de la cual no es posible obtener en forma real que es lo que sucede al momento de ocurrir la disolución. Por esta razón, es necesario e imprescindible caracterizar completamente las soluciones y material sólido obtenido antes y después del proceso, con el fin de entender y obtener la mayor cantidad de información sobre cómo funciona y trabaja la lixiviación (Smith, 2002).

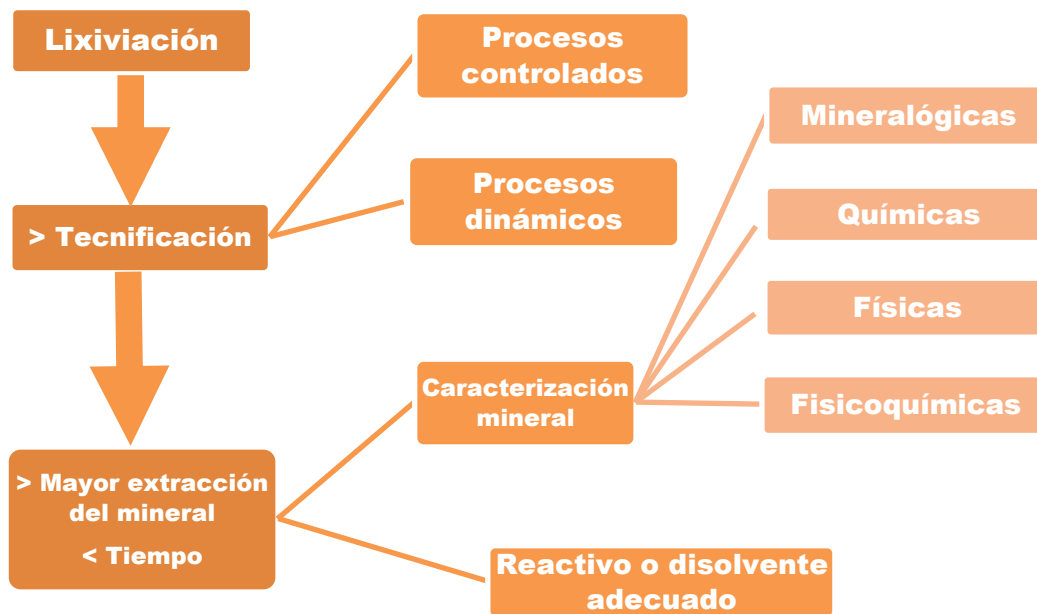


Figura 3: Esquema de caracterización en un proceso de lixiviación

De forma de desglosar y representar la información antes obtenida, se presenta la Figura 3 donde esquemáticamente se enlaza la importancia de la caracterización de los componentes presentes en la lixiviación y cómo impacta la utilización de tecnología en el proceso tanto para analizar el mineral como en el uso de reactivos.

Podemos desprender además que para buscar optimizar un proceso de lixiviación, es necesario investigar tanto los procesos controlados como dinámicos lo que nos lleva a lograr un aumento en la tecnificación presente en el proceso y que con la utilización de un disolvente adecuado y/o reactivo, junto a la caracterización completa del mineral que se busca lixiviar será posible aumentar la extracción real del mineral buscado en un menor tiempo.

2.2. Fisicoquímica de superficies

Los sólidos, líquidos y soluciones presentan muchas propiedades que son explicables sólo en función de la acción de sus superficies.

Cuando se aborda el estudio de un sistema compuesto por varias fases, resulta frecuente que se ignoren las zonas de contacto entre las diferentes fases o interfase. Esto debido a que la interfase está compuesta por un número muy pequeño de moléculas. Sin embargo, existen muchas situaciones en las que es la interfase la que determina el comportamiento y propiedades del sistema que se estudia. Diversos comportamientos como corrosión, lubricación, catálisis heterogénea y procesos electroquímicos, entre otros, son algunas de las situaciones en las que la interfase resulta ser parte esencial en los resultados de los estudios (Adamson, 1997).

Estas propiedades se presentan al estar dos fases en contacto a través de un plano de separación, región interfacial o plano superficial. Ambas fases normalmente pueden presentarse de forma homogénea, pero sus propiedades fisicoquímicas son distintas al aproximarse a la región interfacial (Olave, 1998).

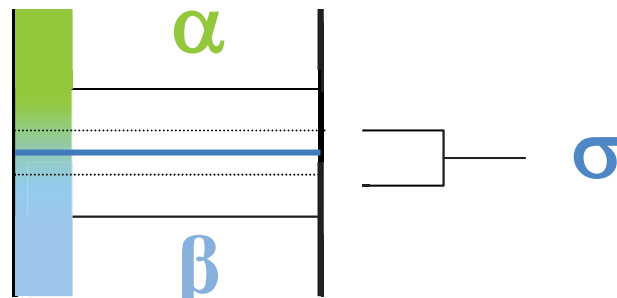


Figura 4: Dos fases en contacto alfa y beta a través de una interfase sigma (Castellán, 1992).

Al ser fases diferentes existe un desbalance de fuerzas lo que genera una fuerza llamada tensión superficial, como un efecto mecánico y que es normal al plano de la superficie (Olave, 1998).

2.2.1. Tensión superficial

Existen atracciones simétricas que actúan sobre las moléculas que forman un líquido. Pero en la superficie, una molécula se encuentra sólo parcialmente rodeada por moléculas, por lo que es atraída hacia el líquido por las moléculas a su alrededor. Esta fuerza de atracción tiende a arrastrar las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido y al hacerlo, el líquido se comporta como si estuviera rodeado por una membrana invisible. A esta condición existente en la superficie libre de un líquido semejante a las propiedades de una membrana elástica bajo tensión, se le conoce como tensión superficial (Adamson, 1997).

La tensión superficial es el resultado de las fuerzas moleculares ejerciendo presión hacia el interior del líquido, la cual puede ser reflejada en la curvatura formada en los bordes donde el líquido está en contacto con la pared donde está retenida (Adamson, 1997).

Se puede observar que a causa de la tensión superficial cualquier superficie líquida tiende a hacerse lo más reducida posible como resultado de esta tensión, como es el caso del mercurio, que forma una esfera cuando se deposita una cantidad pequeña sobre una superficie horizontal. Otro ejemplo de esta fuerza es la forma casi perfectamente esférica de una burbuja, que se debe a la distribución de la tensión sobre la delgada película de jabón.

2.2.1.1. Cálculo de la tensión superficial

Podemos definir la tensión superficial como el trabajo que es preciso realizar para modificar la unidad de área de la superficie de una interfase líquido-vapor (Olave, 1998). Si se desea modificar la superficie de esta interfase en una cantidad infinitesimal dA , se debe realizar un trabajo también infinitesimal (δW). Este trabajo es proporcional a la variación de superficie y la constante de proporcionalidad es la tensión superficial como se indica en la ecuación 2.1:

$$\delta W = \gamma dA \quad (2.1)$$

De donde podemos concluir que:

$$\gamma = \delta W / dA \quad (2.2)$$

Donde γ es el valor de la tensión superficial. La tensión superficial depende de la temperatura y de la naturaleza del líquido al igual que las fuerzas intermoleculares.

Puesto que $W = fuerza \times desplazamiento$ podemos expresar la tensión superficial como:

$$\gamma = \frac{Fuerza \cdot Desplazamiento}{Area} = \frac{Fuerza}{Longitud} \quad (2.3)$$

La tensión superficial suele representarse mediante la letra gamma (γ) y sus unidades son de $N \cdot m^{-1} = J \cdot m^{-2}$.

2.2.1.2. Propiedades de la tensión superficial

Algunas propiedades que presenta la tensión superficial son las siguientes:

- γ siempre es mayor a cero, pues para aumentar el área del líquido en contacto hace falta llevar más moléculas a la superficie, con lo que aumenta la energía del sistema y γ está directamente vinculado a la cantidad de trabajo necesario para llevar una molécula a la superficie (Adamson, 1997).
- La tensión superficial depende de las dos fases puestas en contacto. Así, la tensión superficial será diferente por ejemplo para agua en contacto con su vapor, agua en contacto con un gas inerte o agua en contacto con un sólido, al cual podrá mojar o no debido a las diferencias entre las fuerzas cohesivas (dentro del líquido) y las adhesivas (líquido-superficie) (Adamson, 1997).
- El valor de γ depende de la magnitud de las fuerzas intermoleculares en el seno del líquido. Esto quiere decir que cuanto mayor sean las fuerzas de cohesión del líquido, mayor será su tensión superficial (Adamson, 1997).
- Para un líquido dado, el valor de su tensión superficial disminuye según su temperatura debido al aumento de la agitación térmica, lo que redundaría en una menor intensidad efectiva de las fuerzas intermoleculares. El valor de γ tiende a cero conforme la temperatura se aproxima a la temperatura crítica (T_c) del compuesto (Olave, 1998).

2.2.2. Fuerzas de atracción y repulsión entre moléculas

El comportamiento que poseen las moléculas depende directamente de las fuerzas que atraen o repelen las moléculas y como estas se logran mantener en un equilibrio.

Las fuerzas de corto alcance o repulsivas es un fenómeno complejo y que aún se estudia para comprender por completo y se presentan normalmente entre moléculas que no interactúan químicamente. Estas fuerzas comienzan a tomar importancia cuando las nubes de electrones (corteza del átomo) se superponen y la energía se denomina energía de intercambio o de superposición. La energía de intercambio repulsiva es la que produce la impenetrabilidad de las moléculas. Por otro lado, este tipo de fuerza también puede ser de atracción donde reciben el nombre de fuerzas de valencia.

2.2.2.1. Fuerza dipolo-dipolo

Las fuerzas dipolo-dipolo son formadas entre las moléculas polares neutras, donde las moléculas polares se atraen unas a otra entre extremos positivos y negativos. Esta fuerza es débil y para ser efectivas deben de estar moléculas polares muy próximas. El tipo de fuerza formado es menor al logrado con una interacción ion- dipolo.

Cuando dos dipolos se acercan y atraen, dan como resultado un enlace. De igual forma, si átomos muy electronegativos se encuentran unidos directamente a un átomo de Hidrógeno, también se formará este tipo de enlace. A medida que la polaridad de la molécula aumenta, la fuerza dipolo-dipolo crece.

2.2.2.2. Fuerzas de Van der Waals

Las fuerzas de Van der Waals son energías de estabilización molecular que forman un enlace químico no covalente entre dos tipos interacciones, las fuerzas de dispersión (atracción) y fuerzas de repulsión entre las capas electrónicas de 2 átomos contiguos.

Este tipo de fuerza es la más débil a nivel intermolecular que puede formarse en la naturaleza, necesitándose un aporte energético de 0,1 a 35 kJ/mol para romper dicha interacción. Las fuerzas de van der Waals se consideran como la explicación molecular para la formación de energías cohesivas en los líquidos y son semejantes en magnitud a las entalpías de vaporización de muchos líquidos.

2.2.2.3. Puente de hidrógeno o enlace de hidrógeno

Cuando átomos de hidrógeno se encuentran unidos en forma covalente a un átomo electronegativo se produce una polaridad en el enlace que le entrega un porcentaje de carácter iónico. El hidrógeno obtiene una densidad de carga positiva y es atraído hacia un par de electrones no compartidos de un átomo electronegativo, con lo que se produce el puente o enlace.

Entre sus características, este átomo debe tener un volumen pequeño para que su densidad de carga sea grande y pueda ejercer la atracción electrostática requerida por un átomo de hidrógeno. Este tipo de situación la podemos observar en presencia de flúor, oxígeno (Figura 5) y nitrógeno.

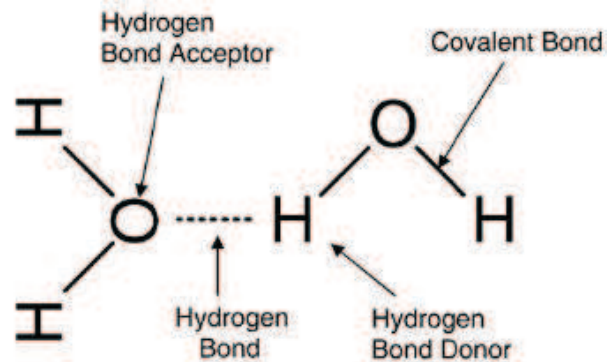


Figura 5: Puente de hidrógeno entre dos moléculas de agua

2.2.2.4. Fuerza ión-dipolo

Esta fuerza se forma entre un ión y una molécula polar neutra que posea un momento dipolar permanente (tanto extremos positivos como negativos). Los iones positivos son atraídos al extremo negativo de un dipolo en tanto los iones negativos son atraídos al extremo positivo.

La magnitud de la energía de la interacción depende directamente de la carga sobre el ión (Q), el momento dipolar del dipolo (μ) y la distancia del centro del ión al punto medio del dipolo (d). Estas fuerzas adquieren una importancia considerable al estar presentes en líquidos.

Las fuerzas electrostáticas pueden existir dada la presencia de campos electrostáticos incompletos. Cuando la superficie entra en contacto con agua, un intercambio iónico con la solución produce una doble capa eléctrica. De un modo, los ligantes son atraídos hacia la superficie mineral de forma electrostática (Nasser y James, 2006). En caso de presencia de ácido Zhou y Franks identificaron que estos ligantes catiónicos quedan fuertemente ionizados, lo que permite que estos sean atraídos a la carga negativa de la superficie del mineral. Cuando polímeros aniónicos se encuentran presentes en

H₂SO₄, sus cargas son neutralizadas dejándolos incapaces de conectarse al mineral por atracción electrostática.

Las fuerzas magnéticas actúan de forma similar a las fuerzas electrostáticas. Este mecanismo limita a las partículas que poseen propiedades magnéticas.

2.3. Tensoactivos

Los tensoactivos, también llamados surfactantes o agentes de superficie activa, son especies químicas con una naturaleza o estructura polar-no polar, con tendencia a localizarse convenientemente en la interfase formando una capa monomolecular adsorbida en la interfase (Adamson, 1997).

Los tensoactivos fueron desarrollados en la primera mitad del siglo XX y han influenciado de forma importante tipos de productos, en los cuales actúan modificando la tensión superficial presente en la superficie de contacto entre dos fases. Estas propiedades son obtenidas a través de su estructura molecular (Castellán, 1992).

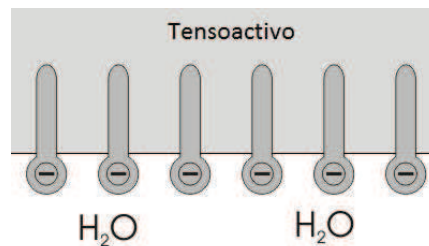


Figura 6: Capa superficial de un tensoactivo sobre una superficie de agua

Las soluciones de tensoactivos resultan ser activas al colocarse en forma de capa monomolecular adsorbida en la superficie entre las fases hidrofílicas e hidrofóbicas como se observa en la Figura 6, por lo que se denominan como moléculas anfifílicas. Esta ubicación impide el tráfico de moléculas que van de la superficie al interior de líquido en busca de un estado de menor energía disminuyendo así el fenómeno de tensión superficial (Sánchez, 1998).

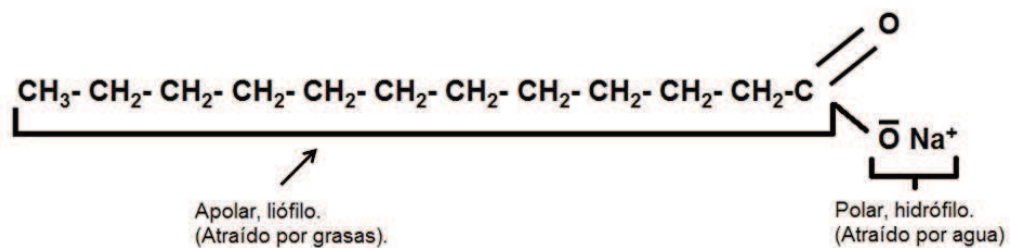


Figura 7: Estructuras polar y no polar presentes en un tensoactivo

Al contacto con un líquido las moléculas individuales se orientan de tal modo que la parte hidrófuga sobresale del nivel de la solución, permaneciendo en la zona sin presencia de moléculas de agua y formando una estructura como la mostrada en la Figura 7.

2.3.1. Clasificación de los tensoactivos

La clasificación se fundamenta en el poder de disociación del tensoactivo en presencia de un electrolito y de sus propiedades fisicoquímicas. Estos se dividen en iónicos o no-iónicos; donde para un tensoactivo iónico, según sea la carga que posea el enlace que interactúa con la superficie, se pueden dividir en aniónicos, catiónicos o anfóteros.

2.3.1.1. Tensoactivos iónicos

Los tensoactivos iónicos tienen fuerte afinidad por el agua y debido a su atracción electrostática hacia los dipolos del agua puede arrastrar consigo a las soluciones de cadenas de hidrocarburos (Adamson, 1997).

2.3.1.1.1. Tensoactivos aniónicos

Estos tensoactivos en solución se ionizan pero considerando el comportamiento de sus grupos en solución, el grupo hidrófobo queda cargado negativamente. Un ejemplo de surfactante aniónicos utilizado comercialmente es el Sulfonato de Sodio (Figura 8).

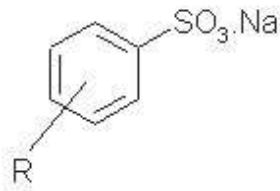


Figura 8: Molécula de Sulfonato de sodio

2.3.1.1.2. Tensoactivos catiónicos

Son aquellos que en solución forman iones, resultando cargado positivamente el grupo hidrófobo de la molécula. En general son compuestos cuaternarios de amonio o una amina grasa en medio ácido.

2.3.1.1.3. Tensoactivos anfóteros ó anfotéricos

Estos tensoactivos actúan dependiendo del medio en que se encuentren, en medio básico son aniónicos y en medio ácido son catiónicos.

2.3.1.2. Tensoactivos No-iónicos

Los surfactantes o tensoactivos no-iónicos son aquellos que al ionizarse, se solubilizan mediante un efecto combinado de un cierto número de grupos solubilizantes débiles (hidrófilos) tales como enlace tipo éter o grupos hidroxilos en su molécula.

2.4. Surfactantes fluorocarbonados en la lixiviación de metales

La utilización de los surfactantes fluorocarbonados se enfoca en buscar el incremento en la recuperación de metales. Estos reactivos entran en contacto con el mineral por medio de irrigación acompañando a una solución ácida que contenga al agente surfactante en una etapa previa o durante la extracción de los metales.

Los surfactantes fluorocarbonados incrementan la extracción del mineral en especial desde las partículas minerales de mayor tamaño como fue investigado por Sierakowski. Estas fracciones pueden ser utilizadas durante las etapas de lixiviación, minimizando los costos de pretratamiento mecánico como

es la utilización de chancadores y reduciendo además pérdidas de permeabilidad causados por las fracciones minerales finas.

La cantidad de disminución de tamaño necesaria para obtener una buena permeabilidad del lecho para obtener una distribución uniforme de la solución lixivante, es un parámetro que incide económicamente en un proyecto de pilas de lixiviación. Una presencia excesiva de arcillas o finos en el mineral, reducen directamente el flujo de percolación, produciendo canales y disminuyendo la capacidad de contacto del mineral con la solución.

Yannapolous encontró que la eficiencia de los surfactantes fluorocarbonados se incrementa contactando al mineral durante la primera etapa de riego de la pila mineral. Uno o dos días de contacto entre el mineral y el reactivo son suficientes para generar un patrón de humedad en el mineral. Los periodos de riego de solución en presencia de una solución surfactante varían según las características de percolación propias de cada tipo de mineral.

Los surfactantes fluorocarbonados están formados por al menos 5% en peso por flúor, como son por ejemplo los enlaces carbono-flúor donde estas cadenas se encuentran preferiblemente ubicadas en la cadena radical flúor-alifática. Este tipo de surfactante es soluble en soluciones acuosas y disminuye la tensión superficial de la solución acuosa bajo las 40 dinas/cm. Para ver beneficios económicos y con el fin de prevenir interferencia con la adsorción de carbón, es preferible utilizar sólo una cantidad de surfactante que no sobrepase los 100 ppm. La solubilidad de estos reactivos se incrementa a medida que el pH aumenta.

Los surfactantes fluorocarbonados pueden ser representados por la fórmula 2.4:



Donde:

R_f Corresponde a un grupo o cadena radical fluor-alifática y n puede ser 1 ó 2.

Z es un grupo polar soluble al agua y n puede ser preferentemente 1 ó 2.

Q se encuentra unido a un grupo x que puede ser 0 ó 1.

R_f puede ser definido como un fluorado preferentemente saturado, monovalente, radical no –aromático que posee al menos 3 carbonos. Este además puede ser una cadena corta, larga o si es lo suficientemente larga llegar a ser cíclica, lo que puede producir la presencia de oxígeno, nitrógeno trivalente o átomos de sulfuro hexavalente unidos a carbono.

Mientras los radicales contienen un largo número de átomos de carbono para que funcionen adecuadamente, los surfactantes contienen no más de 20 átomos de carbono dado que largas cadenas radicales usualmente presentan una menor eficiencia en la utilización de flúor. Normalmente, se pueden encontrar entre 4 a 12 átomos de carbón en este tipo de cadenas. Para el flúor presente en estos radicales, este suele ser entre un 40 y 78% en peso. El radical R_f termina preferentemente en un perfluorado que contenga al menos 7 átomos de flúor. Algunos ejemplos radicales pueden ser: $CF_3OCF_2CF_2O$, $CF_3CF_2CF_2$, $(CF_3)_2CF$ o F_5SCF_2 .

Q es un grupo conectado multifuncional como el alquileo (metileno, etileno, propileno), arileno (fenileno) o combinaciones de restos de hetero-átomos como un carbonil, sulfonil, carbonamido, entre otros. Si Q es igual a cero, R_f y Z se conectan por medio covalente. Los grupos Q dependen directamente de reactantes utilizados en la preparación del surfactante debido a su composición.

Z pueden ser grupos del tipo aniónico, no-iónico, catiónico o anfótero. El grupo es seleccionado según la solubilidad del surfactante. Algunos de los grupos más utilizados son los sulfonatos y sulfatos como SO_3M y OSO_3M respectivamente, donde M es un catión metálico o hidrógeno como son el calcio o sodio.

Los surfactantes fluorocarbonados poseen entre un 10 a 30% de peso de enlaces carbono-flúor, lo que con lleva a que posean un peso molecular relativamente bajo comparándolos con polímeros que pueden llegar a tener un peso molecular 100.000 mayor.

2.4.1. Tensoactivos fluorocarbonados para lixiviación de Cobre

Un surfactante fluorocarbonado es aquel compuesto orgánico en el cual se reemplaza un enlace hidrógeno-carbono por un enlace flúor-carbono. Este tipo de compuesto recibe el nombre de perfluorados. Aunque la presencia de flúor es atribuida a que puedan generarse problemas ambientales al ser utilizados, los productos fluorocarbonados no contienen compuestos que puedan formar clorofluorocarbonos (CFC), por lo que la utilización de los mismos, no genera ningún peligro tanto para el ser humano como el ambiente.

Los fluorosurfactantes se asemejan a los hidrosurfactantes en que ambos son compuestos anfipáticos donde el grupo hidrófobo insoluble de la molécula surfactante contiene un grupo fluorocarbonado ligado a un grupo funcional soluble, el que es seleccionado por su efectividad y compatibilidad. Sin embargo, la utilización de flúor posee mejoras notables en los resultados obtenidos, los cuales pueden ser atribuidos a que el enlace carbón-flúor es en sí mismo una entidad químicamente más estable debido a la alta

electronegatividad presente en el átomo de flúor y su subsecuente pequeño radio atómico.

Este tipo de surfactante presenta molecularmente colas del tipo hidrofóbica y oleofóbica. Estas características proporcionan que no exista tendencia a que la tensión superficial sea reducida por extracción de moléculas. Esta situación hace de estos agentes una alternativa para ser utilizados en etapas de lixiviación.

La familia Fluorad^{MR} perteneciente a 3M Chile está producida sobre la base de surfactantes fluorocarbonados del tipo catiónico, diseñados especialmente para ser utilizados en la lixiviación con ácido sulfúrico en minerales de cobre.

Para motivos de esta investigación se consideran tres tipos de surfactantes del tipo tensoactivo fluorocarbonado. Estos surfactantes no presentan nombre comercial al ser aún soluciones experimentales, por lo que se utiliza sus nombres claves: L-15767, L-20886 y L-21199.

2.4.1.1. Propiedades químicas

Un surfactante a base de enlaces flúor-carbono, se describe como cloruro de amonio fluoralquil cuaternario, el cual posee las siguientes características:

- **Composición:**
 - 50% sólidos fluoroquímicos
 - 28% alcohol isopropílico
 - 22% agua desmineralizada

- **Densidad:** 1.14 g/mL a 25°C

3. INVESTIGACIONES PREVIAS

A partir de la utilización de surfactantes como disipador de neblina ácida, se logró comprobar la factibilidad de utilizar este tipo de producto en medios ácidos. De esta manera, comenzó el desarrollo de productos vinculados a otros procesos metalúrgicos como es su utilización en sistemas de separación sólido-líquido dada su vinculación a la tensión superficial. El proceso de lixiviación depende directamente de propiedades fisicoquímicas como son la tensión superficial y que modificando esta fuerza puede mejorar características de permeabilidad y mojabilidad en el mineral lo que ayuda a la extracción de cobre.

El lograr resolver los problemas de humedecimiento entre partículas sólidas minerales y la solución lixiviante es una aplicación típica para los fluorsurfactantes. Al producirse una mejor humectación de las partículas la superposición de fuerzas capilares mejora la tasa de difusión del cobre solubilizado desde el interior de las partículas (Olave, 1998).

3.1. Evaluación en columnas de lixiviación por Magma Copper Co.

Diversos han sido los estudios que se han realizado para evaluar el comportamiento de los productos fluorocarbonados en procesos de lixiviación. Uno de estos fue realizado en minera Magma Copper Co. situada en Arizona, Estados Unidos. Se realizó la carga de 91 kilos de mineral oxidado (Crisocola) en 2 columnas de lixiviación de 8 pulgadas de diámetro por 6 pulgadas de alto y con un ciclo de lixiviación de 60 días. El mineral presentó granulometría 100% bajo una pulgada y en la etapa de pre acondicionamiento de mineral a una de

las columnas se le agregaron 100 ppm de surfactante Fluorad FC-1129 y la otra se utilizó como control.

Se tomaron muestras de solución PLS para realizar una comparación respecto a la extracción de cobre, la cual, como se observa a continuación, fue desarrollada en fracciones granulométricas:

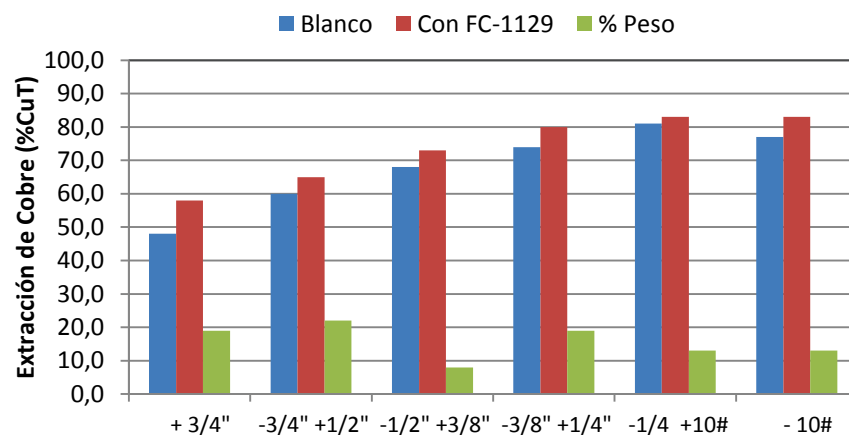


Figura 9: Porcentaje de extracción de cobre por fracciones granulométricas en pilas. (Magma Inc., 1991).

De la Figura 9, se puede desprender cómo en presencia de surfactante la extracción de cobre subió en promedio desde un 72,5% obtenido en la columna blanco a un 76% en presencia de FC-1129, lo que demuestra un incremento promedio de 5% en la extracción del mineral.

En la Figura 9 también se observa como la influencia del tamaño de partícula está asociada a la extracción de cobre obtenida, la cual se argumenta a la mayor área superficial que presenta la partícula para entrar en contacto con la solución lixivante.

3.2. Evaluación de extracción de cobre en pilas de lixiviación

Junto con las pruebas en columnas mencionadas anteriormente, Magma Copper Co. realizó pruebas a escala industrial para probar el uso de agentes surfactantes en el proceso de lixiviación. Dos pilas de 100.000 toneladas fueron lixiviadas en condiciones estándar, adicionando a una de ellas el surfactante Fluorad FC-1129 y la segunda pila utilizándose como control.

La adición de FC-1129 se realizó en dos puntos, en la solución de pre acondicionamiento a un nivel de 80 ppm y luego en la solución de lixiviación a nivel de 30 ppm. Se consideró un tiempo de evaluación de 30 días, en los cuales la solución PLS obtenida de las pilas entregaría información para ser comparada y ver como afectaba la presencia del agente tensoactivo en la solución.

Obtenidas las leyes de cobre en los ripios se demostró que la pila con presencia de surfactante presentó una recuperación mayor en torno a 5 % en relación a la pila de referencia. El beneficio de utilizar los surfactantes fluoroquímicos en la hidrometalurgia del cobre está directamente relacionado con las propiedades inherentes a los compuestos que contienen enlaces carbono-flúor.

De esta investigación Olave concluyó que los fluorsurfactantes son compuestos que generan cambios debido a su baja interacción con el orgánico de la extracción por solventes y su habilidad para actuar en ambientes químicos difíciles, conteniendo altas concentraciones de ácido sulfúrico.

Junto a lo anterior estas pruebas demostraron que la adición de surfactante en la etapa de aglomeración es factible utilizando dosis que oscilan entre 50 y 70 gramos de surfactante FC-1129 por tonelada de mineral.

3.3. Mediciones fisicoquímicas en presencia de surfactante

Pruebas en columnas unitarias fueron realizadas durante 1998 en Mina sur, Chuquicamata. En estas se midió los efectos producidos en el proceso de lixiviación con presencia del agente surfactante Dearcodox. Se trabajó en columnas de 50 kilos a diferentes granulometrías.

Junto a los cálculos de extracción de cobre obtenidos, se desarrollaron pruebas de capilaridad con el fin de analizar la capacidad de absorción (mojabilidad) que posee el mineral a diferentes dosificaciones de surfactante. Los resultados se presentan en la Figura 10.

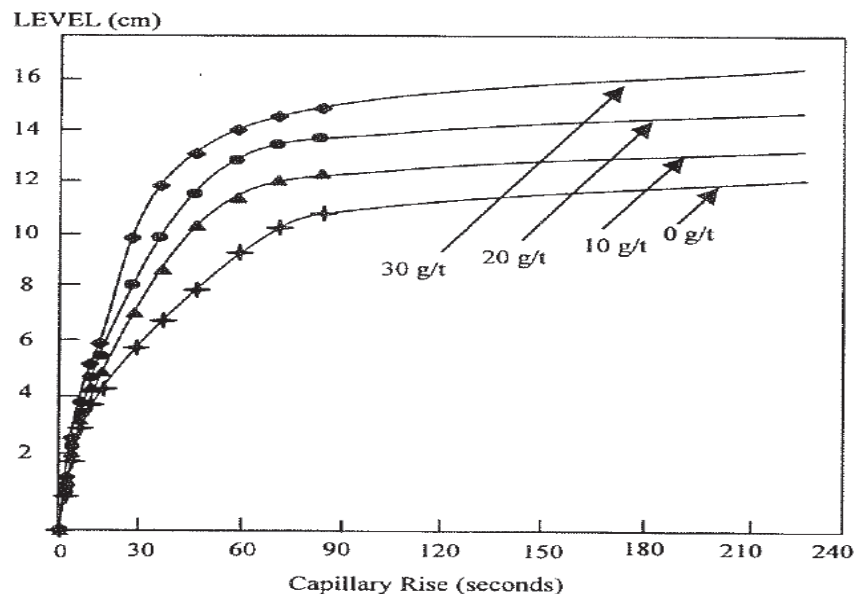


Figura 10: Medición de capilaridad a diferentes dosis de surfactante en función del tiempo (Olave, 1998).

En la Figura 10 la solución decrece su velocidad de capilaridad a través del tiempo, con una tendencia a la pasivación. Esto en otras palabras indica que mientras mayor sea el nivel de penetración del mineral, menor será el ángulo de contacto y con esto menor la capacidad de absorción del mineral.

De las pruebas anteriores se demuestra que en presencia de un surfactante aumenta la capilaridad, mejorando la mojabilidad del mineral. Junto a lo anterior, es posible determinar el ángulo de contacto de la solución con las partículas minerales. Paul C. Hiemenz estableció la ecuación 3.1 para describir este fenómeno.

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \left(\frac{\cos\theta}{\cos\theta_0}\right) \quad (3.1)$$

Donde: h = Altura (cm)

h_0 = Sin presencia de surfactante

γ = Tensión superficial del líquido $\left(\frac{\text{dinas}}{\text{cm}}\right)$

θ = Angulo de contacto en grados

De la expresión anterior es posible presentar gráficamente los resultados (Figura 11) donde se muestra el efecto de la presencia de surfactante sobre el ángulo de contacto. A partir de esta ecuación 3.1 es posible corroborar como a diferentes dosis de surfactantes se afecta directamente a la mojabilidad entre la solución lixivante de ácido sulfúrico en presencia del agente y las partículas de mineral oxidado, logrando un aumento en el ángulo de contacto que produce una mayor área superficial de contacto.

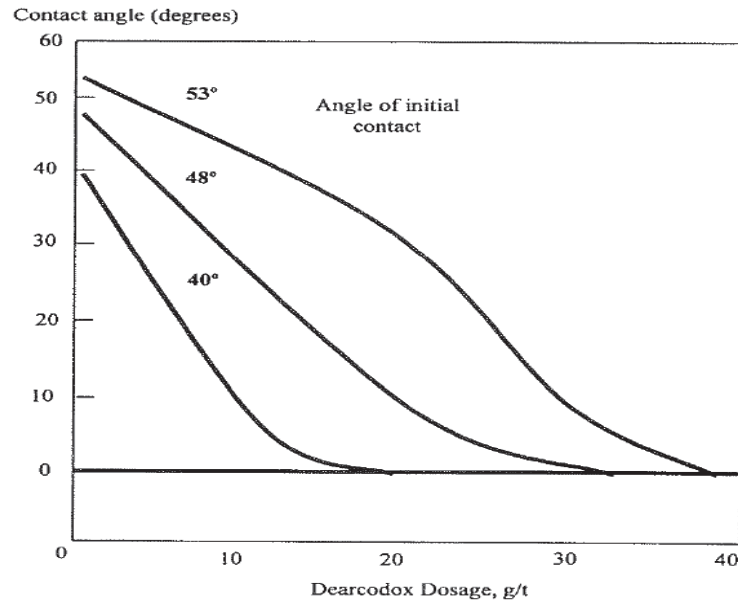


Figura 11: Simulación del efecto de surfactante sobre el ángulo de contacto de solución en partículas finas. (Heller, 2000).

3.4 Evaluación de cubierta de estuco para aglomeración de minerales para lixiviación en pilas

Kodali expone la importancia que posee el obtener glómeros minerales estables y que mantengan de forma importante la presencia de partículas finas a niveles adecuados. La presencia excesiva de este tipo de partículas, produce problemas a nivel operacional como es la canalización de la solución lixivante por problemas de permeabilidad en el medio y que finalizan obteniendo bajos niveles de extracción de cobre.

Para mejorar la calidad y los resultados obtenidos en una etapa de aglomeración, se planteó utilizar sulfato de calcio semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) conocido también como estuco. Este se agrega en forma de

polvo fino en la etapa de aglomeración. Minerales de óxido y sulfuro de cobre, además de un mineral a base de silicatos en presencia de calcopirita, brocantita y crisocola se utilizaron en este estudio.

Tabla 2: Mineralogía de muestras minerales utilizadas en pruebas de aglomeración

| Particle size (mm) | Chemical analysis Cu head grade (%) | Mineralogical analysis (100% base copper species) | | | | |
|-----------------------|--|---|-----------------------|---------|-------------------------------|-----------|
| | | CuFeS ₂ (%) | Cu ₂ S (%) | CuS (%) | CuSO ₄ 3Cu(OH) (%) | Other (%) |
| 25.4 × 19.1 | 1.21 | 0.40 | 85.00 | - | 14.10 | 0.50 |
| 19.1 × 12.7 | 1.16 | 1.10 | 82.60 | - | 15.20 | 1.10 |
| 12.7 × 9.5 | 1.26 | 13.20 | 71.70 | - | 15.10 | - |
| 9.5 × 6.36 | 1.25 | - | 82.50 | - | 17.50 | - |
| 6.36 × 3.18 | 1.31 | 7.00 | 75.60 | 0.80 | 15.80 | 0.80 |
| 3.18 × 1.7 | 1.30 | 6.20 | 76.90 | 0.70 | 15.40 | 0.80 |
| 1.7 × 0.425 | 1.29 | 3.80 | 77.30 | - | 18.90 | - |
| 0.425 × 0.150 | 2.33 | 8.00 | 75.60 | 0.20 | 16.20 | - |
| 0.150 × 0.075 | 2.99 | 4.30 | 81.50 | 0.20 | 14.00 | - |
| -0.075 | 2.67 | 2.40 | 85.00 | 0.40 | 8.70 | 3.50 |

Para realizar la aglomeración se optó por utilizar mezcladores de cemento, según el método descrito por Chamberline para realizar pruebas de aglomeración a escala laboratorio. Los resultados del mineral al pasar por el mezclador se observan en la figura 12. Estas pruebas se desarrollan a una velocidad de giro de 20 rpm y 5 grados de inclinación, además de una solución ácida formada por 20% de ácido sulfúrico y 80% agua. Se emplean en cada prueba 10 kg de cada uno de los diferentes minerales, los cuales provienen de minera Zaldívar Chile.



Figura 12: Alimentación, mezclador de cemento y material aglomerado

De los resultados obtenidos, se realiza la inspección de los cambios producidos en el proceso de aglomeración de los minerales con o sin presencia de estuco. A nivel industrial, la metodología más simple y utilizada comúnmente es el método del guante la cual involucra una inspección visual del glomero para ver su calidad como estipula Velarde. El color del glomero y tamaño depende directamente del perfil granulométrico ocupado, solución ácida suministrada. En este caso, también se agrega una nueva variable que es la presencia de sulfato de calcio semihidratado en diferentes cantidades. Como se observa en la Figura 13, se logran buenos resultados de aglomeración en presencia de 3 a 5% de estuco y de 7 a 10% de ácido en solución. Los resultados obtenidos bajo otras combinaciones no lograron los resultados buscados, produciendo glomeros secos o con mucha humedad.



Figura 13: Inspección visual de los resultados de diferentes pruebas de aglomeración

Para analizar el comportamiento de los cambios en presencia de estuco, se realizan pruebas de lixiviación en dos columnas unitarias de 182,8 cm de largo por 10 cm de diámetro. El ciclo de lixiviación utilizado fue de 112 días y se utiliza 8 L/m²/h como flujo de solución lixivante. Los resultados de extracción de cobre de estas columnas se pueden observar en la Figura 14, donde se logran recuperaciones cercanas a 44% y existe un incremento considerable de un 5% en la recuperación en presencia de estuco.

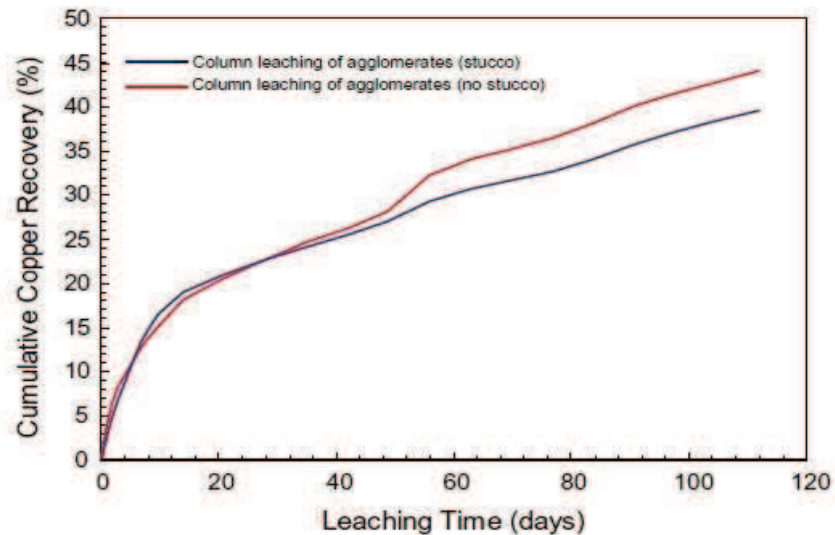
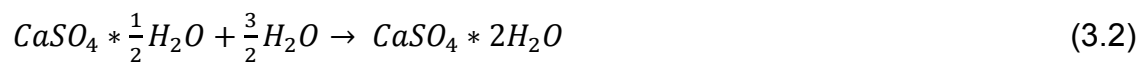


Figura 14: Comparación en recuperación de cobre desde columnas de lixiviación con aglomerado

Al observar este incremento en la extracción de cobre en presencia de estuco, se analizó los cambios que se producen en el proceso de aglomeración. El aumento en el tamaño de los glómeros obtenidos depende directamente de la adición de estuco y agua en la mezcla. Al adicionar en una cantidad determinada el sulfato de calcio semihidratado, este reacciona con el agua lo que produce la generación de yeso como se indica en la siguiente ecuación 3.2:



Cuando existe la presencia de yeso no existe una reacción hidratante. Por esta razón, es que se presenta la necesidad de mantener una cantidad de agua y ácido adecuada para obtener una aglomeración ideal en presencia de

estuco. En la Figura 15 se presenta una comparación de cómo afecta una aglomeración con formación de yeso y en una presencia adecuada de estuco.

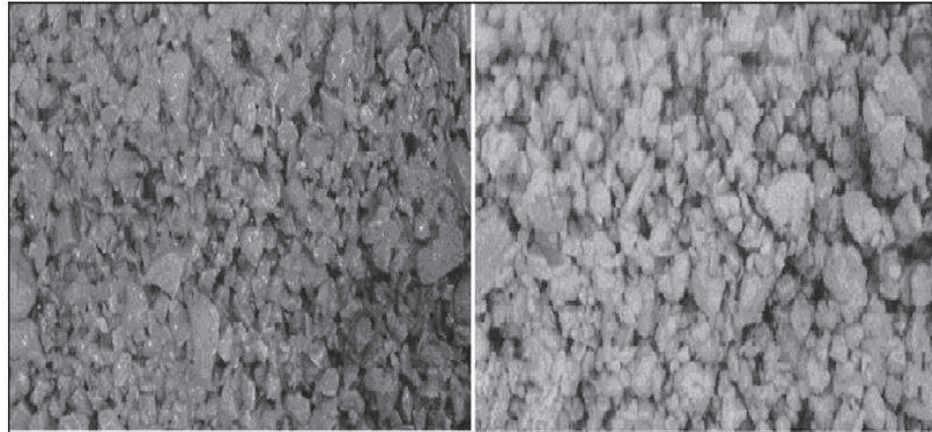


Figura 15: Fotografías de aglomerados sin presencia de estuco (izquierda) y presencia de estuco (derecha)

En orden para lograr una buena adhesión de las partículas finas y formación de glómeros estables, el estuco proporciona una hidratación adecuada inmovilizando los finos y cohesionándolos a partículas de mayor tamaño.

3.5. Poliacrilamida como aditivo de aglomeración para lixiviación en pilas

Al hablar de fisicoquímica en una etapa de aglomeración, las fuerzas de atracción son fuerzas que actúan en las partículas minerales como una cubierta entregando más fuerza a la adición de minerales. La atracción entre partículas sólidas es realizada en gran parte por fuerzas moleculares, electrostáticas y magnéticas como estipula Lewadowski y Kawatra. Estas fuerzas además

proporcionan otros mecanismos en la superficie mineral como son la adhesión y cohesión, puentes de sólidos, tensión superficial y capilaridad.

Lewadowski realizo experimentos para determinar qué tipo de ligante produce la aglomeración más estable. Junto a lo anterior se buscó identificar si las uniones de hidrógeno o la atracción electrostática producen un glomero más estable.

Tabla 3: Análisis mineralógico de muestras a lixiviar

| Mineral | wt.% | Method |
|----------------------|-------|--------|
| Pyrite | 1.2 | XRD |
| Quartz | 42 | XRD |
| Muscovite | 22 | NIR |
| K-feldspar | 21 | XRD |
| Plagioclase | 5 | XRD |
| Kaolinite | 4 | NIR |
| Swelling clay | 3 | NIR |
| Biotite | 1 | NIR |
| Chlorite | 0.5 | NIR |
| Chalcocite/covellite | 0.25 | OM |
| Chalcopyrite | Trace | OM |

Un mineral con baja cantidad de Calcocita (Cu_2S) fue utilizado en estas pruebas. El mineral fue chancado hasta llegar a un 85% pasante $\frac{1}{4}$ " con el fin de tener un perfil granulométrico adecuado para las pruebas. Este perfil es particularmente importante dado la principal característica de la etapa de aglomeración que es el controlar la migración de partículas finas. Las muestras fueron preparadas pasando toda la muestra mineral a través de un harnero y utilizando 5 diferentes mallas como se observa en la Tabla 4. Cada muestra obtenida por malla fue dividida y caracterizada para confirmar que todas las muestras fueran iguales. Las muestras finales corresponden a la combinación de minerales fraccionados con las 5 mallas. Las muestras experimentales finales poseen el mismo perfil granulométrico que la original.

Tabla 4: Análisis granulométrico de muestras minerales

| Ore size fraction | % size fraction |
|---|------------------|
| + 1/4 in. (+ 6350 μm) | 1.3% \pm 0.0% |
| - 1/4 in. to + 4 mesh (- 6350 to + 4750 μm) | 15.2% \pm 0.1% |
| - 4 mesh to + 6 mesh (- 4750 to + 3350 μm) | 15.9% \pm 0.1% |
| - 6 mesh to + 10 mesh(- 3350 to + 1700 μm) | 20.6% \pm 0.1% |
| - 10 mesh (- 1700 μm) | 47.0% \pm 0.4% |

La estabilidad de la aglomeración fue evaluada utilizando un test de humedad con solución ácida, donde 500 gramos de mineral fueron agregados a un tambor aglomerador. Se activa el tambor, mientras una mezcla de refino y poliacrilamida son agregados utilizando una botella spray como se observa en la Figura 16. La cantidad de solución agregada es de 0,008 mL/g de mineral. Una vez finalizada la aglomeración, las partículas son retiradas del tambor y puestas cuidadosamente en una malla 10 Tyler. Se realiza el secado de los glómeros a temperatura ambiente (20-25°C) por 24 horas.

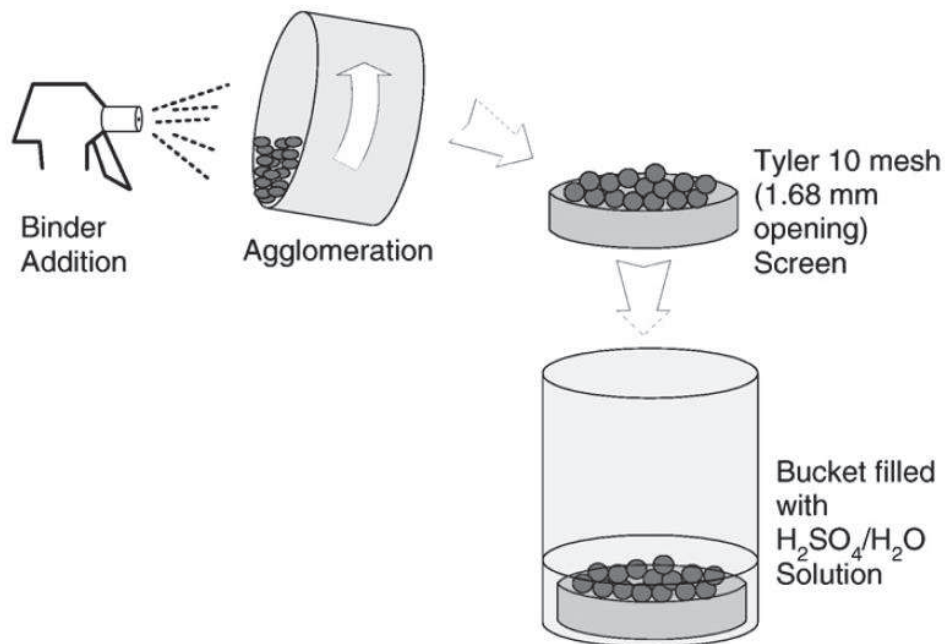


Figura 16: Test de humedad con solución ácida

Durante este tiempo de curado un contenedor de 18,9 litros es llenado con solución ácida con una concentración de 6 gramos de H₂SO₄ por litro, obteniendo un pH cercano a 1,8. Esta concentración representa la acides de la solución utilizada en la operación minera donde el mineral fue obtenido. La malla Tyler, junto con los glómeros, es introducida en el contenedor con solución ácida durante 30 minutos, para luego ser cuidadosamente retirados del contenedor y permitir el drenaje de los remanentes de ácido en los glómeros. La solución luego es filtrada para recuperar el mineral que pasará a través de la malla Tyler para luego ser secada y pesada.

El valor de migración de finos, es calculado a partir del peso del mineral pasante a través de la malla 10 Tyler utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Migración de finos} = \frac{\text{Peso del mineral migrado desde la muestra}}{\text{Peso total de la muestra} - \text{Mineral fino retenido en la malla}} \quad (3.3)$$

Se analizaron diferentes tipos de soluciones aniónicas, catiónicas, no-iónicas e iónicas en las diferentes pruebas para determinar bajo qué características se logra la aglomeración más estable. Estos resultados se observan en la Figura 17, donde se puede observar como algunos productos inciden de mejor forma en la disminución de los porcentajes de migración de finos que otros.

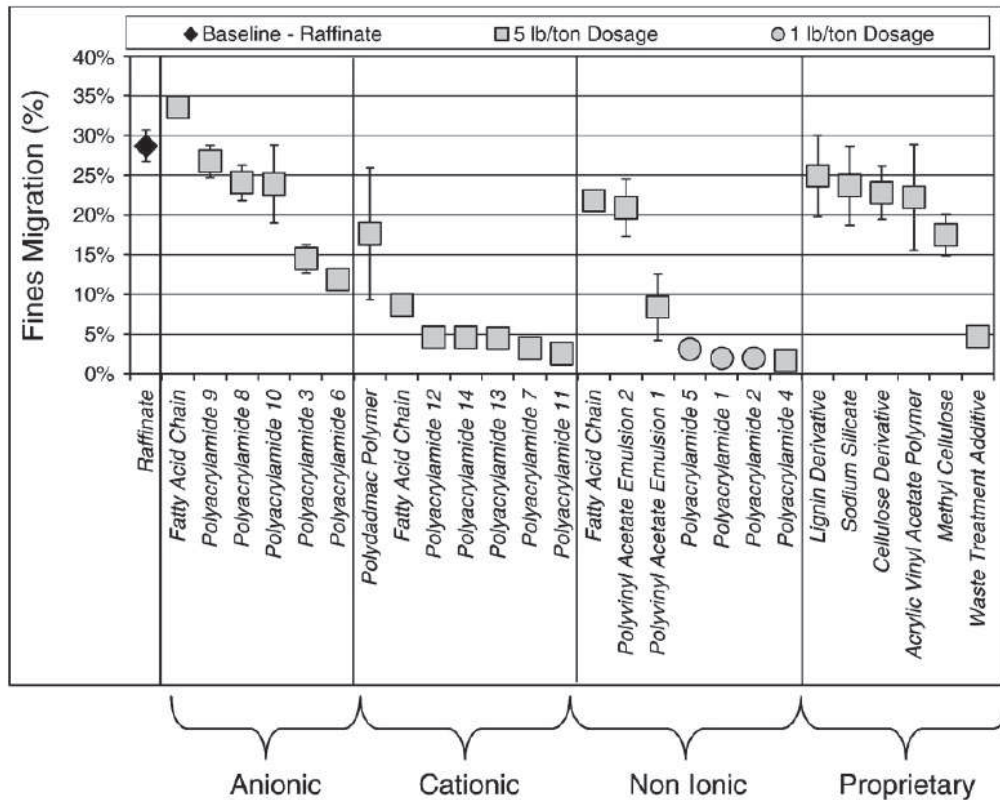


Figura 17: Disminución de porcentajes de migración de finos con diferentes productos

Aunque los resultados presentan variaciones considerables en la mitigación de finos, los mejores resultados se encuentran para productos catiónicos y no-iónicos. También se puede ver que los mejores resultados de mitigación fueron logrados por las diferentes pruebas en presencia de poliacrilamida. Esta situación ocurre por el alto peso molecular que tienen al poseer un comportamiento similar a lo estudiado por Green. Un polímero que posee un alto peso molecular aumenta la floculación (Michaels, 1954).

El mejor comportamiento con soluciones catiónicas y no-iónicas se ve atribuido particularmente a la superficie química presente en el mineral. A pH 2 la superficie del mineral posee un potencial z más negativo que el potencial z neutro como se indica en la Figura 18. Las partículas de menor tamaño poseen un potencial z más negativo que aquellas partículas de mayor tamaño

debido probablemente a los cambios en la concentración relativa de los minerales presentes al momento de ser chancados.

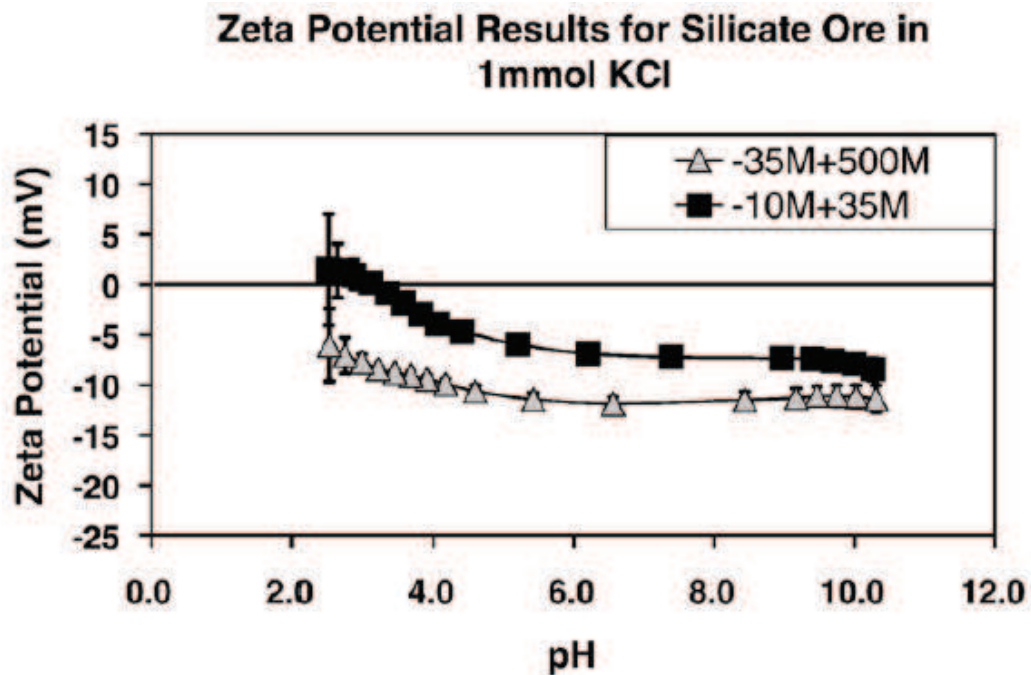


Figura 18: Potencial z de pruebas de humedad para diferentes fracciones minerales

El hecho de que el potencial z al ser medido sea neutro o ligeramente negativo en un pH ácido sugiere que las sustancias catiónicas tienden a unirse de forma más fuerte que las sustancias aniónicas. Junto a lo anterior, las sustancias además pueden tener contacto con la superficie por medio de puentes de hidrógeno. Estos puentes ocurren cuando existe una atracción e interacción entre el átomo electronegativo y el átomo de hidrógeno agrupado a otro átomo negativo.

Los puentes de hidrógeno generalmente son más fuertes que una fuerza de Van der Waals, pero más débil que uniones covalentes o iónicas. En la

Figura 19 se compara la presencia de puentes de hidrógeno en diferentes cadenas de reactivos.

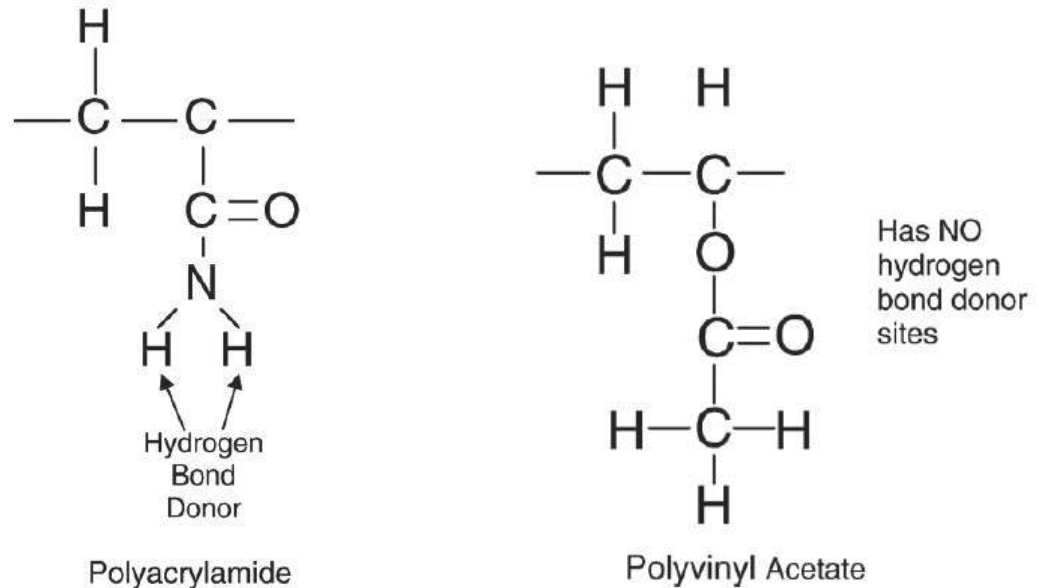


Figura 19: Cadena de poliacrilamida con enlaces de hidrógeno (izquierda) y cadena de acetato polivinílico sin enlaces disponibles para átomos de hidrógeno (derecha)

3.5. Lixiviación de oro en presencia de agentes surfactantes fluorocarbonados

Waddell utilizó 5 surfactantes del tipo fluorocarbonado para evaluar el comportamiento del pH y tensión superficial que presenta una lixiviación de oro en un medio cianurado. 1360 kilos de mineral proveniente de Coeur Rochester inc. fue utilizado para formar muestras de 90 kilos a las cuales se adiciona los diferentes reactivos. El mineral es separado en diferentes fracciones utilizando un harnero Gilson, para luego ser mezclado nuevamente con el fin de lograr el

mismo perfil granulométrico en cada muestra. Las pruebas se realizan en tambores de 200 Litros, los que son regados con la solución lixiviante.

3.5.1. Surfactantes utilizados

Para realizar estas pruebas se comparan 6 diferentes surfactantes fluorocarbonados.

- **Surfactante 1:** Fluorad™ Surfactante fluoroquímico FC-120 de 3M Co. Esta es una solución con un 25% de sólidos de $C_{10}F_{21}SO_3^-H_4N^+$. Fue diluido en agua para formar una solución de concentración de sólido al 10%.
- **Surfactante 2:** Fluorad™ Surfactante fluoroquímico FC-171 de 3M Co. $C_8F_{17}SO_2N(C_2H_5)C_2H_4O(C_2H_4O)_{6.2}CH_3$, donde 6,2 es valor promedio de distribución. Fue diluido en agua para formar una solución de concentración de sólido al 10%.
- **Surfactante 3:** Fluorad™ Surfactante fluoroquímico FC-135 de 3M Co. Esta es una solución al 50% de $C_8F_{17}SO_2N(H)CH_2CH_2CH_2N^+(CH_3)_{3l}^-$. Fue diluido en agua para formar una solución de concentración de sólido al 10%.
- **Surfactante 4:** Surfactante fluoroalifático de estructura $C_5F_{11}O(CF_2)_5COO^-H_4N^+$. Esta solución fue tratada con amonio acuoso en exceso diluido para formar una sal y luego ser disuelta en agua para formar una solución con 5% de concentración en sólido.

- **Surfactante 5:** Surfactante fluoroalifático formado por las estructuras $C_8F_{17}SO_2N(C_4H_9)CH_2CH_2OC(O)CH=CH_2$ (325 g) $CH_2=CHC(O)O(CH_2CH_2O)_{17}CH_3$ donde 17 es el valor promedio de distribución (75 g), $CH_2=CHC(O)N(H)C(CH_3)_2CH_2SO_3H$ (100 g) además de isopropanol (2.847 g). Esta solución surfactante fue diluida en agua para formar una solución de concentración de sólido al 10%.
- **Surfactante 6:** Surfactante fluoroalifático con estructura $C_6F_{13}SO_2N(CH_2CH_2COO^-)CH_2CH_2CH_2N^+(CH_3)_2H$. Fue diluido en agua para formar una solución de concentración de sólido al 10%.

Cada surfactante es diluido en agua hasta formar 10 litros de solución a una concentración de 250 ppm. Se realiza una prueba en blanco para comparar los resultados de los diferentes reactivos. Junto a lo anterior, se agregan 0,1 gramos de CaO para mantener un pH superior a 10. Se utiliza un flujo de 0,02 mL/min/cm² durante los primeros 14 días para luego ser reducido a 0,004 mL/min/cm² para los siguientes 50 días.

Se realiza una medición diaria de la tensión superficial para cada prueba, donde el promedio de ellas se presenta en la Tabla 5. Se puede observar como los surfactantes fluorocarbonados producen una buena estabilidad a la lixiviación. Junto a lo anterior, no existe un incremento en el consumo de óxido de calcio o cianuro de sodio al ser comparados con la prueba sin surfactante.

Tabla 5: Tensión superficial en presencia de diferentes surfactantes.

| Example | Surf. Tens (dynes/cm) | Consumption (g/kg): | |
|---------|--------------------------|---------------------|-------|
| | | CaO | NaCN |
| 1 | 21 | 1.02 | 0.13 |
| 2 | 23 | 1.025 | 0.10 |
| 3 | 20 | 1.02 | 0.105 |
| 4 | 17 | 0.965 | 0.13 |
| 5 | 30 | 1.00 | 0.155 |
| 6 | 20 | 1.025 | 0.10 |
| C1 | 45 | 0.985 | 0.125 |

El pH fue medido a diario para cada prueba y el resultado se presenta en la Figura 20, donde se observa que en todos los casos, las lixiviaciones realizadas en presencia de surfactantes mantienen un alto pH en desmedro de la prueba de control.

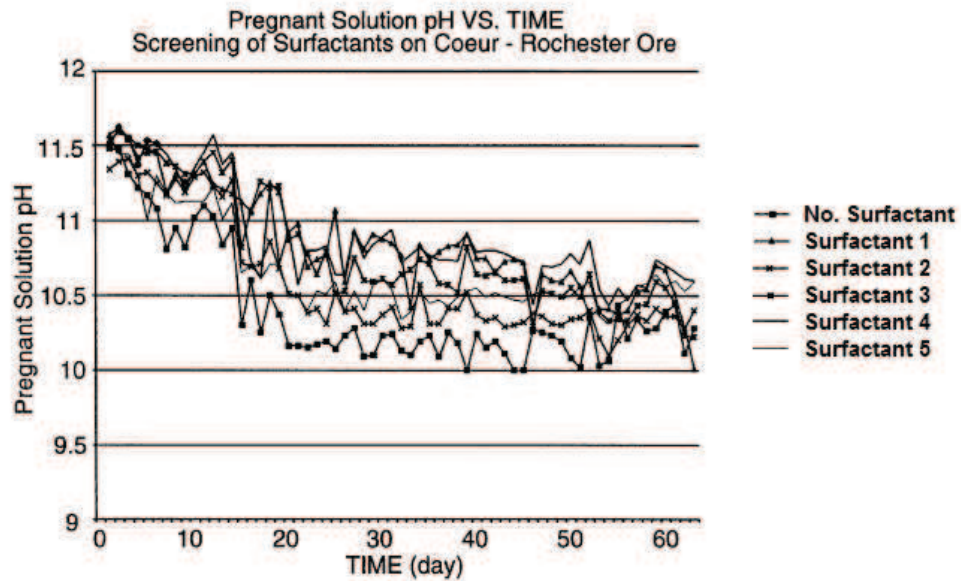


Figura 20: Medición de pH en soluciones con presencia de diferentes surfactantes

4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Como propósito de investigación se busca analizar cómo afecta la presencia de tensoactivos surfactantes en un proceso de lixiviación. Con el fin de ampliar el espectro de resultados posibles, se opta por desarrollar la investigación utilizando 3 tipos de muestras minerales de cobre: una muestra de mineral oxidado, mineral sulfurado y una muestra de mineral mixto. Esto con el fin de obtener información que ayude a identificar los fenómenos que ocurren desde una muestra original, además de contar con la presencia de material estéril, con el fin de comprender cómo influye el área superficial y las características físicas presentes en cada tamaño granulométrico frente a la respuesta fisicoquímica obtenida en la lixiviación.

Para investigar de una forma eficiente el comportamiento de una lixiviación en presencia de un agente surfactante se plantea un plan de trabajo que involucra el análisis de minerales de óxido y sulfuro de cobre además de la solución lixiviante a utilizar en presencia de los agentes surfactantes. En el caso de las especies minerales se realizan las siguientes caracterizaciones:

- **Química:** Con el fin de obtener información respecto a la composición del mineral.
- **Mineralógica:** Para estudiar las estructuras y propiedades que presentan cada mineral. Se plantea la utilización de briquetas para ser enviadas a DRX para su estudio.
- **Litológica:** Se busca estudiar de mejor forma sus características físicas, y que son propias de cada mineral.

Además de las caracterizaciones al mineral se miden las variables fisicoquímicas más importantes en el proceso de lixiviación. Para las soluciones de riego y PLS se analiza su tensión superficial, viscosidad y densidad además de un análisis químico a cada solución para identificar como la interacción con los surfactantes produce finalmente el aumento en la extracción de cobre.

El desarrollo de este estudio se lleva a cabo en los laboratorios de investigación del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la Universidad Católica del Norte.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como parte del desarrollo de la investigación, los 3 tipos de surfactantes fluorocarbonados son adicionados a cada mineral durante la etapa de aglomeración. De esta manera, es posible comparar las soluciones entre si teniendo la posibilidad de modificar las concentraciones de cada tensoactivo sin variar las variables de operación.

Se establece la realización de 45 pruebas de lixiviación en total, 24 pruebas en columnas y 21 pruebas de lixiviación acelerada ISO-pH. Junto a lo anterior se realiza el proceso de aglomeración del mineral a través de una aglomeración mecánica, la cual simula el comportamiento que tiene el mineral al pasar por un tambor aglomerador y mejorar la calidad del glómero formado por las partículas minerales.

Se trabaja con un perfil granulométrico de minerales los cuales contienen como tamaño máximo de 20 mm. El diámetro de las columnas a utilizar es concordante al tamaño de las partículas para evitar “efectos de pared” o generación de caminos preferenciales de flujo. Para el cálculo de cantidad de mineral a utilizar se considera el diámetro de la columna y la longitud de la misma.

4.1. Aglomeración y curado de muestras

Se efectúa la etapa de aglomeración para la preparación y homogenización de muestras en bidones de 5 litros tipo lecheros. Estos bidones poseen un largo de 36,5 cm y diámetro de apertura de 16 cm. Para realizar la aglomeración los lecheros se depositan sobre una mesa de rodillos

giratorios, los cuales generan el movimiento giratorio en los bidones como se muestra en la Figura 21. El objetivo es trabajar con un tiempo de aglomeración establecido, utilizando diferentes dosis de surfactante (0, 20 y 50 ppm) con el fin de lograr una adecuada humectación del mineral.



Figura 21: Aglomeración de muestras minerales

Los surfactantes son ingresados al proceso de aglomeración diluidos en agua de forma similar al método utilizado por Lewandowski con el fin de controlar la cantidad de humedad presente en el material y mejorar la mojabilidad del mineral con la solución lixiviante.

Tabla 6: Condiciones de aglomeración para pruebas en columnas e ISO-pH

| | Columnas unitarias | Pruebas ISO-pH | |
|---|---------------------------|-----------------------|-----------------|
| Masa de mineral | 4.000 | 500 | Gramos |
| Dosis de ácido (H₂SO₄) | 18 | 18 | kg/t |
| Porcentaje de humedad | 10 | 10 | % |
| Tiempo de homogenización de surfactante | 90 | 90 | Segundos |
| Tiempo de aglomeración | 5 | 5 | Minutos |
| Velocidad de agitación | 75 | 75 | Rpm |
| Tiempo de curado | 72 | 72 | Horas |
| Dosificación de surfactante | 0, 20 y 50 | 0, 20 y 50 | Ppm |

Las condiciones utilizadas en esta etapa de aglomeración para las pruebas de columnas unitarias y pruebas ISO-pH se presentan en la tabla 6.

El tiempo de aglomeración está determinado por el tiempo de residencia que tiene el mineral al pasar por un tambor aglomerador en planta. Junto a lo anterior se hace una comparación con el tiempo que lleva lograr una aglomeración adecuada por medio de un paño rolerador. Estas muestras presentan granulometría bajo 10 mm según estudios realizados anteriormente por la empresa patrocinante del proyecto y que indican este tamaño como el más adecuado para las pruebas a realizar.

4.1.1. Preparación de solución aglomerante

Uno de los puntos críticos en este proyecto es la adecuada preparación de los surfactantes y cómo lograr que la solución ingresada en cada prueba de lixiviación contengan las mismas dosificaciones de estos agentes. Por lo anterior se emplea una solución inicial con concentración de 100 ppm de los tres diferentes surfactantes según sus características de densidad y porcentaje de surfactante diluido como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Cálculo de dosificación para soluciones iniciales

| | % Surfactante en 1 L | mL de surfactante | Gramos de surfactante | Conc. Inicial de solución (ppm) | Conc. Final de solución (ppm) | Vol. final (mL) | Vol. inicial (mL) |
|----------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|--|--|-----------------------|-------------------------|
| L-21199 | 24 | 240 | 250,0 | 250018 | 100 | 10000 | 4,0 |
| L-15767 | 98 | 980 | 1300,3 | 1300335 | 100 | 10000 | 0,8 |
| L-20886 | 15 | 150 | 155,8 | 155808 | 100 | 10000 | 6,4 |

A partir de los volúmenes de 10 litros y concentración de 100 ppm que tendrán las soluciones iniciales para el proyecto se calcula la cantidad de surfactante. Estas soluciones son diluidas en H₂O y se homogenizan por medio de agitación mecánica.

Con las condiciones definidas para esta etapa en la Tabla 7 se realiza el cálculo de las cantidades de solución surfactante, agua y ácido sulfúrico que debían ser utilizadas. Estas dependen directamente de la cantidad de dosificación de surfactante para mantener la humedad de 10% estipulada anteriormente y la cantidad de mineral a utilizar en cada prueba (muestras de 4.000 o 500 gramos). En la Tabla 8 se presentan las condiciones para cada prueba y diferente dosificación. Para asegurar un correcto volumen de las soluciones se utilizan pipetas aforadas y micropipetas.

Tabla 8: Condiciones de aglomeración para pruebas de lixiviación

| Tipo de Prueba | Dosificación Surfactante (ppm) | Surfactante Diluido | | H ₂ SO ₄ (mL) | H ₂ O (mL) |
|----------------|--------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| | | Surfactante (mL) | H ₂ O (mL) | | |
| Columnar | 0 | - | 300 | 39,1 | 60,9 |
| | 20 | 60 | 240 | 39,1 | 60,9 |
| | 50 | 150 | 150 | 39,1 | 60,9 |
| ISO-pH | 0 | - | 300 | 39,1 | 60,9 |
| | 20 | 60 | 240 | 39,1 | 60,9 |
| | 50 | 150 | 150 | 39,1 | 60,9 |

4.1.2. Procedimiento de aglomerado y curado

1. Verificar que la botella se encuentre limpia y seca. De no ser este el caso, limpiar y secar.

2. El mineral es ingresado en la botella. Posteriormente el surfactante es incorporado a la botella durante la homogenización por medio de un rociador según la dosificación determinada por la prueba. La homogenización tiene un tiempo total de 90 segundos, donde se realiza la humectación total del mineral con el surfactante.
3. Se detiene la humectación del mineral en la botella y se agrega la dosificación de ácido estimada anteriormente y H₂O para alcanzar la humedad buscada. Se cierra nuevamente la botella y comienza una etapa de aglomeración de 5 minutos de duración.
4. Una vez terminada la aglomeración las muestras minerales son retiradas de las botellas y comienza la etapa de curado del mineral, lo que tiene un tiempo de reposo de 72 horas para luego ser cargadas en las columnas.

4.2. Pruebas ISO-pH

Con el fin de obtener mayor información de la extracción de cobre en presencia de los surfactantes es que se realizan pruebas de lixiviación en botellas. En estas pruebas se mantiene constante una variable tan importante como es el pH. Finalizadas estas pruebas se podrán contrastar con los resultados obtenidos con las columnas unitarias. Estas pruebas se desarrollan en el mismo equipo en que anteriormente se produjo la aglomeración de las muestras y utilizando el mismo tipo de bidón de 5 litros.

Para identificar el impacto a dos dosis de surfactantes diferentes en minerales de óxido y sulfuro de cobre, es que se involucra el desarrollo de 21 pruebas. Estas pruebas utilizan muestras de los tres diferentes minerales, bajo iguales condiciones de operación. Se pueden ver los detalles de cada prueba en la Tabla 9.

Tabla 9: Condiciones operacionales de pruebas ISO-pH

| N° Prueba | Mineral | Surfactante (ppm) | | | Curado (kg/t) | Concentración H ₂ SO ₄ (g/L) | RPM | Tiempo (h) |
|-----------|---------|-------------------|---------|---------|---------------|--|-----|------------|
| | | L-21199 | L-15767 | L-20886 | | | | |
| 1 | Óxido | 0 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 2 | Oxido | 20 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 3 | Oxido | 50 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 4 | Oxido | 0 | 20 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 5 | Oxido | 0 | 50 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 6 | Oxido | 0 | 0 | 20 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 7 | Oxido | 0 | 0 | 50 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 8 | Mixto | 0 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 9 | Mixto | 20 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 10 | Mixto | 50 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 11 | Mixto | 0 | 20 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 12 | Mixto | 0 | 50 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 13 | Mixto | 0 | 0 | 20 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 14 | Mixto | 0 | 0 | 50 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 15 | Sulfuro | 0 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 16 | Sulfuro | 20 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 17 | Sulfuro | 50 | 0 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 18 | Sulfuro | 0 | 20 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 19 | Sulfuro | 0 | 50 | 0 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 20 | Sulfuro | 0 | 0 | 20 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |
| 21 | Sulfuro | 0 | 0 | 50 | 14 | 8,0 | 75 | 72 |

Para calcular la extracción de cobre que se produce en cada una de estas pruebas las muestras obtenidas serán caracterizadas por cobre total. El consumo de ácido en cada prueba se calcula a partir del ácido libre obtenido de cada muestra.

Para mantener una solución lixivante constante dentro de cada prueba es que se repondrá con 400 mL de solución nueva cada vez que se tome muestra durante el tiempo de lixiviación.



Figura 22: Prueba de lixiviación ISO-pH

4.2.1. Procedimiento de pruebas ISO-pH

1. Verificar que el bidón tipo lechero se encuentra limpio y seco, si no fuese el caso, limpiar y secar.
2. Transcurrido el tiempo de reposo (luego de la etapa de aglomeración), se procede a realizar pruebas de lixiviación, todas ellas operando bajo las condiciones informadas en la tabla 9.
3. Se realiza una lixiviación ácida, donde la solución utilizada en la lixiviación no es acondicionada. Involucra la medición de pH y se ajusta el valor de la solución mediante la adición de H_2SO_4 de grado técnico o de agua.

4. Agregar a la botella de 1,5 L de solución ácida junta al mineral aglomerado y curado (según las características de concentración de la Tabla 9). Se cierra fuertemente el recipiente y se ubica en la mesa de rodillos.
5. Al encender el equipo se ajustan las rpm de la botella a 75 y el temporizador para medir el tiempo de lixiviación.
6. Pasado una hora se detiene el equipo en funcionamiento. Se mide pH y Eh de la solución, agitando manualmente con movimientos suaves hasta que el equipo medidor de pH se estabilice y se registran los valores. Se decanta el mineral por 10 minutos para extraer una muestra de 400 mL con jeringa. Se filtra y almacena en un frasco rotulado. Luego se reponen los 400 mL con solución ácida (solución de reposición), se agita manualmente el botellón y se mide el pH, el que debe poseer el mismo valor que se registró en la medición inicial, si no fuese así, se agrega ácido grado técnico por medio de una jeringa (anotar el volumen de ácido agregado). Se cierra el recipiente, se ubica en la mesa de rodillos y se enciende el equipo nuevamente.
7. Se realizan mediciones en los tiempos 1, 2, 4, 8, 24, 48 y 72 horas. Esto involucra la repetición del paso 6 para la toma de muestra y control de pH.
8. Al finalizar la prueba, se deja decantar el mineral por un tiempo de 1 hora, se toma una última muestra de 400 mL, se filtra y se almacena en una botella rotulada. Se realiza la medición de pH y Eh final de la solución. Una vez adquirida la muestra de solución

se agita la pulpa y trasvasija el contenido a un embudo filtrante preparado con pliego de papel filtro, para finalmente ser filtrada para obtener una muestra representativa del sólido. La muestra sólida (ripio + papel filtro) es ingresada a una mufla para su secado durante un periodo de 24 horas. Una vez seca la muestra se homogeniza y se toma 2 muestras de 100 g para su posterior pulverización y envío a análisis químico y difracción de rayos X.

9. Las muestras de solución inicial y de reposición junto a las muestras de solución obtenidas a 1, 4, 8, 24, 48 y 72 horas serán analizadas químicamente por cobre y ácido libre.

Con los datos de ley de cabeza analizada, peso de muestra y cobre disuelto, se evalúa la extracción de cobre total y cobre soluble. Con el ácido total agregado menos el remanente en los 1,5 litros de solución final y el removido en las muestras obtenidas se determinan los gramos de ácido consumidos.

4.3. Pruebas en Columnas

Una vez producida la aglomeración de las muestras se realizan 24 pruebas columnares bajo iguales condiciones operacionales. Estas pruebas involucran la utilización de separación granulométrica para reproducir muestras representativas del mineral e iguales entre sí. Se evalúan las pruebas bajo las condiciones mostradas en la Tabla 10. Con el propósito de entender el comportamiento físico químico que tendrá la presencia de soluciones fluorocarbonadas a diferentes tamaños de partícula presentes en la muestra,

es que se utilizan condiciones operacionales óptimas de riego, concentración y humedad desarrolladas por la empresa minera a la cual pertenece el mineral.

De estas pruebas se obtiene información mediante la caracterización de la reactividad química de la muestra según los siguientes parámetros de respuesta: Consumo de ácido bruto y extracción de cobre. Junto a lo anterior en el caso de las soluciones, se consiguen muestras para realizar análisis de sus tensiones superficiales, densidad y viscosidad.

Tabla 10: Condiciones operacionales de pruebas columnares

| N° Prueba | Mineral | Surfactante (ppm) | | | Curado (kg/t) | Tasa de riego (L/h m ²) | Concentración ácido (g/L) | % Humedad | Tiempo (días) |
|-----------|---------|-------------------|---------|---------|---------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------|---------------|
| | | L-21199 | L-15767 | L-20886 | | | | | |
| 1 | Óxido | 0 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 2 | Oxido | 20 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 3 | Oxido | 50 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 4 | Oxido | 0 | 20 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 5 | Oxido | 0 | 50 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 6 | Oxido | 0 | 0 | 20 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 7 | Oxido | 0 | 0 | 50 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 8 | Mixto | 0 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 9 | Mixto | 20 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 10 | Mixto | 50 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 11 | Mixto | 0 | 20 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 12 | Mixto | 0 | 50 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 13 | Mixto | 0 | 0 | 20 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 14 | Mixto | 0 | 0 | 50 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 15 | Sulfuro | 0 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 16 | Sulfuro | 20 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 17 | Sulfuro | 50 | 0 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 18 | Sulfuro | 0 | 20 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 19 | Sulfuro | 0 | 50 | 0 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 20 | Sulfuro | 0 | 0 | 20 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |
| 21 | Sulfuro | 0 | 0 | 50 | 14 | 9,0 | 8,0 | 10 | 10 |

Para los rípios extraídos finalizadas las pruebas, la muestra es homogenizada y se obtienen muestras a diferentes tamaños granulométricos de 19,05; 12,70; 9,53; 6,35; 1,65 y 0,83 mm. Una vez calculada la extracción de

cobre de estas pruebas, aquellas que hayan obtenido las mejores extracciones son pulverizadas para luego ser enviadas a análisis químico y DRX.

4.3.1. Características de pruebas columnares

Las pruebas de lixiviación se desarrollan en columnas con dimensiones de 300 mm de altura y 96,2 mm de diámetro de abertura. La solución lixivante es ingresada a la columna por medio de goteros con la tasa de riego estipulada anteriormente.

El ciclo de cada columna está formado por 2 días de curado del mineral, un tiempo de lixiviación de 10 días con riego continuo y 2 días de lavado del mineral. Finalmente se deja el mineral por 2 días para su posterior retiro de la columna.



Figura 23: Pruebas columnares de lixiviación

4.4. Caracterización de las soluciones acuosas

La caracterización de las soluciones consiste en la medición de densidad, viscosidad, tensión superficial y consumo de ácido. Para garantizar que las propiedades sean medidas a una misma temperatura, las muestras son ingresadas a un baño termostático con el fin de controlar su temperatura a 25°C.

4.4.1. Análisis Químico

Con el fin de obtener la extracción de cada prueba realizada, se toma una muestra de solución acuosa a diferentes intervalos de tiempo. En el caso de las pruebas de lixiviación en columnas la toma de estas muestras se realiza los días 1, 2, 4, 6, 8 y 10.

Esta caracterización química para saber la cantidad de cobre total presente en la muestra, se realiza en el Centro de Investigación Minero y Metalúrgico (CIMM) y en el Laboratorio Químico SERQUIM mediante el método de Espectroscopia de Absorción Atómica.

4.4.2. Densidad

La medición de densidad se realiza aplicando la técnica de la picnometría. Esta medición se obtiene utilizando un picnómetro (Figura 24) y una balanza analítica. Los valores se ingresan a la ecuación 4.1.

$$\text{Densidad} = \frac{(P2-P1)}{(P3-P1)} \quad (4.1)$$

Donde (P1) es el peso de un picnómetro seco limpio y tapado, el cual es llenado con solución acuosa y pesado con el tapón (P2). En seguida es ambientado a la temperatura que se desea medir durante 10 minutos. Finalmente se repite la operación reemplazando la solución por agua (P3).



Figura 24: Picnómetro y balanza analítica para medición de densidad.

4.4.3. Viscosidad

La medición de viscosidad se realiza utilizando un viscosímetro de caída de bola Gilmont tal como se muestra en la Figura 25.

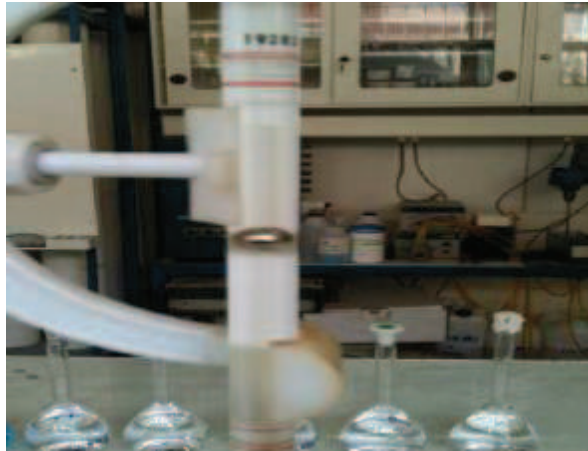


Figura 25: Viscosímetro de Gilmont.

Para la medición de viscosidad se sigue el siguiente procedimiento:

- Retirar las tapas superiores de control de manera que el tubo quede con su abertura expuesta. Una vez realizado esto, el tubo debe ser llenado con 10 mL de la solución que se desea medir.
- Posteriormente se debe ingresar el estándar correspondiente por medio de una pinza y colocar las tapas superiores. A medida que se van presionando estas secciones se produce un rebalse por la parte superior del viscosímetro.
- Realizados los puntos anteriores se deja caer el estándar girando el viscosímetro en 180 grados. Una vez que este llega a la zona inferior el tubo es girado nuevamente en 180 grados y se comienza a tomar el tiempo en que el estándar pasa entre las marcas del viscosímetro.

Para determinar la viscosidad se utiliza la ecuación 4.1.

$$\mu = K * (\rho_f - \rho) * t \quad (4.1)$$

Donde:

μ : Viscosidad (cp)

K= Constante del viscosímetro

ρ_f = Densidad de la bolita (g/mL)

ρ = Densidad del líquido (g/mL)

t = Tiempo (min)

Los valores de la constante del viscosímetro y densidad dependen directamente de la bolita utilizada en la medición. En la Tabla 11 se observan las características de cada una de ellas.

Tabla 11: Características de bolitas de Viscosímetro de Gilmont.

| Estándar de Viscosímetro | | | |
|--------------------------|--------|------------------|---------|
| | Vidrio | Acero Inoxidable | Tántalo |
| Constante (K) | 0,3 | 3,3 | 35 |
| Densidad | 2,53 | 8,05 | 16,6 |

4.4.4. Tensión superficial

La medición de tensión superficial se realiza por medio de un tensiómetro de Dunouy, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26: Tensiómetro de Dunouy

El procedimiento para la utilización del equipo es la siguiente:

- Se homogeniza la muestra y se agregan 50 mL de solución acuosa a una probeta. Esta será la muestra a utilizar para la medición.
- Se engancha el anillo limpio en el brazo del tensiómetro.
- Se coloca la muestra de solución acuosa en el vaso precipitado limpio y se posiciona en la mesa de muestra.
- Se levanta la mesa hasta que el anillo esté sumergido aproximadamente 5 a 7 mm en la solución.
- Se ajusta la posición hasta que el anillo se encuentre en la interfase y la palanca del brazo se encuentre en posición neutral.

- Al mismo tiempo se debe aumentar la torsión del anillo y bajar la mesa de la muestra hasta que se produzca el quiebre del film.
- Para determinar la tensión superficial real se ingresan los valores a la ecuación 4.2, la cual pertenece al manual de operación del tensiómetro.

$$F = 0,7250 + \sqrt{\frac{0,01452 * P}{C^2 * (D-d)}} + 0,04534 - 1,679 * \frac{r}{R} \quad (4.2)$$

Donde:

F: Tensión interfacial corregida (dina/cm)

R: Radio del anillo (cm)

r : Radio del alambre del anillo (cm)

P: Valor de la tensión observada (cm/dina)

D: Densidad del líquido (g/mL)

d: Densidad del Aire (g/mL)

C: Circunferencia del anillo (cm)

4.4.5. Concentración micelar crítica (CMC)

En una sustancia tensoactiva existen moléculas individuales de tensoactivo los cuales al asociarse producen partículas coloidales denominadas micelas. La concentración micelar crítica se refiere a la zona de aparición de estas partículas, las cuales son estructuras que se forman a partir de una concentración específica del tensoactivo. En esta zona, la fase acuosa se satura y se logra una tensión superficial de la solución constante, debido a

que cualquier molécula del surfactante se encuentra por encima de su límite de saturación en fase acuosa. En otras palabras, las interacciones hidrófobas entre las moléculas de surfactantes forman interacciones hidrofílicas surfactante/agua de forma espontánea.

Las micelas en medios acuosos pueden agrupar cientos de moléculas. La dimensión y la geometría de estos conglomerados dependen directamente de la estructura del surfactante y del ambiente físico-químico en que se encuentre (Mukerjee, 1977).

En esta investigación se utiliza para la medición de este parámetro el tensiómetro automático Krüss digital tensiometer K14, además de un dosificador Krüss para obtener las disoluciones correctas con el fin de reproducir los resultados.

4.5. Caracterización de muestras minerales

El mineral recibido para el estudio consta de 3 tambores de 250 litros, los cuales contienen muestras de mineral oxidado, mixto y sulfurado provenientes de Minera Zaldívar S.A. Cada mineral es homogeneizado por medio del método de palas y dividido por cuarteo y utilizando un cortador de riffle para obtener muestras representativas de cada mineral.

Estas muestras obtenidas son destinadas para las pruebas de lixiviación en botellas y columnas, además de algunas ser utilizadas para los siguientes análisis:

- Análisis Granulométrico
- Análisis Químico
- Análisis por difracción de rayos X

4.5.1. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico del mineral se realiza en el Laboratorio de Preparación Mecánica del Departamento de Ingeniería Civil Metalúrgica y Minas de la Universidad Católica del Norte para los tres diferentes minerales utilizados para la investigación.

Para desarrollar este análisis se incluye la utilización de un harnero (Gilson) además de un equipo Ro-tap, con el fin de obtener el espectro total tamaños buscados en el estudio. Las muestras son ingresadas al equipo Gilson durante 10 minutos. Una vez terminado el proceso, la sección de las muestras con granulometría bajo 0,83 mm, son enviadas a un Ro-tap para tener el perfil granulométrico completo. El tiempo de separación de muestra utilizado en el equipo Ro-tap es de 15 minutos. Este análisis se realiza tanto para una muestra de cabeza, como para los ripios obtenidos con el fin de tener la mayor cantidad de información de las pruebas.

4.5.2. Análisis Químico

Para contrastar los resultados entregados por minera Zaldívar, se realiza un análisis por malla con el fin de obtener las leyes presentes en las tres clases minerales.

El procedimiento incluye la separación de la muestra por mallas, donde las muestras sobre granulometría 1,65 mm fueron enviadas a un chancador de cono, con el fin de lograr una granulometría 1,65 mm y que pudieran ser trabajadas en el pulverizador con el objetivo de obtener muestras bajo granulometría 0,074 mm.

La caracterización química para la ley de cabeza del mineral se realiza por cobre total y cobre soluble en el Centro de investigación minero y metalúrgico (CIMM) y en el Laboratorio Químico SERQUIM mediante el método de Espectroscopia de Absorción Atómica. Al igual que el análisis granulométrico, se hace análisis químico a las muestras de cabeza y a los rípios obtenidos de las pruebas de lixiviación en columnas y botellas.

4.5.3. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos X (DRX) es utilizada para realizar una identificación completa de las fases presentes en las tres muestras minerales a utilizar en la investigación. Con esta información y analizando de igual manera los rípios obtenidos de las pruebas de lixiviación, es posible visualizar cómo interactúan las diferentes especies minerales.

El análisis de las muestras se lleva a cabo en el Departamento de Geología de la Universidad Católica del Norte, donde se utiliza un difractómetro de Rayos X Siemens modelo D5000 automático y computarizado.

Las condiciones de operación del equipo son las siguientes:

| | |
|-----------------------|---|
| Goniómetro: | Vertical Bragg-Bretano |
| Radiación: | Cu K α_1 (λ = 1,5406 Å) |
| Voltaje: | 40 Kv |
| Intensidad: | 30 mA |
| Detector: | Centelleo |
| Monocromador | |
| Secundario: | Grafito |
| Slits: | 1 mm/1mm/0.1mm |
| Scan range: | 3 - 70° 2 θ |
| Step Size: | 0.020° 2 θ |
| Step Time: | 1.0 s |
| Data Base: | ICDD (International Centre for Diffraction Data). |
| Programa | |
| Cuantificador: | TOPAS (Total Pattern Analysis Software) |

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Caracterización de surfactantes

Con el fin de comprender mejor las características propias de los agentes surfactantes, se realizan pruebas de viscosidad, densidad y tensión superficial. Junto a lo anterior, se desarrollan pruebas de concentración micelar crítica (CMC).

5.1.1. Mediciones de densidad

Para calcular la densidad de cada solución, se utiliza la técnica de picnometría dada la capacidad de certeza que posee frente a otros métodos utilizados.

Se realizan dos mediciones por cada surfactante, donde los resultados pueden verse a continuación:

Tabla 12: Resultados de picnometría realizadas a surfactantes

| | Medición 1 (g/cm ³) | Medición 2 (g/cm ³) | Densidad promedio (g/cm ³) |
|---------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| L-21199 | 1,044 | 1,039 | 1,042 |
| L-15767 | 1,328 | 1,326 | 1,327 |
| L-20886 | 1,032 | 1,045 | 1,039 |

Se puede desprender de la Tabla 12 que de los tres surfactantes analizados, el surfactante L-21199 y L-20886 presentan densidades bastante similares de 1,04 g/cm³. En el caso del surfactante L-15767, este presenta una

densidad mayor dado el porcentaje de sólido presente en la solución que es del 95%, frente al 24% del surfactante L-21199 y 15% del surfactante L-20886. Para eliminar esta diferencia, los surfactantes son diluidos en agua con el fin de ser comparados en el proceso de lixiviación.

5.1.2. Mediciones de viscosidad

Para la medición de viscosidad, se utiliza un viscosímetro de caída de bola el cual mide el tiempo de caída de este en una cantidad definida de surfactante. Las bolas a utilizar dependen directamente de la solución a medir y el tiempo que estas presenten en recorrer la distancia de medición. Para las soluciones surfactantes y según la densidad obtenida anteriormente, se utiliza una bola de acero inoxidable para los surfactantes L-21199 y L-20886, mientras para el agente L-15767 es requerido el uso de un estándar de Tántalo.

Tabla 13: Resultados de medición de viscosidad a cada surfactante

| | Medición 1 (Pa*s) | Medición 2 (Pa*s) | Viscosidad promedio (Pa*s) |
|---------|----------------------|----------------------|-------------------------------|
| L-21199 | 1,417 | 1,485 | 1,451 |
| L-15767 | 54,370 | 54,222 | 54,296 |
| L-20886 | 1,438 | 1,397 | 1,418 |

De la Tabla 13 se desprende lo elevada que es la viscosidad presentada por el surfactante L-15767 frente a los otros productos que permanecen dentro de un rango similar. Esta situación reafirma la necesidad de analizar la viscosidad de las soluciones a utilizar durante las pruebas de lixiviación que se encuentren con este agente.

5.1.3. Tensión superficial

Para las mediciones de tensión superficial, se utilizan tres concentraciones distintas de 10, 20 y 30 ppm de cada solución. Esta caracterización se realiza con el uso de agua desionizada y a partir de una concentración madre de 1000 ppm para cada surfactante.

La medición se realiza en un tensiómetro automático Krüss digital tensiometer K14, equipo perteneciente al laboratorio químico del centro de innovación de 3M. Los resultados se pueden observar en la Tabla 14.

Tabla 14: Tensión superficial a diferentes concentraciones de surfactante

| Tensión Superficial (mN/m) | | | |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| | 10 ppm | 20 ppm | 30 ppm |
| L-21199 | 48,63 | 45,54 | 40,00 |
| L-15767 | 46,42 | 37,60 | 26,85 |
| L-20886 | 65,39 | 59,97 | 57,32 |

5.1.4. Concentración micelar crítica

Al analizar el producto surfactante, en esta coexisten moléculas individuales de tensoactivo y partículas formadas por la asociación de moléculas de sustancia tensoactiva denominadas micelas. La formación de estas estructuras ocurre a partir de una cierta concentración del producto en forma de disolución, la cual se denomina concentración micelar crítica o CMC.

Con esta prueba se identificará la cantidad límite de dosificación que permitirá cambios en la tensión superficial por el surfactante y que para los propósitos de nuestro estudio, es la cantidad máxima de agente que puede tener la solución lixiviante. Se utiliza para este estudio una solución con concentración de 1000 ppm de cada surfactante diluido en agua desionizada, de la cual se realizan 23 diferentes dosificaciones para formar la CMC tal como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15: CMC realizada a productos surfactantes

| Tensión Superficial (mN/m) | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Dosificación (mL) | Dosificación (ppm) | Volumen acumulado (mL) | L-21199 | L-15767 | L-20886 |
| 0,000 | 0,0 | 50,000 | 71,70 | 71,33 | 71,99 |
| 0,101 | 2,0 | 50,101 | 70,16 | 57,21 | 69,58 |
| 0,127 | 4,5 | 50,228 | 65,99 | 50,16 | 66,94 |
| 0,160 | 7,7 | 50,388 | 62,65 | 47,18 | 65,36 |
| 0,201 | 11,6 | 50,589 | 59,96 | 44,33 | 59,79 |
| 0,253 | 16,5 | 50,842 | 57,84 | 41,32 | 56,60 |
| 0,318 | 22,7 | 51,160 | 56,01 | 39,06 | 53,94 |
| 0,401 | 30,3 | 51,561 | 54,16 | 34,59 | 50,03 |
| 0,505 | 39,7 | 52,066 | 52,01 | 30,98 | 49,86 |
| 0,635 | 51,2 | 52,701 | 50,42 | 27,64 | 46,74 |
| 0,800 | 65,4 | 53,501 | 48,62 | 25,49 | 44,33 |
| 1,007 | 82,7 | 54,508 | 46,81 | 24,03 | 41,71 |
| 1,268 | 103,6 | 55,776 | 45,15 | 23,17 | 39,42 |
| 1,596 | 128,5 | 57,372 | 43,45 | 22,74 | 37,13 |
| 2,010 | 158,0 | 59,382 | 41,57 | 22,54 | 35,35 |
| 2,530 | 192,4 | 61,912 | 40,25 | 22,37 | 33,42 |
| 3,185 | 231,9 | 65,097 | 38,76 | 22,10 | 31,54 |
| 4,009 | 276,5 | 69,106 | 37,64 | 22,05 | 30,20 |
| 5,048 | 325,7 | 74,154 | 36,30 | 22,10 | 28,86 |
| 6,355 | 378,9 | 80,509 | 35,01 | 21,86 | 27,81 |
| 8,000 | 435,1 | 88,509 | 34,03 | 21,66 | 26,44 |
| 10,071 | 492,8 | 98,580 | 33,13 | 21,52 | 25,39 |
| 12,679 | 550,6 | 111,259 | 32,10 | 21,49 | 25,15 |

Con la información anterior es posible graficar la tensión superficial obtenida por cada surfactante a partir de diferentes dosificaciones.

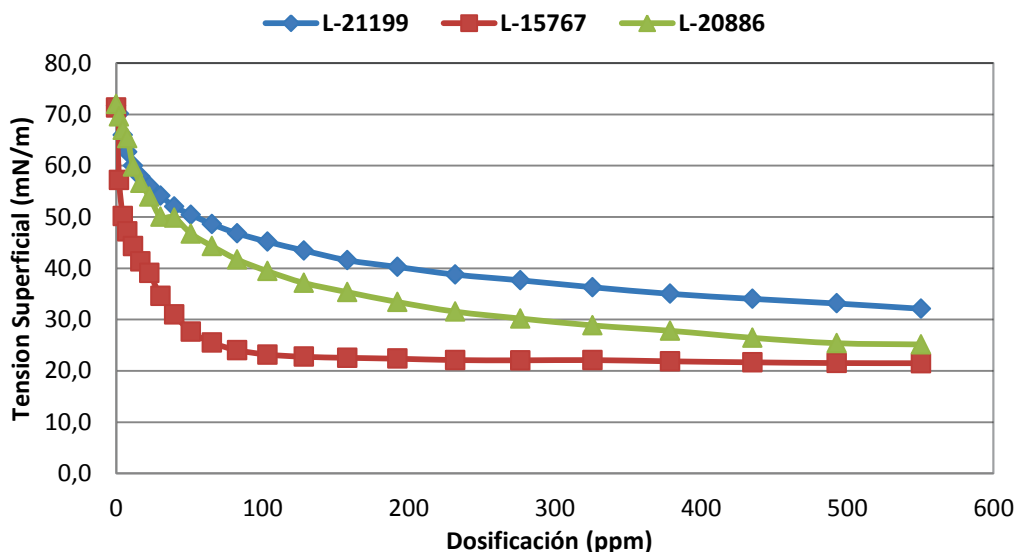


Figura 27: Gráfico de CMC realizada a productos surfactantes CF.

De la Figura 27 es posible identificar que a partir de dosificaciones cercanas a 82 ppm, la tensión superficial no se modifica en presencia de los surfactantes. Esta situación es posible observarla directamente en el comportamiento del surfactante L-15767, que a partir de dosificaciones de 82,7 ppm, presenta cambios mínimos en su tensión superficial manteniendo 22 mN/m a lo largo de la prueba. Los otros dos surfactantes no presentan una disminución de tensión tan rápida y requieren de dosificaciones más altas para acercarse al valor obtenido por el surfactante L-15767.

5.2. Caracterización de Minerales

Para realizar las pruebas es necesario obtener una muestra representativa del mineral utilizado en operaciones. Con este fin se utiliza equipos y metodologías que aseguren que el perfil granulométrico presente en cada una de las muestras a lixiviar sean iguales a la muestra original y también entre sí.

Los métodos utilizados para homogeneizar y dividir la muestra en esta investigación son el método de cono y cuarteo y el de división por rifles dado el volumen de las muestras originales de 300 kilos cada una y que además aseguran la obtención de muestras de carácter representativo. Una vez obtenidas las muestras de cada tipo mineral se realiza un análisis granulométrico el cual nos entrega información sobre los tamaños de grano con que se encuentra conformada la muestra.

El análisis granulométrico contempla el uso de dos metodologías, el uso de bandejas (utilización de equipo Gilson) para la separación de los granos de mayor tamaño además del método de tamizaje (utilización de equipo de movimiento vibratorio Ro-tap) para completar el perfil granulométrico donde los granos son menores a 1,65 mm. Estos métodos en conjunto nos permiten obtener un perfil granulométrico completo de la muestra a trabajar, que se encuentra formado por mallas con medidas de 19,05; 12,70; 9,53; 6,35 y 1,651 milímetros para el equipo Gilson y de las mallas 0,833; 0,295; 0,173; 0,147; 0,088; 0,074 y 0,043 milímetros en los tamices para Ro-tap.



Figura 28: Análisis granulométrico en Ro-tap

La realización de este análisis es en el laboratorio de preparación mecánica de la Universidad Católica del Norte, donde las muestras utilizadas para los perfiles de análisis granulométrico constan de muestras homogéneas de 14,87 kg de mineral oxidado de cobre, 12,99 kg de mineral mixto de cobre y 15,37 kg de mineral sulfurado de cobre, las que fueron obtenidas a partir de la totalidad de la muestra original. Los resultados de este proceso son entregados en la Tabla 16, 17 y 18.

5.2.1. Análisis de mineral oxidado de cobre

A continuación se presentan en la Tabla 16 las masas retenidas por las diferentes mallas del perfil, además del porcentaje de material pasante y retenido obtenido.

Tabla 16: Análisis granulométrico del mineral oxidado

| Malla | mm | Masa (g) | Pasante retenido (% peso) | Retenido acumulado (% peso) | Pasante acumulado (% peso) |
|-------|-------|----------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 3/4" | 19,04 | 292,8 | 2,0 | 2,0 | 98,0 |
| 1/2" | 12,69 | 3538,8 | 23,8 | 25,8 | 74,2 |
| 3/8" | 9,52 | 1737,0 | 11,7 | 37,4 | 62,6 |
| 1/4" | 6,35 | 6398,9 | 43,0 | 80,5 | 19,5 |
| #10 | 1,65 | 1100,1 | 7,4 | 87,9 | 12,1 |
| #20 | 0,83 | 796,8 | 5,4 | 93,2 | 6,8 |
| #50 | 0,28 | 461,2 | 3,1 | 96,3 | 3,7 |
| #80 | 0,17 | 138,4 | 0,9 | 97,2 | 2,8 |
| #100 | 0,15 | 43,9 | 0,3 | 97,5 | 2,5 |
| #170 | 0,09 | 129,7 | 0,9 | 98,4 | 1,6 |
| #200 | 0,07 | 38,3 | 0,3 | 98,7 | 1,3 |
| #325 | 0,04 | 112,0 | 0,8 | 99,4 | 0,6 |
| #-325 | | 85,3 | 0,6 | 100,0 | 0,0 |

Esta información puede ser representada en forma gráfica para visualizar el perfil granulométrico presente en la muestra mineral.

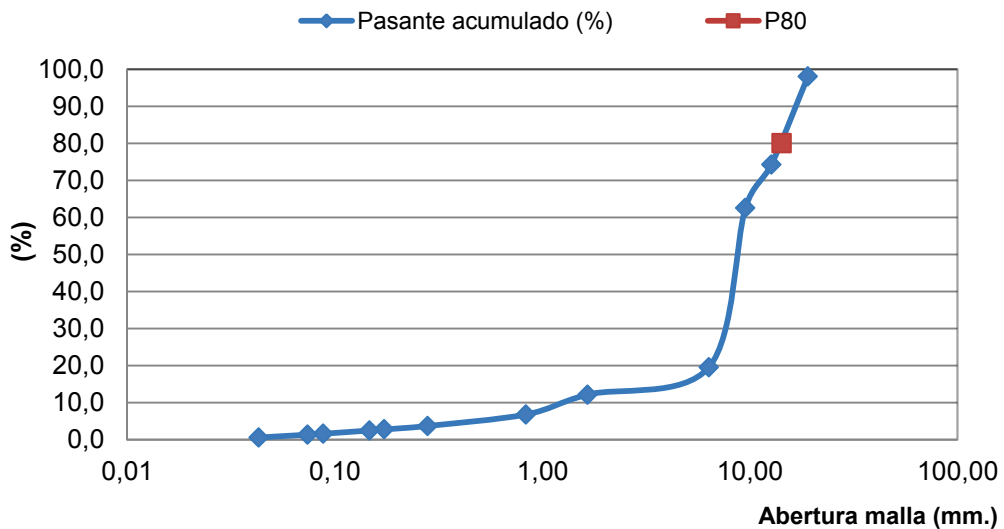


Figura 29: Análisis granulométrico de mineral oxidado de cobre.

Se puede observar en el análisis de la Figura 29 el pasante del 80% del material (P80) el cual corresponde a 14,23 mm. Este valor cumple con la granulometría necesaria para el desarrollo de las pruebas de columnas y pruebas ISO-pH por lo que no será necesario realizar una disminución de tamaño por medio de una preparación mecánica.

5.2.2. Análisis de mineral mixto de cobre

Tabla 17: Análisis granulométrico del mineral mixto.

| Malla | mm | Masa (g) | Pasante retenido (% peso) | Retenido acumulado (% peso) | Pasante acumulado (% peso) |
|-------|-------|----------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 3/4" | 19,04 | 297,1 | 2,3 | 2,3 | 97,7 |
| 1/2" | 12,69 | 2945,2 | 22,7 | 24,9 | 75,1 |
| 3/8" | 9,52 | 1505,5 | 11,6 | 36,5 | 63,5 |
| 1/4" | 6,35 | 4531,8 | 34,9 | 71,4 | 28,6 |
| #10 | 1,65 | 1068,6 | 8,2 | 79,6 | 20,4 |
| #20 | 0,83 | 1160,6 | 8,9 | 88,6 | 11,4 |
| #50 | 0,28 | 1017,8 | 7,8 | 96,4 | 3,6 |
| #80 | 0,17 | 327,3 | 2,5 | 98,9 | 1,1 |
| #100 | 0,15 | 84,2 | 0,6 | 99,6 | 0,4 |
| #170 | 0,09 | 48,7 | 0,4 | 99,9 | 0,1 |
| #200 | 0,07 | 3,1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 |
| #325 | 0,04 | 4,1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 |
| #-325 | | 1,8 | 0,0 | 100,0 | 0,0 |

Como en el caso anterior, la información de la Tabla 17 es posible utilizarla para formar un gráfico que muestre el perfil de la muestra mixta a utilizar en las pruebas.

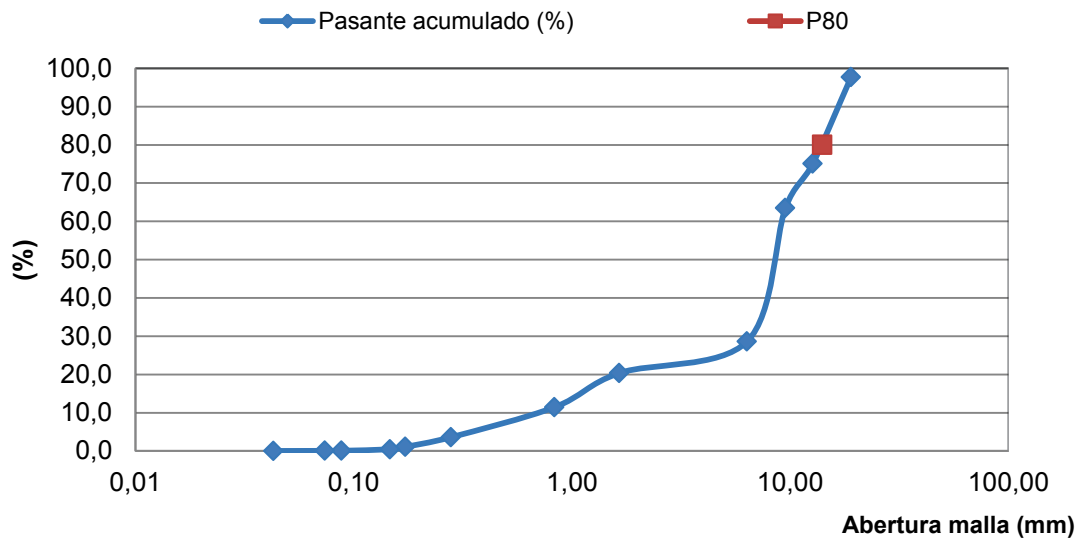


Figura 30: Análisis granulométrico de mineral mixto de cobre.

En el caso del análisis del mineral mixto observado en la Figura 30 puede observarse que esta presenta un P80 de 14,08 mm, similar al observado en el perfil de mineral oxidado por lo que el mineral mixto cumple con los requisitos para ser utilizado en las pruebas.

5.2.3. Análisis de mineral sulfurado de cobre

Como en los casos anteriores, se realiza el análisis granulométrico a una muestra representativa del mineral sulfurado de cobre donde su resultado se aprecia en la Tabla 18.

Tabla 18: Análisis granulométrico del mineral sulfurado de cobre

| Malla | mm | Masa (g) | Pasante retenido (% peso) | Retenido acumulado (% peso) | Pasante acumulado (% peso) |
|-------|-------|----------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 3/4" | 19,04 | 1227,4 | 8,0 | 8,0 | 92,0 |
| 1/2" | 12,69 | 3523,0 | 22,9 | 30,9 | 69,1 |
| 3/8" | 9,52 | 1175,0 | 7,6 | 38,6 | 61,4 |
| 1/4" | 6,35 | 4472,8 | 29,1 | 67,7 | 32,3 |
| #10 | 1,65 | 1165,9 | 7,6 | 75,2 | 24,8 |
| #20 | 0,83 | 1230,0 | 8,0 | 83,3 | 16,7 |
| #50 | 0,28 | 1099,3 | 7,2 | 90,4 | 9,6 |
| #80 | 0,17 | 356,3 | 2,3 | 92,7 | 7,3 |
| #100 | 0,15 | 114,7 | 0,7 | 93,5 | 6,5 |
| #170 | 0,09 | 304,8 | 2,0 | 95,5 | 4,5 |
| #200 | 0,07 | 81,1 | 0,5 | 96,0 | 4,0 |
| #325 | 0,04 | 242,1 | 1,6 | 97,6 | 2,4 |
| #-325 | | 375,5 | 2,4 | 100,0 | 0,0 |

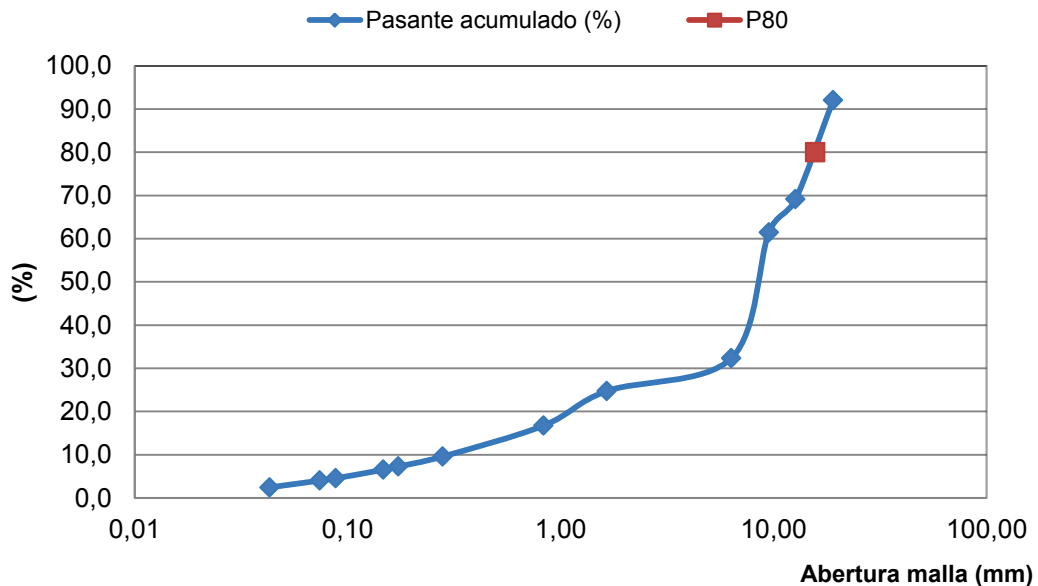


Figura 31: Análisis granulométrico de mineral sulfurado de cobre.

Analizando el grafico presente en la Figura 31, es posible observar que el P80 para este mineral se encuentra en 15,71 mm.

Se puede desprender de este análisis que los tres tipos de minerales a utilizar presentan similares perfiles granulométricos lo cual nos entrega información valiosa para utilizar iguales variables operacionales en las pruebas de lixiviación a realizar.

5.2.4. Análisis Químico

En la Tabla 19 se presenta un análisis químico realizado por Minera Zaldívar a las tres muestras minerales enviadas por cobre total y cobre residual.

Tabla 19: Análisis químico de muestras minerales hecho por minera Zaldívar.

| Muestra | CuT | Cu Residual |
|-------------|------|-------------|
| M-1 Óxido | 0,80 | 0,18 |
| M-2 Sulfuro | 0,30 | 0,08 |
| M-3 Mixto | 0,67 | 0,20 |

Si bien la información de la Tabla 19 sirve de referencia, se hace necesario el saber más detalles sobre las muestras minerales y si estos valores son representativos. Por esta razón se realiza el envío de muestras de los tres minerales a utilizar en el proyecto para su análisis químico a dependencias de CIMM. Cada muestra, es representativa de cada set granulométrico a utilizar en las pruebas, además de una muestra de los finos presentes en el mineral total. De esta forma, se podrá corroborar la información mostrada anteriormente.

De existir diferencias en la muestra es posible recalcularse la ley de cabeza perteneciente a cada mineral, con el fin de validar el dato entregado por Mineral Zaldívar.

5.2.4.1. Mineral Oxidado de Cobre

Son enviadas 7 muestras del mineral divididas considerando los set granulométricos con los cuales se desarrollan las pruebas en columnas. Los resultados son presentados en la Tabla 20. Los pesos indicados corresponden al material retenido en la malla respectiva.

Tabla 20: Análisis químico de muestras de mineral oxidado.

| Muestra Mineral Óxido | | | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------|------------|------------|
| Muestra | Malla (mm) | Peso (g) | CuT | CuS |
| 1 | 19,05 | 201,9 | 0,52 | 0,34 |
| 2 | 12,70 | 345,4 | 0,56 | 0,36 |
| 3 | 9,53 | 152,9 | 0,64 | 0,47 |
| 4 | 6,35 | 285,4 | 0,61 | 0,40 |
| 5 | 1,65 | 192,9 | 0,63 | 0,40 |
| 6 | 0,83 | 348,9 | 0,70 | 0,47 |
| 7 | - 0,83 | 228,4 | 0,98 | 0,64 |

Se puede analizar las leyes de forma gráfica presentes en cada granulometría como se observa en la Figura 32.

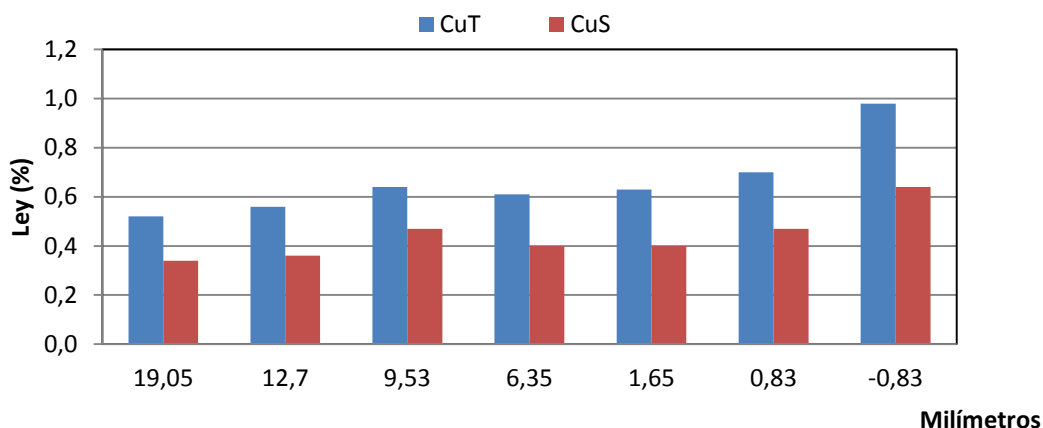


Figura 32: Gráfica de ley de cobre presente en mineral oxidado.

El gráfico muestra la ley presente en el mineral retenido para diferentes tamaños de partículas. Como se puede observar existe una alta presencia de mineral soluble y en leyes similares entre las mallas. En el caso de la granulometría fina se aprecian leyes mayores de cobre total como de cobre soluble.

Adicionalmente utilizando la masa total de la muestra de 14,78 kg y al encontrarse separada granulométricamente, es posible calcular la cantidad de cobre fino total y soluble distribuida en el mineral como se observa en la Tabla 21.

Tabla 21: Análisis de cobre total y soluble fino en mineral oxidado.

| Malla (mm) | CuT (%) | CuS (%) | CuT Fino (g) | CuS Fino (g) |
|------------|---------|--------------|--------------|--------------|
| 19,05 | 0,52 | 0,34 | 1,52 | 1,00 |
| 12,70 | 0,56 | 0,36 | 19,82 | 12,74 |
| 9,53 | 0,64 | 0,47 | 11,12 | 8,16 |
| 6,35 | 0,61 | 0,40 | 39,03 | 25,60 |
| 1,65 | 0,63 | 0,40 | 6,93 | 4,40 |
| 0,83 | 0,70 | 0,47 | 5,58 | 3,74 |
| - 0,83 | 0,98 | 0,64 | 9,89 | 6,46 |
| | | Total | 93,88 | 62,10 |

Es posible observar como en la distribución del mineral en la granulometría de 6,35 mm se presenta la mayor cantidad de cobre tanto soluble como total, por lo que representa a un mineral oxidado. Además se observa que para la muestra representativa existe una cantidad total de 93,9 gramos de cobre fino.

Con la información de la Tabla 21 se expresa gráficamente la distribución de cobre presente. Esta se presenta para el caso del mineral oxidado en la Figura 33.

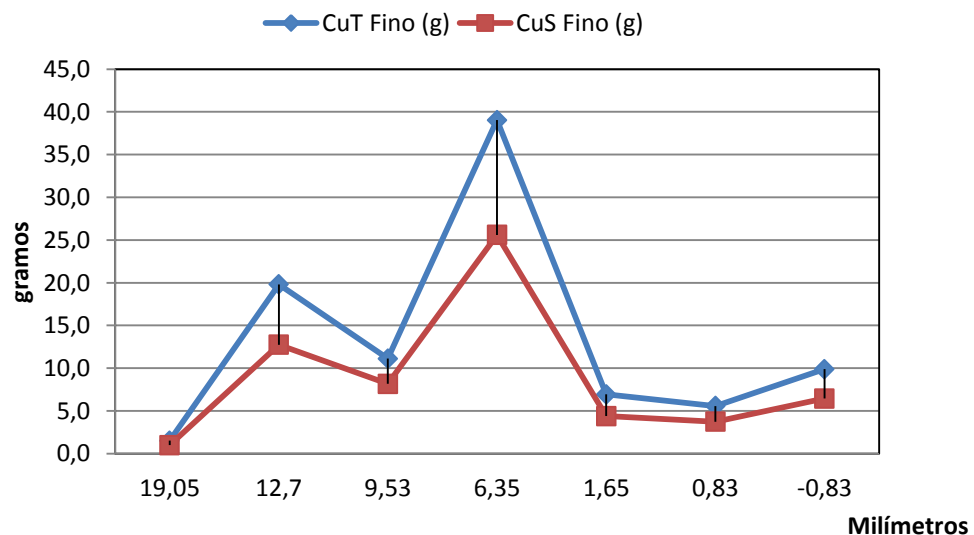


Figura 33: Cobre total y cobre soluble fino presente en mineral oxidado.

Para verificar la información entregada por Minera Zaldívar es posible con la información obtenida de los análisis químicos recalculer la ley de cabeza del mineral. Esta información se obtiene luego de haber pesado y separado todo el material de la muestra retenido por malla. Una vez obtenida esta información es posible utilizar la ecuación 5.1.

$$\text{Ley}(\%) = \frac{\sum(\text{masa por malla retenida} \cdot \text{ley del Mx en dicha malla})}{\text{masa total de la muestra}} \quad (5.1)$$

Con lo que es posible recalculer la cantidad de cobre presente en el mineral como se presenta en la Tabla 22.

Tabla 21: Información de leyes por malla de mineral oxidado.

| Recálculo ley (óxido) | | | | |
|-----------------------|------------|-----------|------|------|
| Muestra | Malla (mm) | Masa (kg) | CuT | CuS |
| 1 | 19,05 | 4,80 | 0,52 | 0,34 |
| 2 | 12,70 | 52,25 | 0,56 | 0,36 |
| 3 | 9,53 | 28,65 | 0,64 | 0,47 |
| 4 | 6,35 | 52,55 | 0,61 | 0,40 |
| 5 | 1,65 | 58,15 | 0,63 | 0,40 |
| 6 | 0,83 | 12,40 | 0,70 | 0,47 |
| 7 | - 0,83 | 20,85 | 0,98 | 0,64 |

Finalmente obtenemos las leyes recalculadas mostradas en la Tabla 23.

Tabla 23: Leyes de cobre total y cobre soluble del mineral oxidado.

| | CuT (%) | CuS (%) |
|-----------------|---------|---------|
| Ley recalculada | 0,64 | 0,42 |

Como se aprecia los resultados obtenidos difieren de los entregados anteriormente en la Tabla 19. Estos nuevos resultados serán finalmente los utilizados en las pruebas.

5.2.4.2. Mineral Mixto

Al igual que en el caso anterior, la muestra de mineral mixto se divide en 7 muestras para analizar las leyes de cobre presentes en ella. Esta información se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24: Análisis químico de muestras de mineral mixto.

| Muestra de Mineral Mixto | | | | |
|--------------------------|------------|----------|------|------|
| Muestra | Malla (mm) | Peso (g) | CuT | CuS |
| 1 | 19,05 | 105,2 | 0,55 | 0,40 |
| 2 | 12,70 | 136,3 | 0,47 | 0,30 |
| 3 | 9,53 | 136,9 | 0,51 | 0,28 |
| 4 | 6,35 | 128,5 | 0,58 | 0,23 |
| 5 | 1,65 | 95,5 | 0,59 | 0,28 |
| 6 | 0,83 | 166,3 | 0,69 | 0,29 |
| 7 | -0,83 | 106,7 | 0,91 | 0,30 |

La Tabla 24 presenta como frente al cobre total el cobre soluble corresponde casi al 50%, lo que nos ayuda a identificar este mineral como mixto. La información puede analizarse de forma gráfica para observar las leyes presentes en cada fracción granulométrica. Esta representación gráfica se observa en la Figura 34.

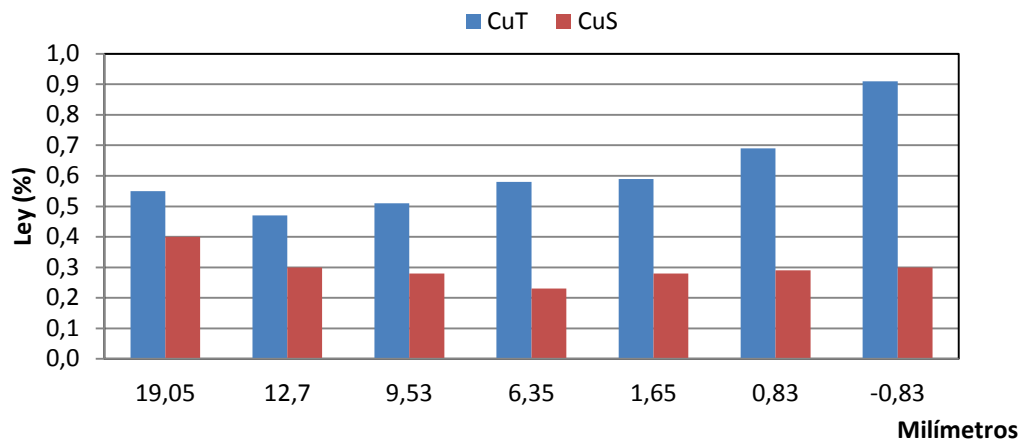


Figura 34: Gráfica de ley de cobre presente en el mineral mixto.

Se puede observar en el gráfico la presencia de mineral de cobre de forma homogénea en la muestra al analizar las diferentes mallas. Existe un incremento significativo de cobre en las fracciones finas, por lo que será importante ver el comportamiento de los mismos frente a las soluciones fluorocarbonadas en las pruebas preliminares.

Al igual que el mineral oxidado se calcula la cantidad de cobre fino presente en el mineral. De esta forma, utilizando la cantidad de masa retenida por malla, se obtiene el cobre total y soluble como se observan en la Tabla 25.

Tabla 25: Análisis de cobre total y soluble fino en mineral mixto.

| Malla (mm) | CuT (%) | CuS (%) | CuT Fino (g) | CuS Fino (g) |
|------------|---------|--------------|--------------|--------------|
| 19,05 | 0,55 | 0,40 | 1,63 | 1,19 |
| 12,70 | 0,47 | 0,30 | 13,84 | 8,84 |
| 9,53 | 0,51 | 0,28 | 7,68 | 4,22 |
| 6,35 | 0,58 | 0,23 | 26,28 | 10,42 |
| 1,65 | 0,59 | 0,28 | 6,30 | 2,99 |
| 0,83 | 0,69 | 0,29 | 8,01 | 3,37 |
| - 0,83 | 0,91 | 0,30 | 13,53 | 4,46 |
| | | Total | 77,28 | 35,48 |

De los resultados se puede extraer que la muestra original de 12,9 kg, posee una cantidad de 77,28 gramos de cobre total y 35,48 gramos de cobre soluble, siendo las fracciones de 12,7 y 6,35 mm las que localizan la mayor parte del mineral a extraer.

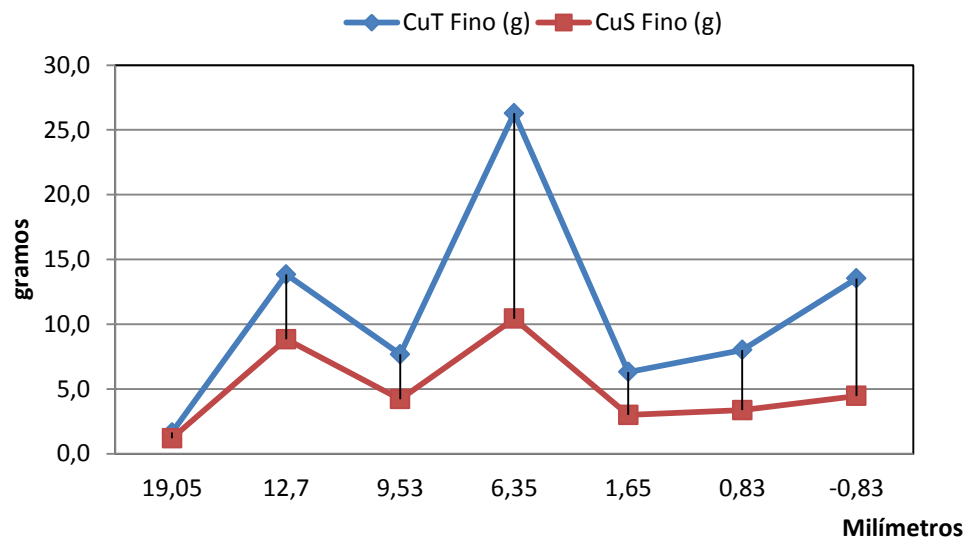


Figura 35: Cobre total y cobre soluble fino presente en el mineral mixto.

En la Figura 35 se expresa gráficamente la información proporcionada en la Tabla 25 donde se observa la importancia que tendrá el analizar el comportamiento de la solución surfactante en la fracción granulométrica media y cómo favorece a su extracción.

Como en el caso anterior, también se realiza el recálculo de las leyes a partir del total de la muestra que en este caso es de 255,4 kg.

Tabla 26: Información de leyes por malla de mineral mixto.

| Recalculo ley (mixto) | | | | |
|------------------------------|-------------------|------------------|------------|------------|
| Muestra | Malla (mm) | Masa (kg) | CuT | CuS |
| 1 | 19,05 | 3,30 | 0,55 | 0,40 |
| 2 | 12,70 | 40,80 | 0,47 | 0,30 |
| 3 | 9,53 | 23,80 | 0,51 | 0,28 |
| 4 | 6,35 | 54,00 | 0,58 | 0,23 |
| 5 | 1,65 | 70,75 | 0,59 | 0,28 |
| 6 | 0,83 | 24,20 | 0,69 | 0,29 |
| 7 | - 0,83 | 38,55 | 0,91 | 0,30 |

Analizados estos datos es posible recalculer la ley de cabeza del mineral para cobre total y cobre soluble. El resultado se puede observar en la Tabla 27.

Tabla 27: Leyes de cobre total y cobre soluble del mineral mixto.

| | CuT (%) | CuS (%) |
|------------------------|----------------|----------------|
| Ley recalculada | 0,62 | 0,28 |

5.2.4.3. Mineral Sulfurado de Cobre

Como en los dos minerales anteriores se pueden observar los resultados de análisis químico para el mineral sulfurado en la Tabla 28.

Tabla 28: Análisis químico de muestras de mineral sulfurado.

| Muestra Mineral Sulfuro | | | | |
|-------------------------|------------|----------|------|------|
| Muestra | Malla (mm) | Peso (g) | CuT | CuS |
| 1 | 19,05 | 58,1 | 0,57 | 0,05 |
| 2 | 12,70 | 110,4 | 0,85 | 0,09 |
| 3 | 9,53 | 135,4 | 0,70 | 0,09 |
| 4 | 6,35 | 118,8 | 0,94 | 0,11 |
| 5 | 1,65 | 178,3 | 1,05 | 0,16 |
| 6 | 0,83 | 236,8 | 1,33 | 0,18 |
| 7 | - 0,83 | 115,4 | 2,19 | 0,40 |

La Tabla 28 presenta como existe una gran cantidad de mineral de cobre insoluble en las muestras analizadas, lo que identifica a esta muestra como un mineral sulfurado. Estos datos se pueden presentar de forma gráfica para observar las leyes presentes en cada granulometría. En el caso del mineral sulfurado los resultados se presentan en la Figura 36.

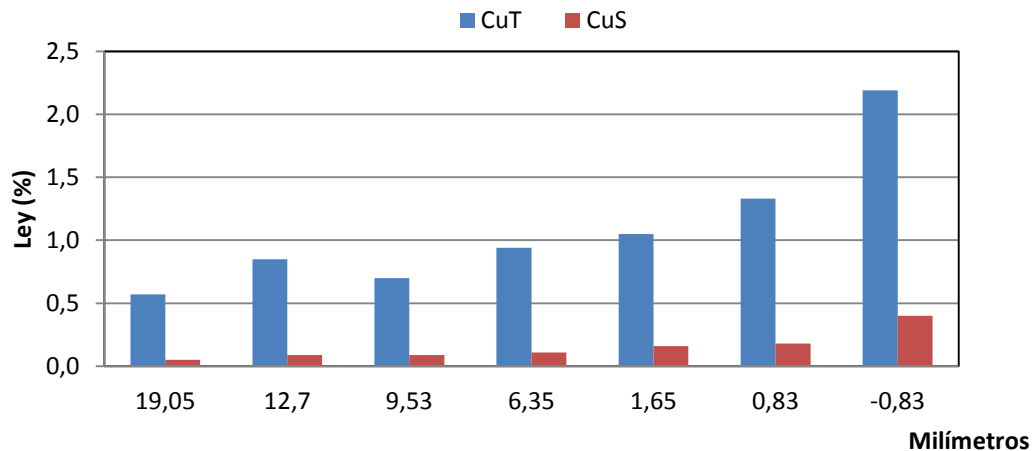


Figura 36: Gráfica de ley de cobre presente en mineral sulfurado.

De la gráfica 36 se puede observar que existe bajo cobre soluble sólo llegando a una ley de 0,4% en la granulometría más fina.

Como en los casos anteriores se calcula a partir de la muestra utilizada para la distribución granulométrica de 15,3 kg la cantidad de cobre total y cobre soluble que se encuentran distribuidas en el mineral sulfurado.

Tabla 29: Análisis de cobre total y soluble fino en mineral sulfurado.

| Malla | CuT (%) | CuS (%) | CuT Fino (g) | CuS Fino (g) |
|--------|---------|--------------|--------------|--------------|
| 19,05 | 0,57 | 0,05 | 7,00 | 0,61 |
| 12,70 | 0,85 | 0,09 | 29,95 | 3,17 |
| 9,53 | 0,70 | 0,09 | 8,23 | 1,06 |
| 6,35 | 0,94 | 0,11 | 42,04 | 4,92 |
| 1,65 | 1,05 | 0,16 | 12,24 | 1,87 |
| 0,83 | 1,33 | 0,18 | 16,36 | 2,21 |
| - 0,83 | 2,19 | 0,40 | 56,37 | 10,30 |
| | | Total | 172,18 | 24,14 |

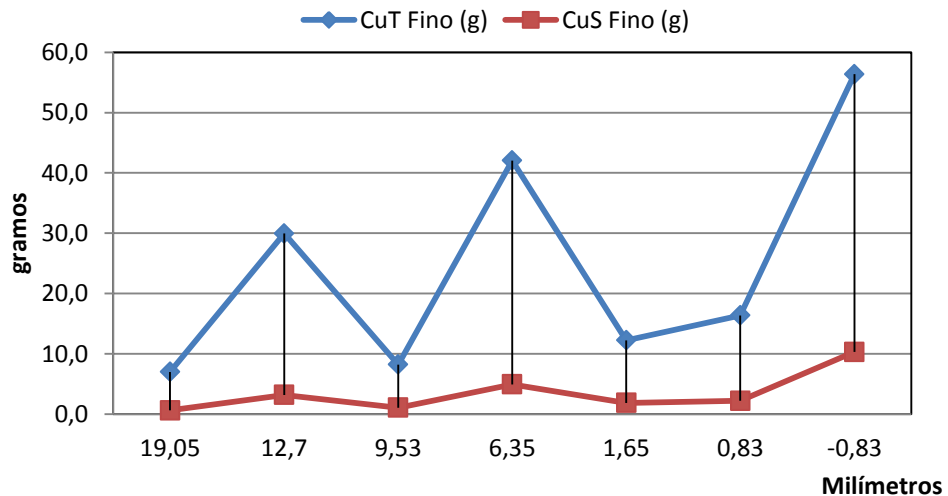


Figura 37: Cobre total y cobre soluble fino presente en mineral sulfurado.

A partir de la Figura 37 se puede extraer como existe una cantidad importante de cobre presente en la granulometría más fina llegando a 56,37 gramos de cobre total y 10,3 gramos de cobre soluble.

Con la información anterior se recalcula la ley de cabeza del mineral y que se encuentra en la Tabla 30.

Tabla 30: Información de ley de cobre por malla de mineral mixto.

| Recalculo ley (sulfuro) | | | | |
|--------------------------------|-------------------|------------------|------------|------------|
| Muestra | Malla (mm) | Masa (kg) | CuT | CuS |
| 1 | 19,05 | 16,02 | 0,57 | 0,05 |
| 2 | 12,70 | 45,99 | 0,85 | 0,09 |
| 3 | 9,53 | 15,34 | 0,70 | 0,09 |
| 4 | 6,35 | 58,39 | 0,94 | 0,11 |
| 5 | 1,65 | 15,22 | 1,05 | 0,16 |
| 6 | 0,83 | 16,40 | 1,33 | 0,18 |
| 7 | - 0,83 | 33,60 | 2,19 | 0,40 |

Con esta información la cantidad de cobre total en la muestra mineral y el cobre soluble se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31: Leyes de cobre total y cobre soluble del mineral sulfurado

| | CuT (%) | CuS (%) |
|------------------------|----------------|----------------|
| Ley recalculada | 1,12 | 0,16 |

Esta ley presentada en la Tabla 31 muestra un aumento en 0,3% en la ley de cobre total entregada por Minera Zaldívar en la Tabla 19 lo que nos entrega una mayor cantidad de cobre presente en los minerales sulfurados.

5.3. Pruebas de lixiviación de minerales

A continuación se entregan los resultados de extracción de cobre obtenidos de las pruebas de lixiviación en botella para este proyecto.

5.3.1. Pruebas de lixiviación ISO-pH

Las pruebas ISO-pH son la mejor opción para obtener en un corto tiempo (72 horas) un acercamiento a la forma en que se comportaran los minerales en una lixiviación. Para motivos de este estudio la ventaja de poder utilizar igual granulometría tanto para las pruebas columnares como ISO-pH hacen de esto una oportunidad para comparar de mejor forma los cambios que producen la presencia de agentes surfactantes fluorocarbonados.

5.3.1.1. Mineral Oxidado de Cobre

En la Figura 38 se presentan los resultados de las pruebas de lixiviación ISO-pH realizadas con mineral oxidado y en presencia del surfactante L-15767.

Lo primero que se observa en la Figura 38 es el incremento en la extracción de cobre que se produce al utilizar el surfactante L-15767. A medida que se eleva la dosificación del agente fluorocarbonado se logran incrementos de 25% al utilizar 20 ppm hasta llegar a un 84% de extracción duplicando a la extracción obtenida en la prueba de control.

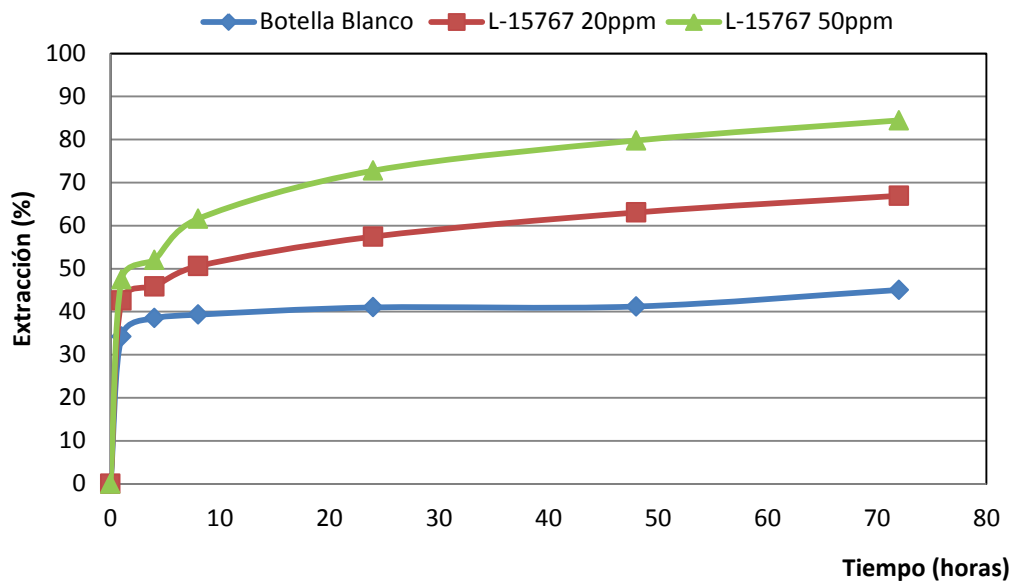


Figura 38: Disolución de mineral oxidado en presencia de surfactante L-15767.

La primera fase de extracción transcurre rápidamente al estar las partículas minerales en contacto completo con la solución lixivante durante toda la duración de la prueba. La segunda etapa muestra una pasivación de la botella blanco a diferencia de lo ocurrido en presencia del agente surfactante donde se sigue observando un incremento en la extracción a medida que pasa el tiempo. Una dosificación de 50 ppm produce cambios considerables en la extracción y presenta un comportamiento idéntico al observado a una dosificación de 20 ppm. La tensión superficial de 67,32 mN/M en la prueba de control baja considerablemente en presencia del surfactante L-15767 a medida que se aumenta la dosificación a 20 ppm (51 mN/M) y 50 ppm (46,42 mN/M) lo que influye en el incremento de la humectación de las partículas.

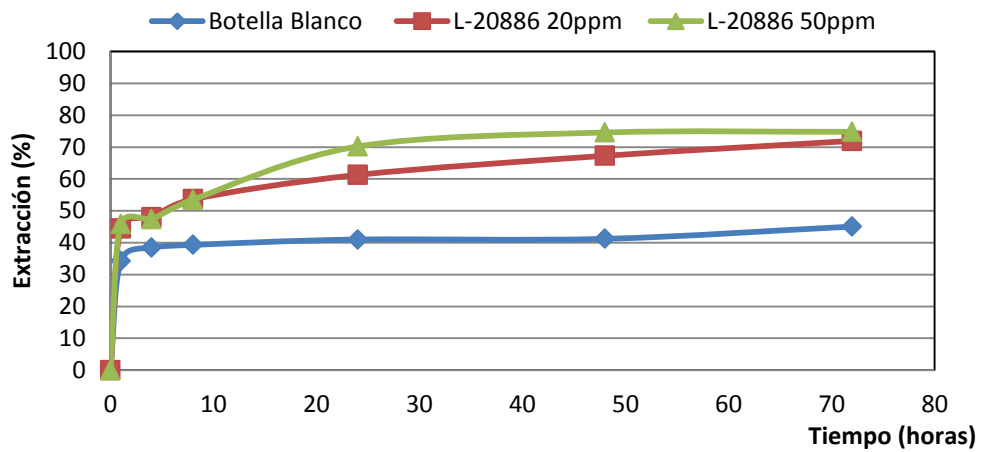


Figura 39: Disolución de mineral oxidado en presencia de surfactante L-20886.

La utilización del surfactante L-20886 como se observa en la Figura 39 entrega resultados donde se ven incrementos cercanos a un 30% en la extracción de cobre. Existe un comportamiento en donde es indiferente la cantidad de dosificación de surfactante presente ya que se obtienen resultados de recuperación similares. Al analizar la tensión superficial esta se encuentra con una diferencia solo de 5 mN/M para ambas dosificaciones, por lo que la solubilidad de cobre lograda es casi idéntica.

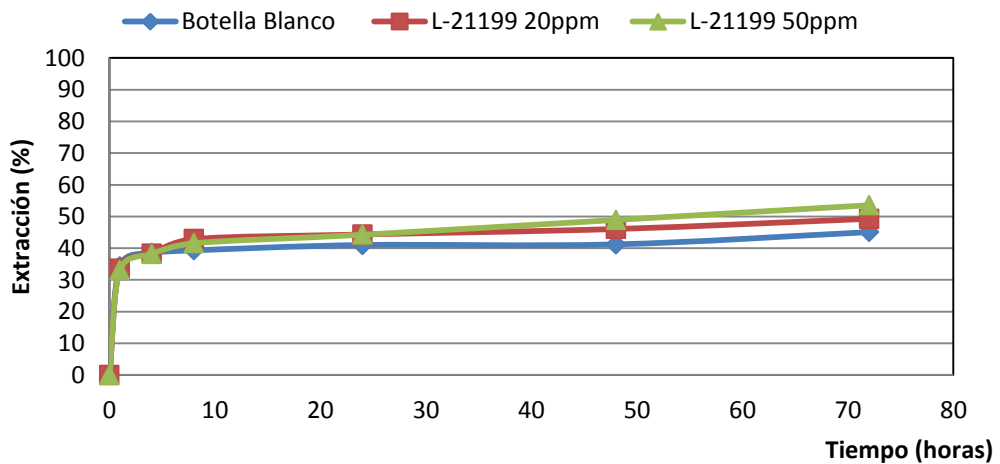


Figura 40: Disolución de mineral oxidado en presencia de surfactante L-21199.

El surfactante L-21199 presenta cambios en la extracción llegando sólo a 50% produciendo un menor impacto en los resultados frente los 2 otros surfactantes utilizados. La presencia de este surfactante logra un incremento entre 4% y 8% que se acerca los resultados encontrados por Olave en su investigación. La utilización del doble de concentración del surfactante no produce cambios considerables en los resultados.

En la Figura 41 y 42 se presentan los diferentes surfactantes a iguales concentraciones para contrastar los resultados obtenidos entre ellos.

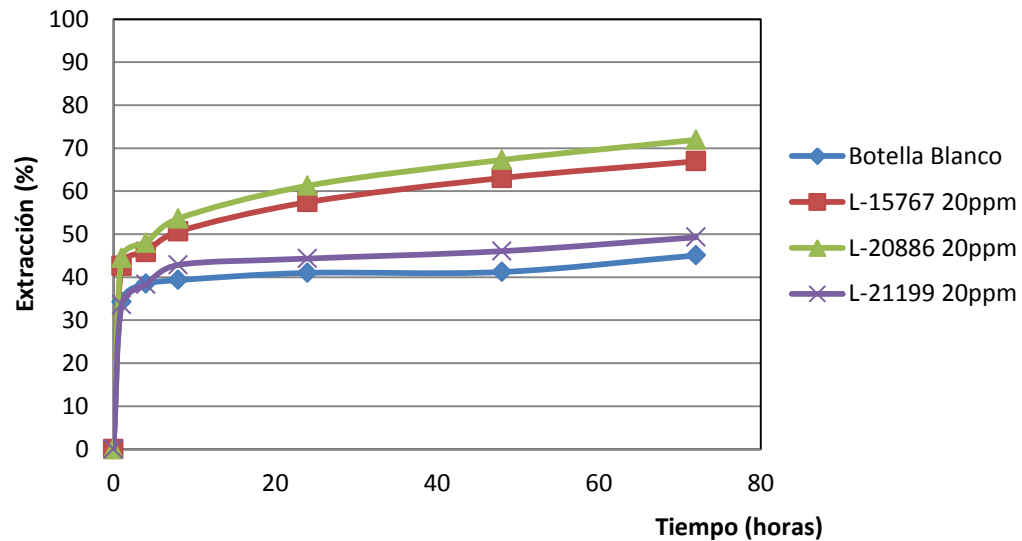


Figura 41: Comparación de disolución de mineral oxidado con diferentes surfactantes a 20 ppm.

Tanto en la Figura 41 como 42 se observa como en presencia del surfactante L-15767 existen mejoras en términos generales independiente de la concentración a la cual se esté trabajando. Comparando ambas dosificaciones se destaca que utilizando una dosificación de 20 ppm de surfactante se obtienen resultados destacados y que frente al doble de su dosificación no llegan a incrementarse de forma de argumentar la utilización de tanta cantidad de aditivo.

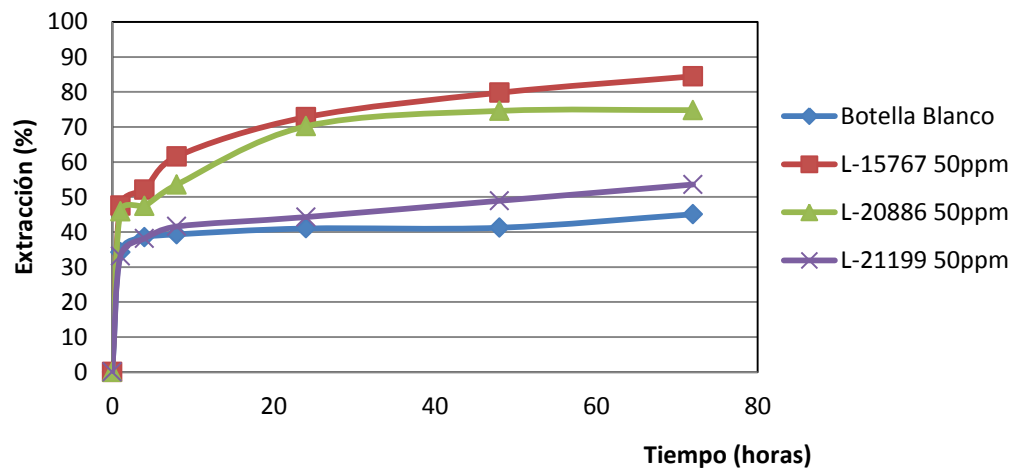


Figura 42: Comparación de disolución de mineral oxidado con diferentes surfactantes a 50 ppm.

El trabajar a un pH 2.0 estable durante las pruebas y poseer una cadena más electronegativa por parte de los surfactantes logran generar estos resultados en presencia de mineral oxidado.

Para confirmar la extracción obtenida analizando las soluciones acuosas se realiza un análisis de los rípios para generar un balance de masa y comparar estos datos con los resultados anteriores en la Figura 43.

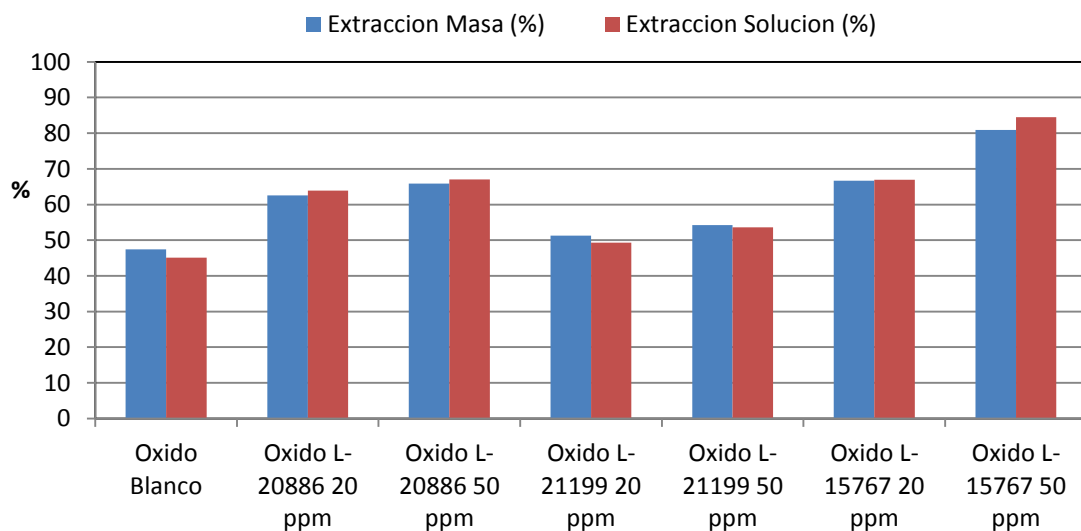


Figura 43: Comparación de disoluciones en mineral oxidado con diferentes surfactantes.

Los resultados de la Figura 43 presentan diferencias entre las extracciones calculadas a partir del balance de masa y de las soluciones lo que puede deberse a pérdidas generadas por medio de sulfatación observadas en el transcurso de la lixiviación. Aun con estas diferencias la presencia de surfactante fluorocarbonado genera cambios importantes en la recuperación de cobre afirmando lo analizado anteriormente. El surfactante L-15767 obtiene los mejores resultados de extracción.

5.3.1.2. Mineral Mixto

Los resultados obtenidos al utilizar minerales mixtos tanto oxidados como sulfurados de cobre se presentan más complejos al no existir cambios considerables en la extracción de cobre. La presencia de mineral sulfurado produce una reducción en la efectividad de extracción comparándose directamente con los resultados observados al trabajar con un mineral oxidado.

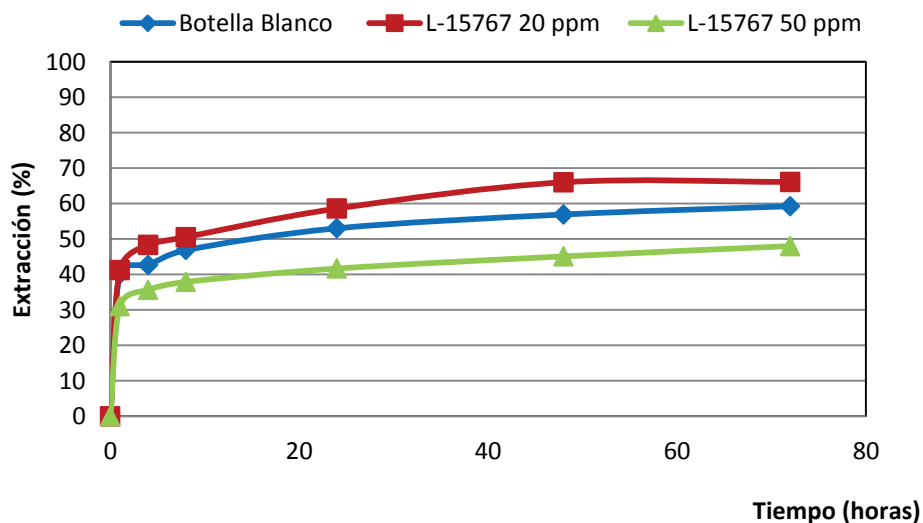


Figura 44: Disolución de mineral mixto en presencia de surfactante L-15767.

La presencia del surfactante L-15767 a una concentración de 20 ppm como se observa en la Figura 44 logra extracciones de 61,1% frente al 53% obtenido por la prueba blanco. En cambio no se ven efectos positivos al incrementar la dosis de surfactante a 50 ppm. Si analizamos la tensión superficial presente ambas pruebas presentan resultados en torno a 74,2 mN/M con solo una diferencia de 2 y 5 mN/M para 50 y 20 ppm respectivamente. Por otro lado utilizar mayor dosificación de surfactante puede generar un efecto negativo al incrementar la fuerza de cohesión del líquido y causar un efecto contrario en la tensión superficial como estipula Adamson.

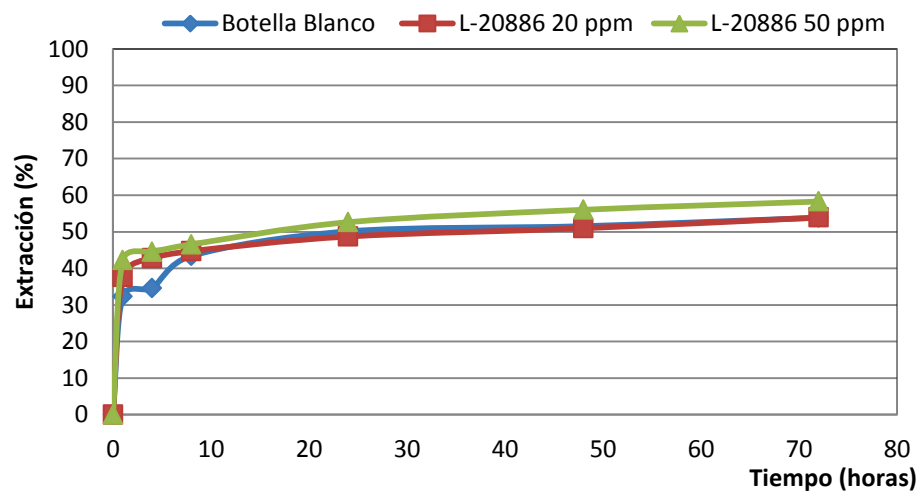


Figura 45: Disolución de mineral mixto en presencia de surfactante L-20886.

La utilización del surfactante L-20886 como se observa en la Figura 45 y L-21199 en la Figura 46 al igual que los resultados expuestos anteriormente no producen cambios significativos en la recuperación de cobre donde sólo son separados de los resultados obtenidos por la prueba de control por una extracción entre 4 y 5%. La primera fase de extracción en presencia del surfactante presenta un incremento importante frente a la curva formada por la prueba blanco lo que provoca una disminución en el tiempo para alcanzar la fase de pasivación.

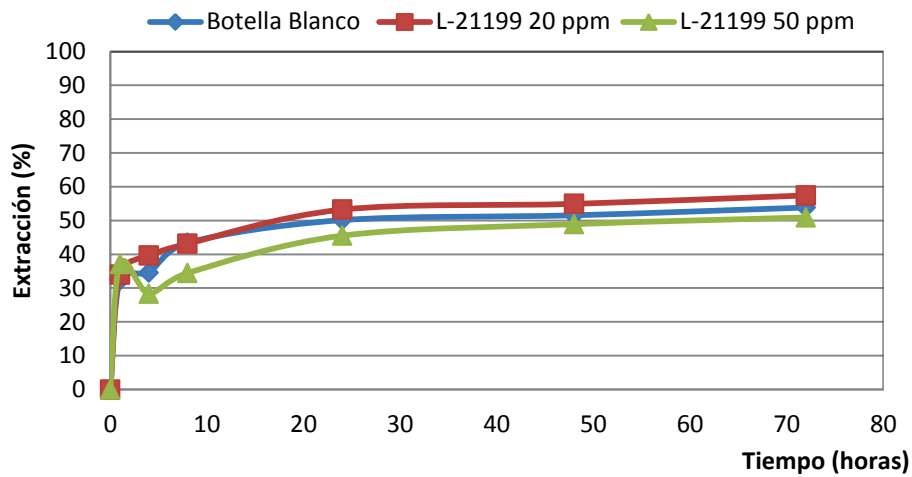


Figura 46: Disolución de mineral mixto en presencia de surfactante L-21199.

En presencia del surfactante L-21199 al utilizar una dosificación de 50 ppm no se logra superar los resultados obtenidos en la prueba blanco identificando que al elevar la dosificación del surfactante este afecta sus variables fisicoquímicas. Al utilizar un mineral mixto no se logra favorecer a la extracción debido a la presencia de minerales sulfurados no solubles y la poca interacción existe entre el mineral y la solución lixivante.

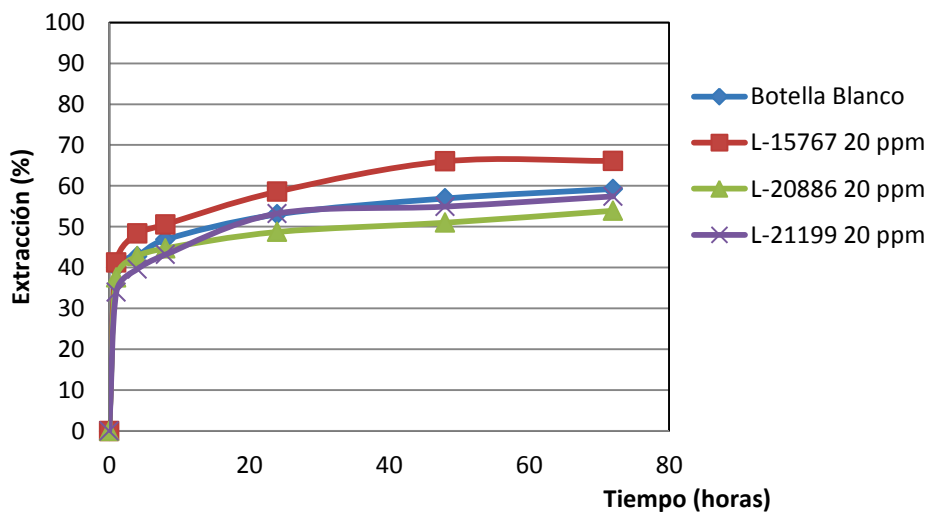


Figura 47: Comparación de disolución de mineral mixto con diferentes surfactantes a 20 ppm.

Si se comparan los tres surfactantes a iguales concentraciones de 20 ppm en Figura 47 y 50 ppm en Figura 48 vemos como el comportamiento es simétrico entre los diferentes surfactantes y la solución blanco. Existe una dependencia del tipo de cadena utilizada en cada surfactante fluorocarbonado lo que favorece la formación de puentes de flúor.

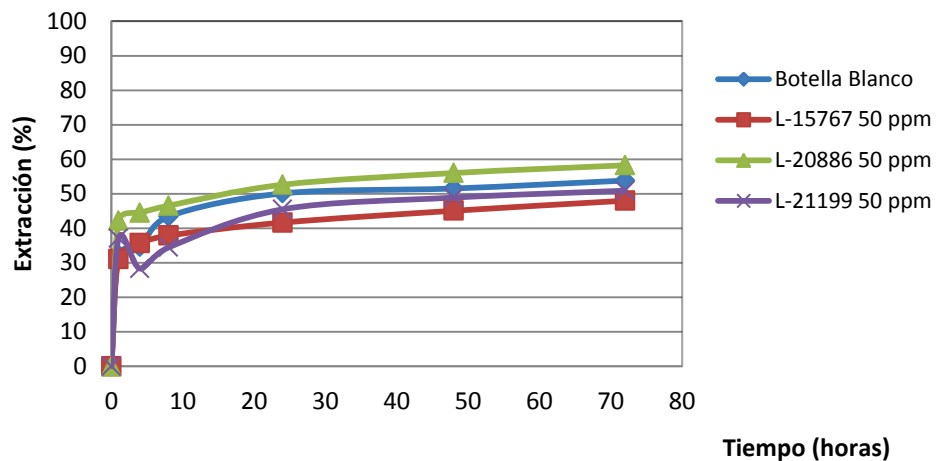


Figura 48: Comparación de disolución de mineral mixto con diferentes surfactantes a 50 ppm.

En presencia del surfactante L-15767 a 20 ppm se observa un incremento particular hasta las 50 horas de proceso. Esto se debe a una disminución en su tensión superficial que alcanzo 49,55 N/m para incrementarse posteriormente llegando a 59,85 N/m. Utilizar una concentración de 50 ppm en la etapa de lixiviación como indica la Figura 48 no involucra cambios en los resultados obtenidos independiente del surfactante utilizado.

Se puede ver la extracción de cobre lograda en cada prueba a partir de la información anterior y junto a un balance de masa de cada prueba. Los resultados se observan en la Figura 49.

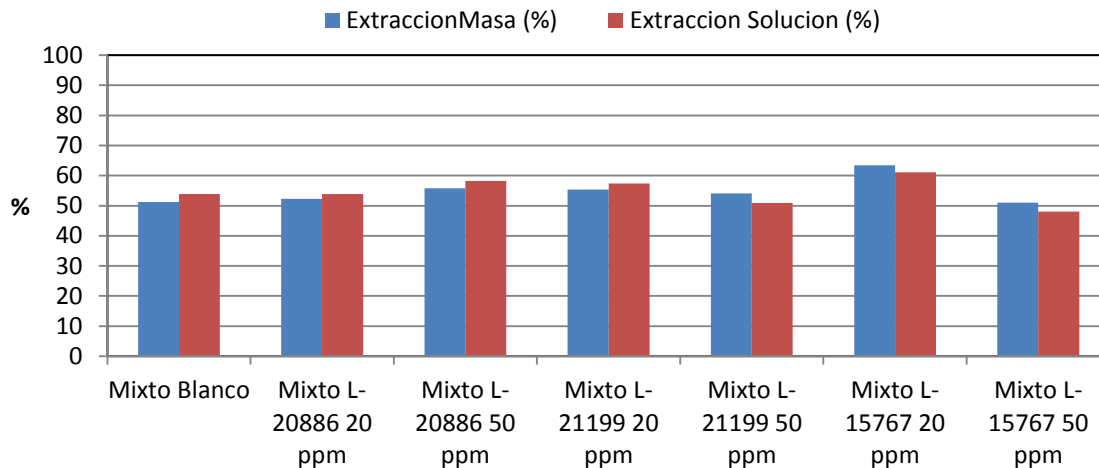


Figura 49: Comparación de disolución de cobre en mineral mixto con diferentes surfactantes.

Se puede observar en la Figura 49 que existe concordancia entre los resultados obtenidos desde el balance de masa y las soluciones acuosas, los cuales presentan el incremento presente en la recuperación de cobre en presencia de surfactantes fluorocarbonados. La presencia de L-15767 en solución es la que entrega los mejores resultados de extracción a una dosificación de 20 ppm de forma similar a lo ocurrido con el mineral oxidado.

5.3.1.3. Mineral Sulfurado de Cobre

Al revisar la literatura no se encuentra una gran cantidad de estudios sobre surfactantes fluorocarbonados en lixiviación de minerales sulfurados debido a su complejidad y poca respuesta que se ha logrado al tratar estos minerales solo con solución acidulada. De lo anterior es que interesa obtener información sobre extracción y posteriormente la fisicoquímica presente para comprender de mejor forma la posibilidad de tratar este tipo de minerales y bajo la presencia de surfactantes.

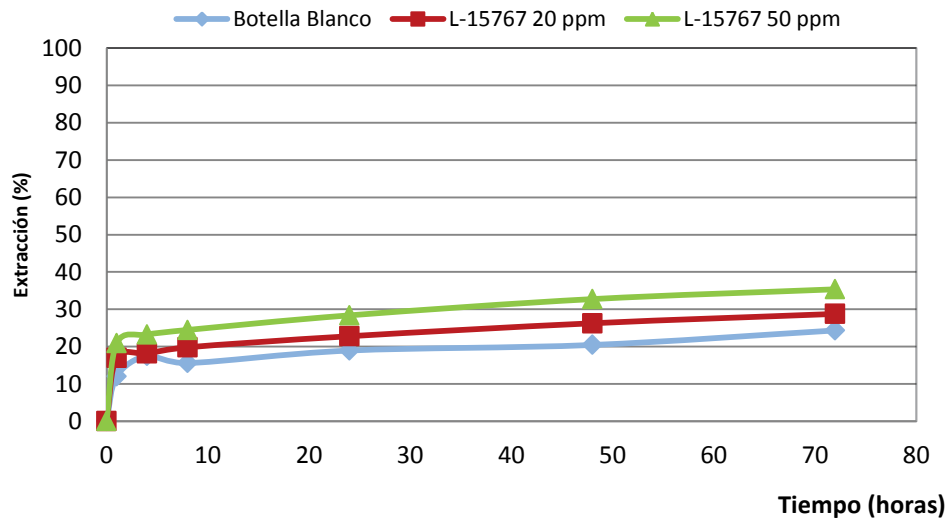


Figura 50: Disolución de mineral sulfurado en presencia de surfactante L-15767.

En la Figura 50 se observa los resultados de extracción obtenidos en presencia del surfactante L-15767. Tal como se observó con el mineral mixto, se logra mejorar la hidratación pero en menor medida, realizando pequeñas modificaciones en la tensión superficial de la solución la cual se encuentra en torno a 61 N/m y disminuyendo esta en torno a 4,53 y 7,70 N/m. Se logra un 10% de incremento en la extracción de cobre.

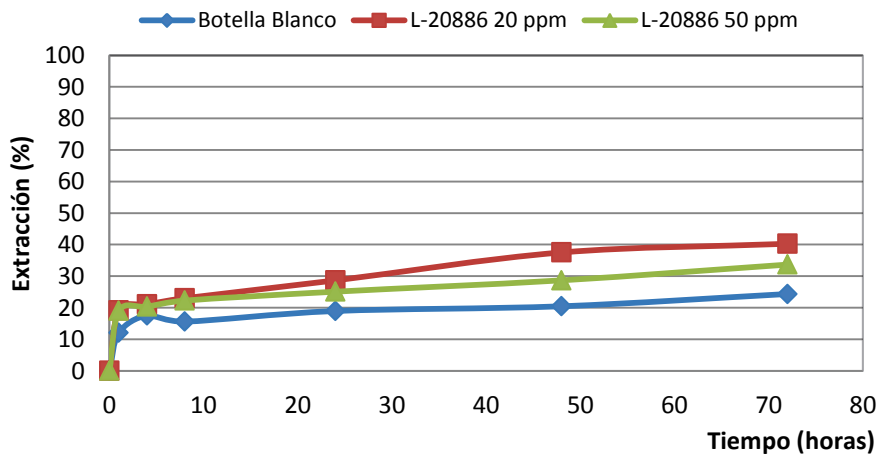


Figura 51: Disolución de mineral sulfurado en presencia de surfactante L-20886.

De la Figura 51 se puede desprender como el surfactante L-20886 logra incrementos significativos en la extracción de cobre frente a la prueba de control. Estos son los resultados de recuperación más altos bajo este tipo de mineral. Se presenta una alta disminución de la tensión superficial de esta solución frente a la prueba de control alcanzando los 48 N/m en presencia de concentraciones de 20 ppm. Nuevamente la utilización de mayores dosificaciones no refleja cambios fisicoquímicos positivos como es su tensión superficial frente a los obtenidos con la mitad de dosificación.

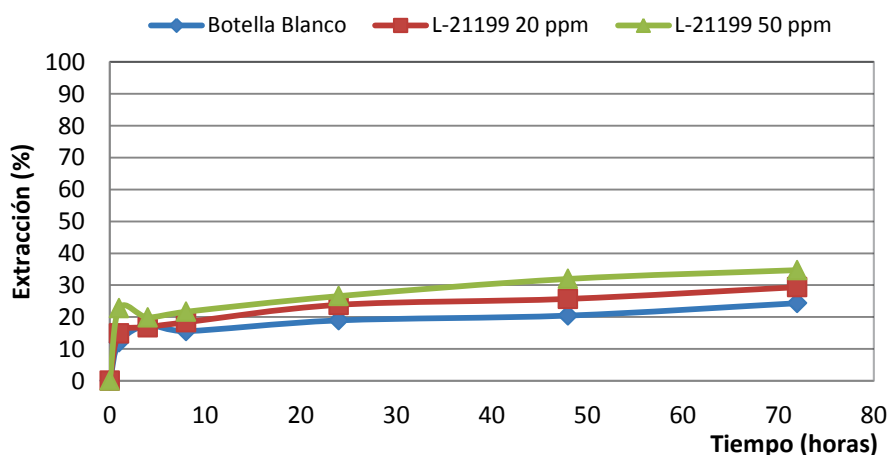


Figura 52: Disolución de mineral sulfurado en presencia de surfactante L-21199.

El surfactante L-21199 como se muestra en la Figura 52 presenta un comportamiento similar al registrado anteriormente en la Figura 50 para el surfactante L-15767 indistintamente de la concentración utilizada. Nuevamente las variables fisicoquímicas no se ven afectadas independientes de la dosificación presente. Se puede observar en el caso del reactivo L-21199 que a 50 ppm se produce un incremento considerable en las primeras horas del proceso, para luego decaer y seguir un incremento homogéneo como el obtenido en la prueba sin surfactantes.

En la figura 53 y 54 se realiza una comparación entre los diversos surfactantes a iguales concentraciones para identificar el comportamiento entre ellos durante el tiempo de lixiviación.

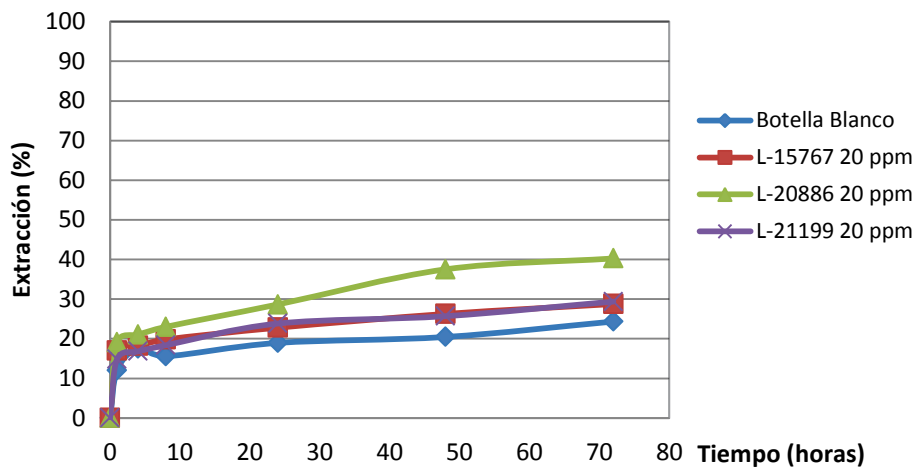


Figura 53: Comparación de disolución de mineral sulfurado con diferentes surfactantes a 20 ppm.

Al comparar los tres surfactantes a igual concentración se observa como el surfactante L-20886 es el que posee los mejores resultados frente al comportamiento de los otros dos surfactantes utilizados. Dentro del estudio fisicoquímico de las soluciones se encontró un incremento considerable en el consumo de ácido del surfactante L-20886 en comparación a las otras pruebas lo que puede atribuirse a la búsqueda de incrementar la presencia de cationes para lograr una oxidación de la superficie del mineral como estipula Clarke. De esta manera se busca generar de mejor manera la formación de puentes de hidrógeno.

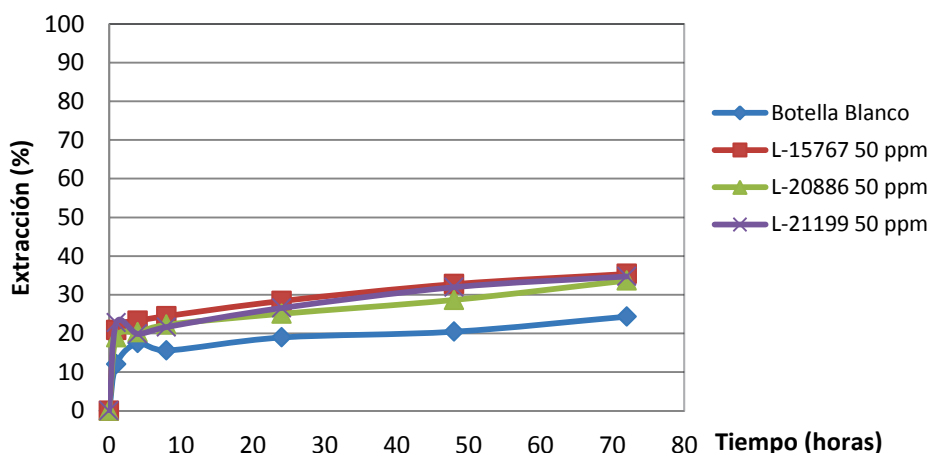


Figura 54: Comparación de disolución de mineral sulfurado con diferentes surfactantes a 50 ppm.

A mayores concentraciones no se producen cambios considerables en la disolución llegando a tener bajos resultados de extracción comparándolos con los obtenidos a concentraciones de 20 ppm. Los tres surfactantes poseen un comportamiento muy similar llegando a extracciones promedios de 34% lo que presenta un incremento considerable de 10% frente a los obtenidos en la prueba de control.

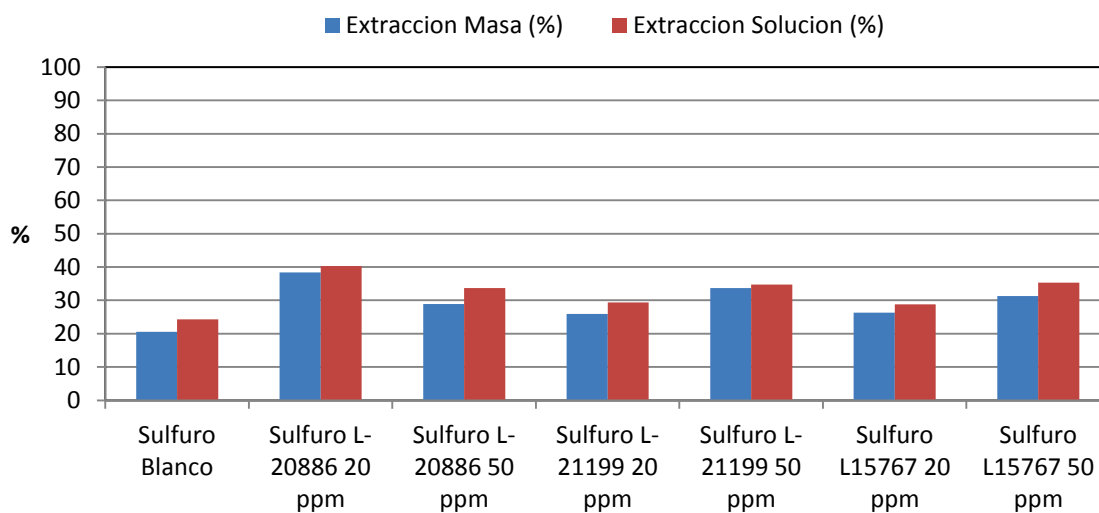


Figura 55: Comparación de extracciones de cobre en mineral sulfurado con diferentes surfactantes.

Se realiza un balance de masa con los ripsos obtenidos de las pruebas de botellas para poder ser comparados con la extracción obtenida de las soluciones. Como se observa en la Figura 55 los resultados del balance de masa son menores a los obtenidos de las soluciones donde una gran cantidad de cobre fue sulfatado durante las pruebas. El mejor resultado se presenta en la utilización del surfactante L-20886 donde ambas extracciones se presentan en torno al 33%. Finalmente en presencia de los surfactantes L-15767 y L-21199 los resultados no son satisfactorios.

Como se mencionó anteriormente esta información nos entrega un aporte al comportamiento que tienen los diferentes reactivos en un proceso de lixiviación en este caso acelerado. Los análisis anteriores entregan además un acercamiento a como las diferentes variables presentes en la lixiviación y propias de cada surfactante afectan directamente a los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos en las pruebas ISO-pH buscan ser analizados junto a los resultados obtenidos de las pruebas en columnas que se presentan a continuación, con el fin de tener mayor información al analizar el comportamiento de los surfactantes.

5.3.2. Lixiviación en columnas

Junto a las pruebas de lixiviación en botellas se realizan lixivaciones columnares con el fin de obtener información similar a una etapa industrial. Se utilizan tres tipos de minerales (oxidado, mixto y sulfurado) además de tres surfactantes fluorocarbonados (L-15767, L-20886 y L-21199). A continuación se presentan observaciones de la aglomeración de los minerales además de los resultados de extracción obtenidos en las diferentes pruebas.

5.3.2.1. Aglomeración de minerales

Como se expuso anteriormente es importante analizar cómo impacta la presencia de surfactantes fluorocarbonados y si generan cambios en la estabilidad de los glómeros. Luego de realizar la etapa de aglomeración, el mineral fue inmediatamente agregado a las columnas unitarias para generar en este lugar la etapa de curado.

Con el fin de no provocar pérdidas de mineral se realiza una inspección visual de los glómeros al finalizar su carga en la columna. En la Figura 56 se presentan los resultados de aglomeración obtenidos a iguales condiciones de humedad para un mineral mixto de cobre sólo diferenciándose en la cantidad de surfactante ingresado en la aglomeración. Cabe destacar, que en el mineral oxidado de cobre y mixto se lograron estos cambios en la formación de los glómeros, siendo los surfactantes L-15767 y L-20886 los que entregaron la mayor estabilidad. El mineral sulfurado de cobre no presentó ningún tipo de cambios en presencia de diferentes dosis de surfactante independiente del reactivo a utilizar.



Figura 56: Aglomeración de mineral sin surfactante (1), 20 ppm (2) y 50 ppm (3) de surfactante L-20886.

Al analizar las imágenes se observa que utilizar diferentes dosificaciones de surfactante impacta directamente en el resultado obtenido pasando de una

aglomeración en que no se logra cohesiones minerales estables al generarse irrigación de finos hasta llegar un glomero ideal, utilizando en todas estas pruebas iguales cantidades de agua y ácido.



Figura 57: Aglomeración de mineral oxidado de cobre con una dosificación de 20 ppm de L-15767

De esta forma y comparado al trabajo realizado por Kodali, al utilizar este tipo de producto no se afecta la hidratación con la cual se realiza la etapa si no se impacta en la capacidad de generar enlaces que mejoren el glomero final. La utilización de mayores cantidades de surfactante, benefician a una aglomeración adecuada disminuyendo la migración de finos.

Una vez identificado que existen cambios en la cohesión del mineral, es importante analizar si se generan cambios en la lixiviación de estos minerales de cobre en presencia de surfactantes fluorocarbonados. De esta manera, se analiza sus resultados de extracción de cobre para posteriormente estudiar de manera fisicoquímica los cambios existentes entre las diferentes pruebas.

5.3.2.2. Mineral Oxidado de Cobre

Utilizando mineral oxidado de cobre es posible observar que al igual que en las pruebas de botellas en presencia de este tipo de mineral se logran mejoras importantes de extracción en presencia de aditivos surfactantes fluorocarbonados.

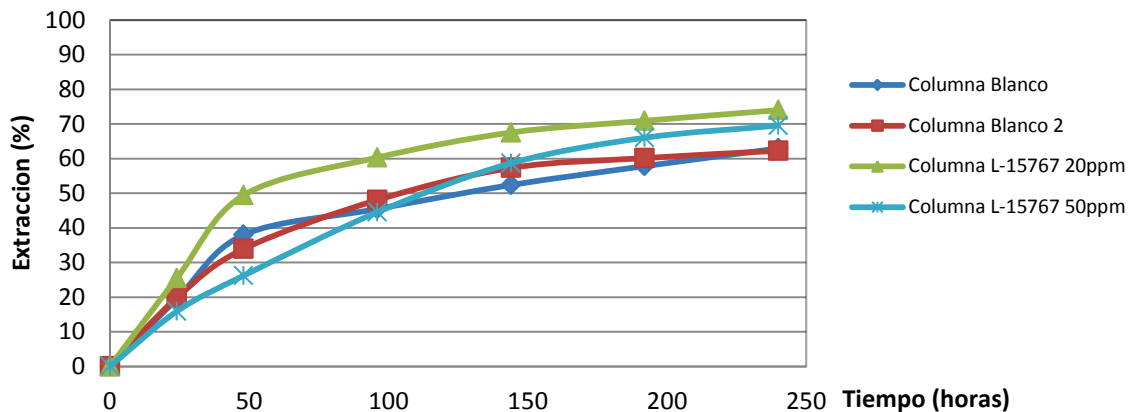


Figura 58: Disolución de mineral oxidado en presencia de surfactante L-15767.

De la Figura 58 se puede desprender el comportamiento de las pruebas columnares en presencia del surfactante L-15767 además de los resultados de dos columnas sin surfactante. La utilización de este surfactante involucra una mejora sustancial en la recuperación de mineral logrando incrementar en el caso de dosificaciones de 20 ppm un 10% su extracción. Se presenta un incremento importante en la primera fase de extracción. El obtener la mayor ley de cobre en la granulometría media del mineral y haber logrado una mejor estabilización de los glómeros provoca un impacto que se ve reflejado en los resultados mostrados. La presencia de mayor dosificación en el surfactante no afecta la fisicoquímica involucrada en la lixiviación de igual manera a las pruebas ISO-pH en presencia de este surfactante.

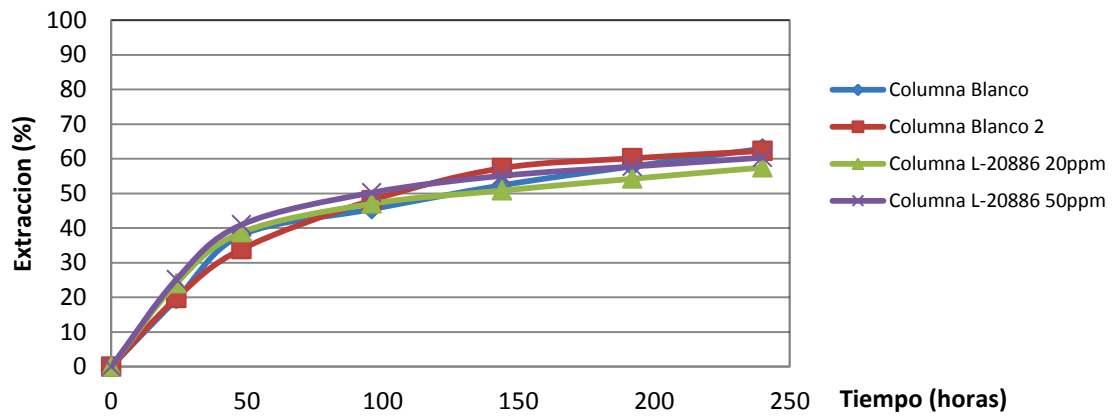


Figura 59: Disolución de mineral oxidado en presencia de surfactante L-20886.

Tanto en presencia del surfactante L-20886 y L-21199 como se observa en las Figuras 59 y 60 no existen cambios significativos en la extracción del mineral que argumenten la utilización de estos surfactantes. La interacción lograda incrementando la dosificación del agente surfactante tampoco impacta en los resultados finales de extracción.

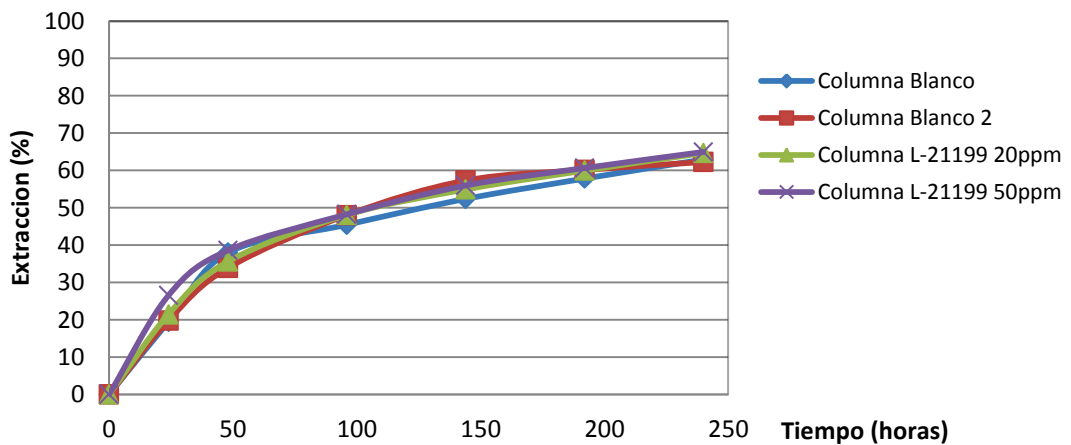


Figura 60: Disolución de mineral oxidado en presencia de surfactante L-21199.

En presencia del surfactante L-21199 se logra mejorar en un 2% la cantidad de cobre extraído en las pruebas, resultado menor al 10% obtenido anteriormente por el surfactante L-15767.

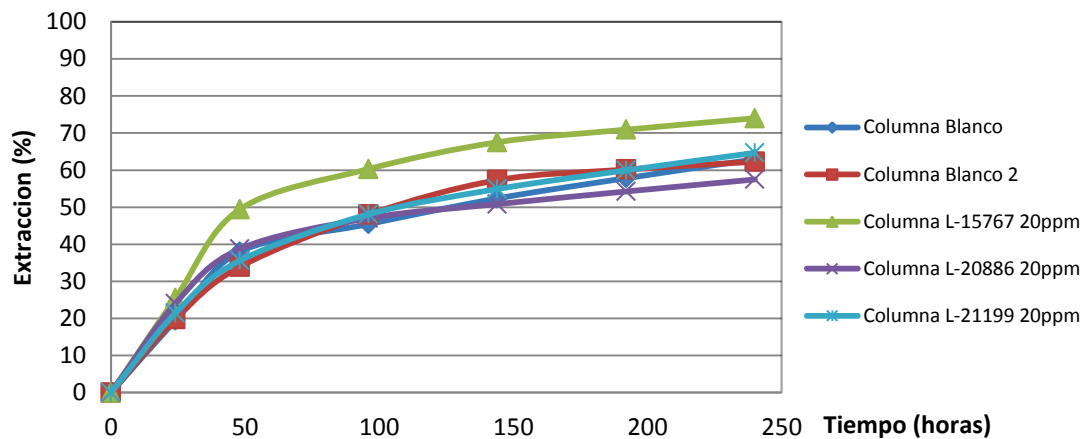


Figura 61: Comparación de disolución de mineral oxidado con diferentes surfactantes a 20 ppm.

Realizando una comparación por dosificación, como se observa en la Figura 61, es posible identificar como el surfactante L-15767 es el que posee los mejores resultados doblando la recuperación obtenida por el surfactante L-21199 el cual además presenta una fase de extracción similar a la observada sin presencia de agentes fluorocarbonados lo que involucra que la cadena de flúor presente tanto en L-21199 y L-20886 no logran generar las interacciones catiónicas y aniónicas necesarias para aumentar la extracción de cobre.

En la siguiente sección se observa la influencia de las características propias de cada surfactante en los resultados obtenidos.

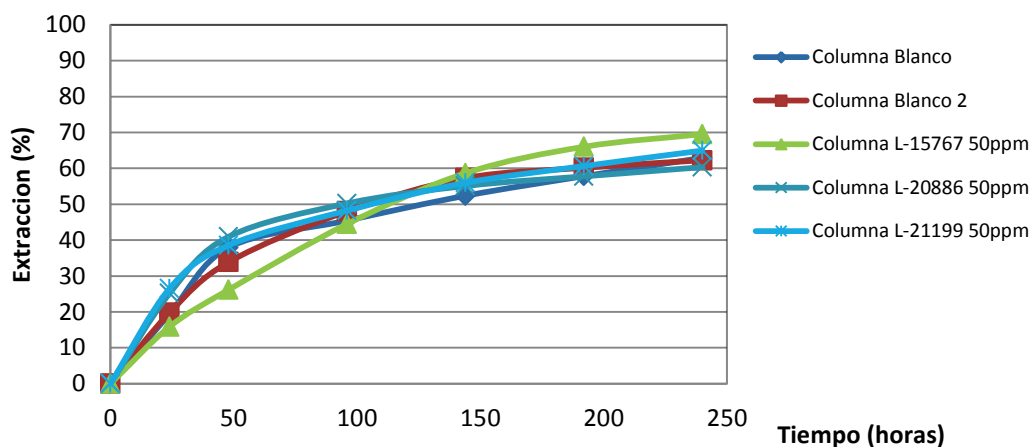


Figura 62: Comparación de disolución de mineral oxidado con diferentes surfactantes a 50 ppm.

Para las pruebas en presencia de dosificaciones de 50 ppm se observa que aun incrementando la dosificación de los surfactantes no existen mejoras de extracción significativas en el proceso. El mejor caso es el presentado nuevamente por el surfactante L-15767 donde se logra un incremento de 7%.

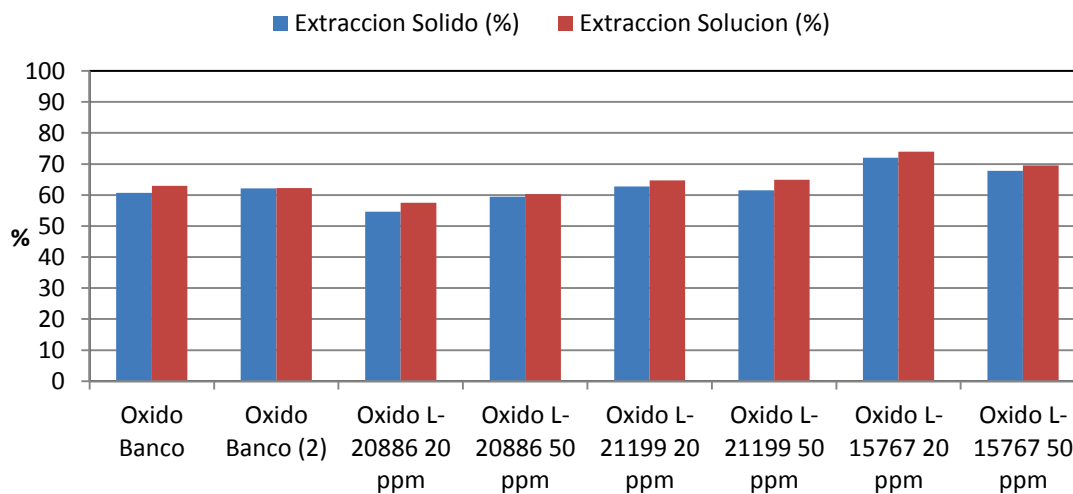


Figura 63: Comparación de extracciones de cobre en mineral oxidado con diferentes surfactantes.

Al analizar la extracción de cobre a partir de los resultados analizados anteriormente y un balance de masa de cada columna se encuentra similitud en sus extracciones las cuales nuevamente identifican que al utilizar el

surfactante L-15767 con una dosificación de 20 ppm es la mejor opción para incrementar la recuperación de cobre desde el mineral. El agente surfactante L-20886 no cumple con el mínimo de porcentaje de extracción logrado por las columnas de control por lo que no aporta cambios significativos en las variables fisicoquímicas que se analizan más adelante.

5.3.2.3. Mineral mixto de cobre

Se presentan los resultados obtenidos para pruebas columnares utilizando mineral mixto de cobre en presencia de los surfactantes fluorocarbonados.

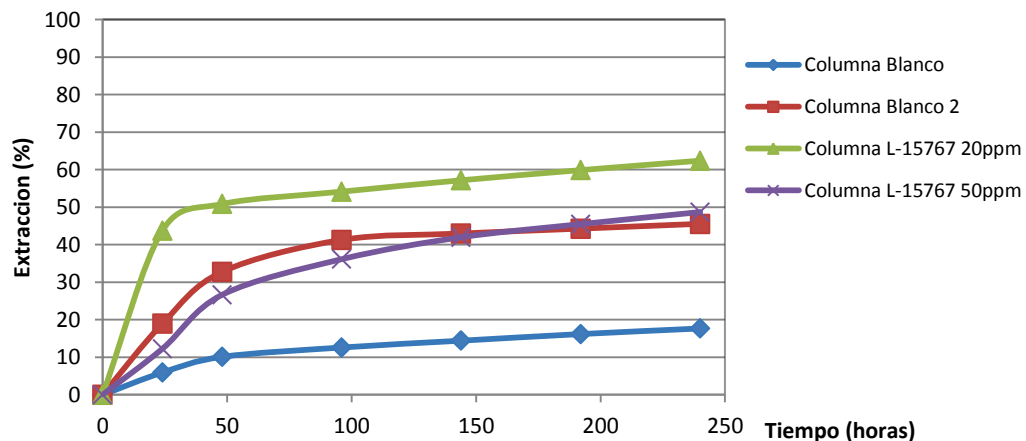


Figura 64: Disolución de mineral mixto en presencia de surfactante L-15767.

En la Figura 64 la presencia del surfactante con una dosificación de 20 ppm logra aumentar en forma importante la extracción de cobre en cerca de 18%. Nuevamente se ve al igual de lo ocurrido en las pruebas ISO-pH que en presencia de un mineral mixto este surfactante logra modificar la mojabilidad de la solución en las partículas minerales. Junto a los resultados obtenidos

anteriormente se puede considerar que esta dosificación es la que presenta mejores resultados en desmedro de dosificaciones de 50 ppm donde no existe modificaciones en el medio, lo que se toma en consideración al recordar los resultados obtenidos por Olave el cual estipulaba la necesidad de utilizar dosificaciones entre 50 y 70 ppm para obtener resultados aceptables.

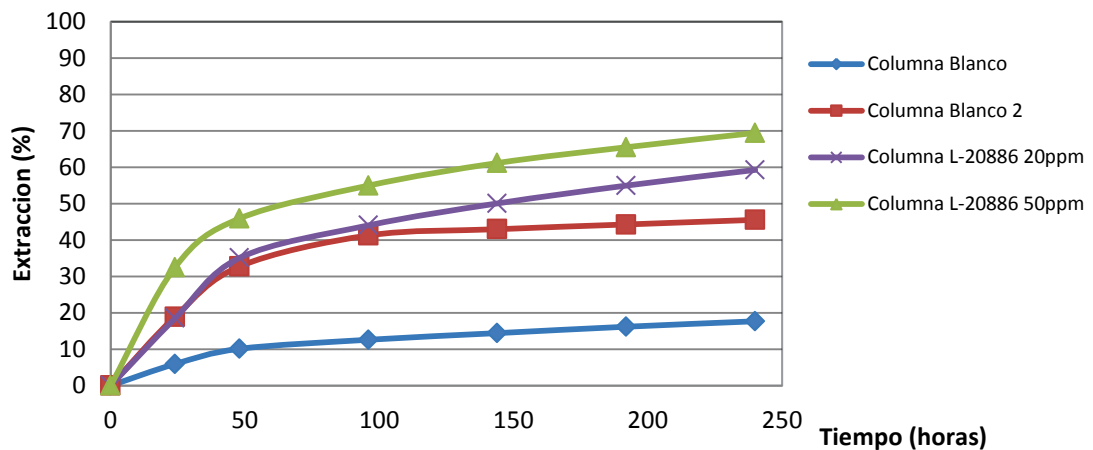


Figura 65: Disolución de mineral mixto en presencia de surfactante L-20886.

En presencia del surfactante L-20886 se ven incrementos en la extracción de cobre al igual que los observados en presencia del surfactante L-15767. La Figura 65 muestra mejoras sustanciales al utilizar este tipo de surfactante C-F con mineral mixto de cobre. Las pruebas ISO-pH en presencia del surfactante L-20886 no presento cambios importantes, lo que demuestra que bajo diferentes condiciones de lixiviación el agente fluorocarbonado logra una mejor interacción entre la partícula y la solución.

En el caso de la extracción de cobre en presencia del surfactante L-21199 se observa la necesidad de utilizar dosificaciones altas para obtener mejoras en la recuperación. En este caso con una dosificación de 50 ppm es posible elevar en 20% la recuperación frente a la baja extracción obtenida con la utilización de 20 ppm del surfactante.

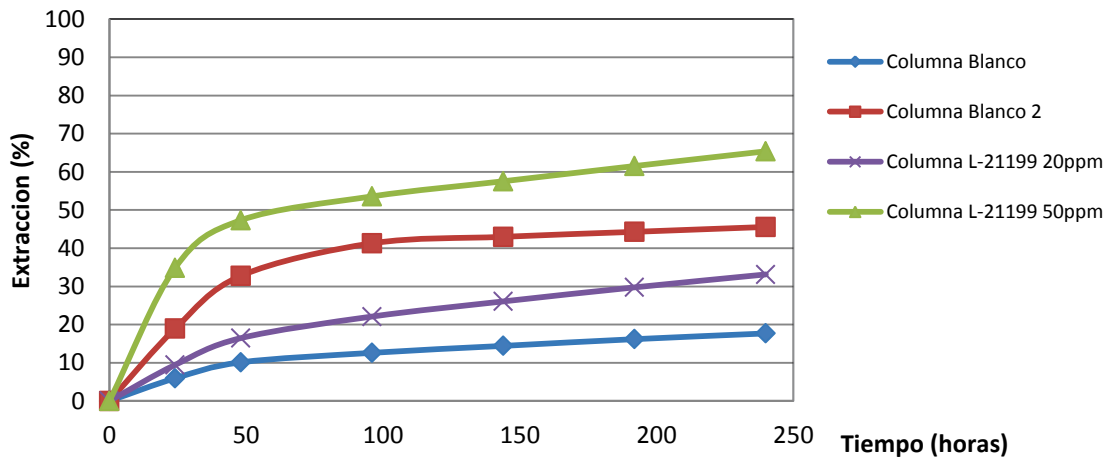


Figura 66: Disolución de mineral mixto en presencia de surfactante L-21199.

Al ser comparados los diferentes agentes surfactantes utilizando iguales dosificaciones la utilización del surfactante L-15767 y L-20886 presentan el mayor incremento en la extracción de cobre superando las pruebas sin surfactantes y frente a la utilización del surfactante L-21199. Se logra mejorar la primera fase una extracción para llegar a una pasivación en la extracción del mineral de forma más rápida.

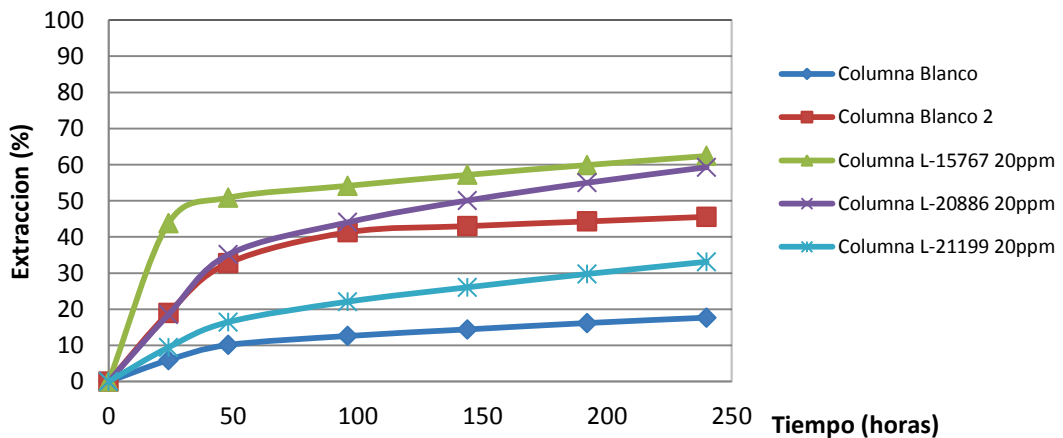


Figura 67: Comparación disolución de mineral mixto con diferentes surfactantes a 20 ppm.

En presencia del agente L-20886 se presenta un incremento en la primera fase de extracción en un mayor rango de tiempo al no encontrarse aún una fase de pasivación en la extracción de cobre pasado 10 días de lixiviación.

Al comparar los surfactantes a dosificaciones de 50 ppm como se indica en la Figura 68 se observa la necesidad de utilizar esta cantidad de reactivo para obtener los mejores resultados en el caso de los surfactantes L-20886 y L-21199 donde los resultados se encuentran sobre el 65% de extracción y superando ampliamente los resultados de las columnas blanco.

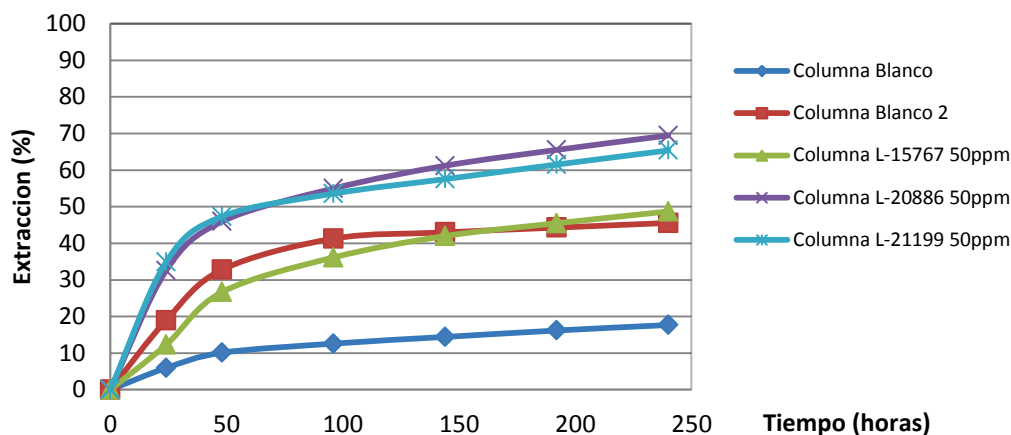


Figura 68: Comparación disolución de mineral mixto con diferentes surfactantes a 50 ppm.

Cabe señalar, que aunque los mejores resultados fueron obtenidos en presencia de altas dosis de surfactante, es importante analizar el resultado de 62% de extracción obtenido por el surfactante L-15767 con una dosificación de 20 ppm, logrando acercarse de forma importante a los otros surfactante utilizados pero con menos de la mitad de dosificación en la prueba.

Al comparar los resultados obtenidos a partir de las muestras obtenidas y la realización de un balance de masa es posible obtener los resultados presentados en la Figura 69 para contrastar ambos resultados.

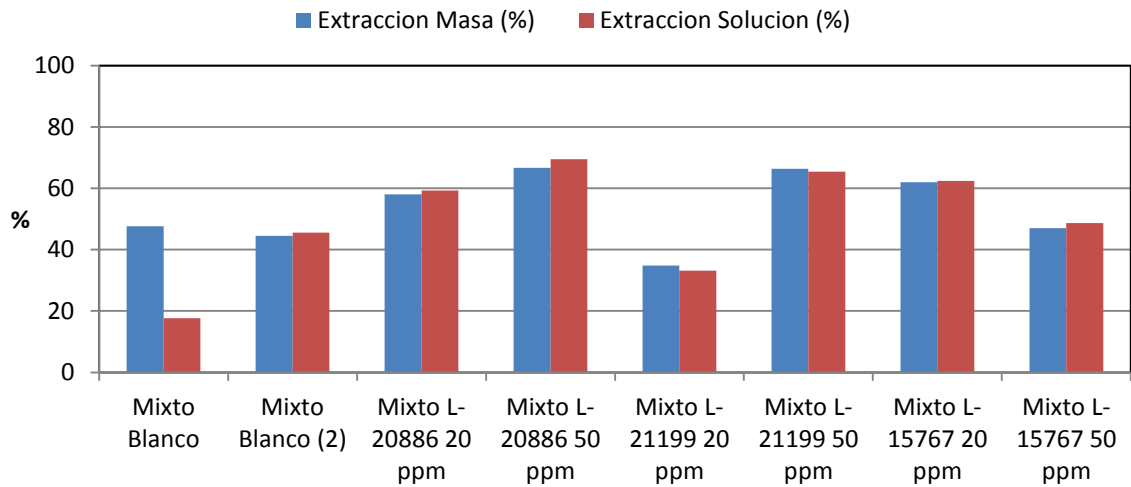


Figura 69: Comparación de extracciones de cobre en mineral mixto con diferentes surfactantes.

La presencia del surfactante L-15767 obtiene los mejores resultados de extracción al trabajar bajo un mineral que contenga especies minerales tanto oxidadas como sulfuradas. Existen diferencias importantes entre los resultados de extracción a partir del balance de masa y los analizados anteriormente que se asemejan a los observados anteriormente en las pruebas ISO-pH. Al comparar estos se observa resultados similares a los observados por Vest encontrando incrementos entre un 2 y 5%. En esta investigación se toma en consideración los resultados obtenidos en la extracción por solución dado que a partir de la caracterización de estas muestras de este tipo se analizan las variables fisicoquímicas en el sistema. Finalmente sólo la cantidad de dosificación utilizada difiere de la elección de uno u otro surfactante donde el análisis posterior de las variables presentes entregara información adicional sobre cada prueba.

5.3.2.4. Mineral sulfurado de cobre

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la utilización de los tres surfactantes fluorocarbonados en presencia de mineral sulfurado de cobre. Estos surfactantes son utilizados en dosificaciones de 20 y 50 ppm además de dos pruebas blanco sin presencia de estos reactivos.

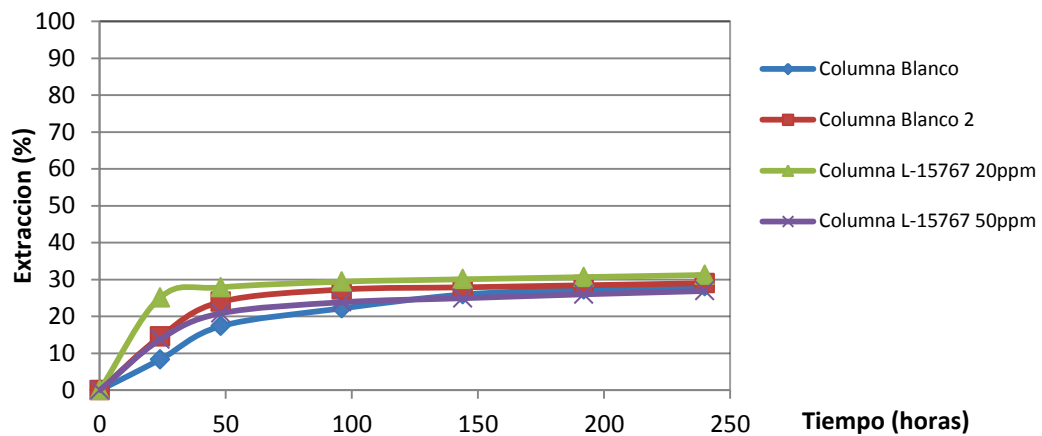


Figura 70: Disolución de mineral sulfurado en presencia de surfactante L-15767.

Como se observa en la Figura 70 los resultados de extracción de cobre no presentan cambios importantes entre las pruebas con y sin surfactante tal como fue observado en las pruebas ISO-pH. Al lixiviar este tipo de mineral no existe un incremento en la interacción de las partículas aunque se mejora la mojabilidad de la solución lixivante y su fuerza de cohesión. El mejorar la calidad del glomero tampoco involucra cambios a distintas dosificaciones de surfactante de igual forma a lo sucedido anteriormente en presencia de mineral oxidado. El surfactante L-15767 con una dosificación media de 20 ppm es el que obtiene los mejores resultados de extracción llegando a un 31%.

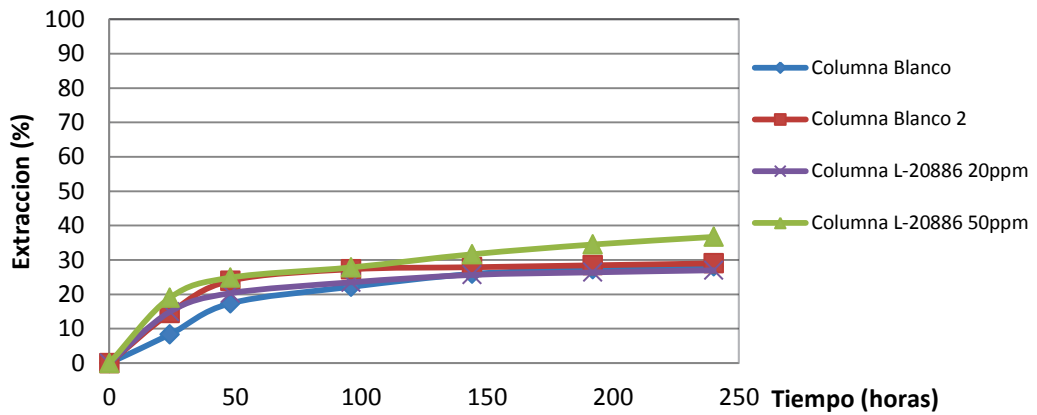


Figura 71: Disolución de mineral sulfurado en presencia de surfactante L-20886.

El comportamiento de las pruebas en presencia del surfactante L-20886 presenta los mejores resultados de extracción con una dosificación de 50 ppm donde se logra aumentar en un 7% la recuperación de cobre. Respecto a la utilización de una dosificación menor nuevamente los resultados no son los esperados consiguiendo resultados similares a las pruebas sin surfactante.

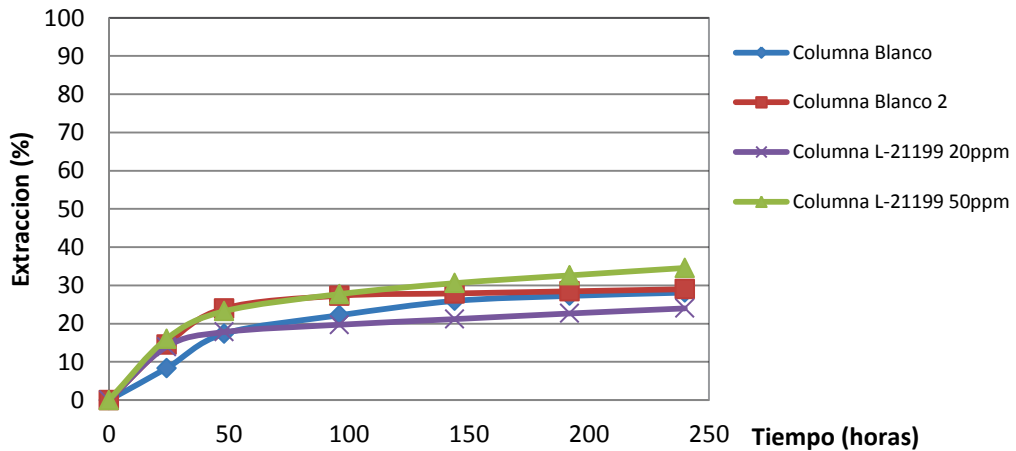


Figura 72: Disolución de mineral sulfurado en presencia de surfactante L-21199.

En presencia del surfactante L-21199 como se observa en la Figura 72 existe un comportamiento similar al registrado anteriormente con el surfactante L-20886 el cual frente a altas dosificaciones de surfactante eleva la extracción de cobre entre un 4 y 5%.

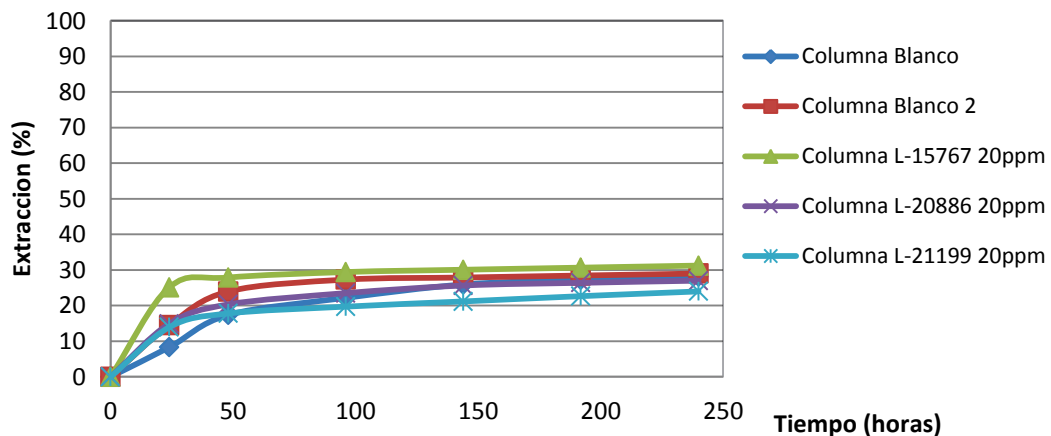


Figura 73: Comparación disolución de mineral sulfurado con diferentes surfactantes a 20 ppm.

Al comparar los resultados obtenidos bajo la misma dosificación en la Figura 73 el surfactante L-15767 es el que presenta resultados favorables llegando a un 31,24%. Este resultado es valioso frente a la alta presencia de cobre insoluble el cual alcanza un 85% de la ley de cobre presente en el mineral por lo que existe una modificación que ayuda a la disolución de minerales del tipo sulfurado. Los dos surfactantes restantes a esta dosificación no presentan resultados importantes a diferencia de los observados en la Figura 74 con una dosificación de 50 ppm.

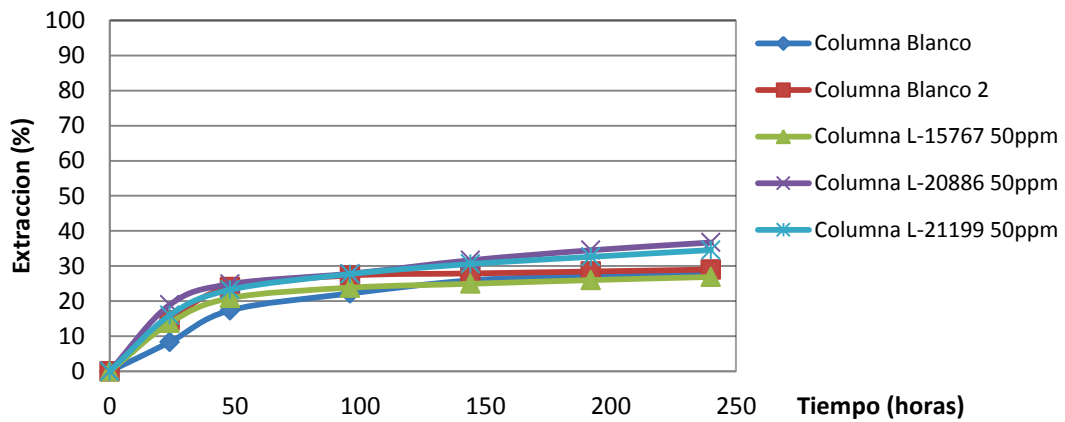


Figura 74: Comparación disolución de mineral sulfurado con diferentes surfactantes a 50 ppm.

Al utilizar dosificaciones de 50 ppm existe un incremento en la extracción de cobre en torno al 34 y 36% en presencia de los surfactantes L-20886 y L-21199. Esto indica la necesidad de dosificaciones de surfactante sobre los 50 ppm para producir cambios en la extracción de cobre a partir de mineral sulfurado. A diferencia de lo sucedido en presencia de mineral oxidado en presencia del agente L-15767 los resultados no sobresalen frente a las pruebas blanco realizadas lo que indica la preferencia en interacción de este tipo de cadena C-F por ese tipo de mineral.

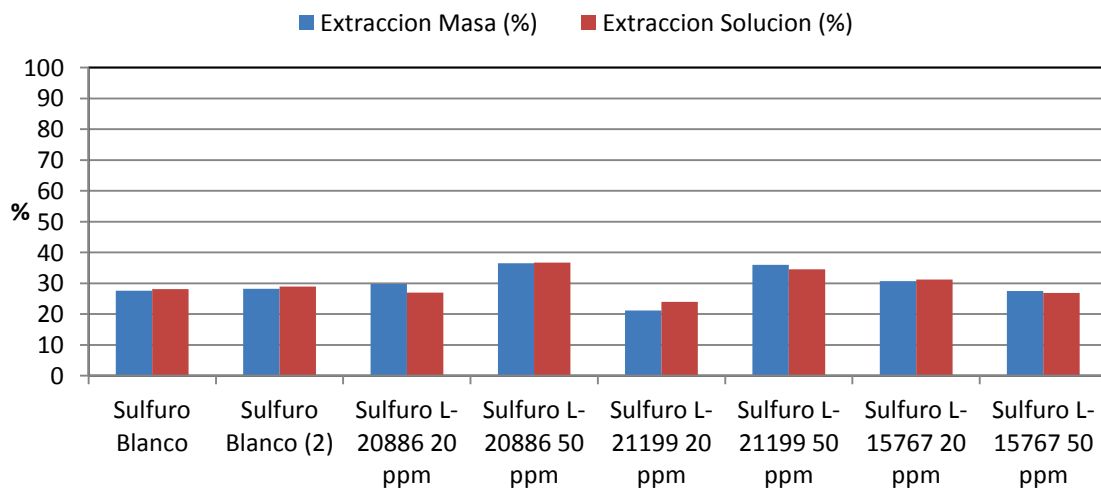


Figura 75: Comparación de extracciones de cobre en mineral sulfurado con diferentes surfactantes.

La comparación de la extracción lograda a partir de la solución frente a la observada desde el balance de masa del mineral como se presenta en la Figura 75 se observa una tendencia que en presencia de los surfactantes fluorocarbonados existen mejoras en la recuperación de cobre. La presencia de dosificaciones sobre los 50 ppm implica una mejor mojabilidad de la partícula. Nowak estipula que a mayor dosificación existe un incremento de la tensión superficial lo que en el caso beneficia a la lixiviación de minerales sulfurados. La información obtenida del análisis de variables fisicoquímicas identificara cual o cuales son las variables afectadas en presencia de los surfactantes fluorocarbonados.

5.4. Análisis por difracción de rayos X

Muestras de cabeza y ripios a diferentes granulometrías correspondientes a los minerales oxidados, mixtos y sulfurados de cobre se envían al laboratorio de difracción de rayos X del departamento de Geología para definir qué especies mineralógicas se encuentran en los diferentes tamaños granulométricos de las muestras minerales lixiviados.

5.4.1. Difracción de rayos X de muestra de minerales oxidados

La Tabla 32 presenta las especies de cobre presentes en el mineral oxidado a diferentes tamaños granulométricos (El DRX completo se encuentra en Anexo D.1). Se aprecia que las especies cristalinas de cobre son la calcosiderita distribuida en todos los tamaños y la Atacamita presente en la fracción bajo 0,83 mm.

Tabla 32: Especies mineralógicas de cobre en mineral oxidado para diferente fracción obtenidas por DRX.

| | | Granulometría (mm) | | | | | | |
|-------------------------|---|---------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | | 19,05 | 12,70 | 9,53 | 6,35 | 1,65 | 0,83 | -0,83 |
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Calcosiderita | CuFe₆(PO₄)₄(OH)₈x4H₂O | 7,8 | 5,06 | 5,68 | 4,17 | 4,58 | 4,72 | 6,28 |
| Atacamita | Cu₂Cl(OH)₃ | x | X | x | x | x | X | 0,49 |

Para comparar y analizar cuál fue el comportamiento de estas especies minerales lixiviadas y en qué cantidad respecto a la matriz original, se realiza un DRX a la muestra de ripio mineral correspondiente al mejor resultado de extracción de cobre producido en las columnas unitarias. Este resultado se produjo en presencia del surfactante L-15767 a 20 ppm (ver sección 5.3.1.) y su mineralogía se observa a continuación en la Tabla 33.

Tabla 33: Especies mineralógicas de cobre en rípios de mineral oxidado para diferente fracción obtenidas por DRX.

| | | Granulometría (mm) | | | | | | |
|-------------------------|---|---------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | | 19,05 | 12,70 | 9,53 | 6,35 | 1,65 | 0,83 | -0,83 |
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Calcosiderita | CuFe₆(PO₄)₄(OH)₈x4H₂O | 2,83 | 1,79 | 3,22 | 2,15 | 2,12 | 3,03 | 2,04 |
| Atacamita | Cu₂Cl(OH)₃ | x | X | X | x | x | x | 0,10 |

Comparando ambas Tablas 32 y 33 la presencia de calcosiderita disminuye desde el porcentaje total del material cristalino debido a su lixiviación en los diferentes tamaños granulométricos. Se lograron mejores extracciones de cobre a partir de calcosiderita a medida que aumenta el tamaño de partícula, información importante sabiendo que la mayor cantidad de cobre presente en la muestra se encuentra en esta zona. La atacamita que se encuentra en el mineral fino baja su presencia en los rípios hasta un 79% del total presente en la matriz original.

Cabe señalar la presencia de otros minerales con presencia de cobre en la muestra del ripio los cuales no fueron identificados anteriormente en el análisis de cabeza. Dioptasa, crednerita, calcosina aparecen en un bajo porcentaje en las fracciones de tamaño de 9,53 y 6,35 mm en la matriz analizada. No haber identificado estos minerales en la matriz de la muestrea de cabeza imposibilita el analizar su comportamiento en el proceso.

5.4.2. Difracción de rayos X de muestras mixtas

La calcosiderita aparece en todo el rango de tamaños del mineral mixto junto a la tenorita que se encuentra en los tamaños granulométricos medios. Por su parte las especies sulfuradas presentes incluyen calcopirita que aparece en la fracción gruesa, digenita en tamaños de partículas de 12,7 mm y calcosina en los tamaños finos.

Tabla 34: Especies mineralógicas de cobre en mineral mixto para diferente fracción obtenidas por DRX.

| | | Granulometría (mm) | | | | | | |
|------------------|--|--------------------|-------|------|------|------|------|-------|
| | | 19,05 | 12,70 | 9,53 | 6,35 | 1,65 | 0,83 | -0,83 |
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Calcosiderita | $\text{CuFe}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \times 4\text{H}_2\text{O}$ | 4,35 | 2,41 | 3,4 | 1,91 | 1,55 | 1,17 | 0,79 |
| Calcopirita | CuFeS_2 | 0,1 | X | x | x | x | X | x |
| Digenita | Cu_9S_5 | x | 0,2 | x | x | x | X | x |
| Tenorita | CuO | x | X | 0,39 | 0,24 | 0,27 | X | x |
| Calcosina | Cu_2S | x | X | x | x | x | 0,13 | 1,11 |

La matriz de ripio utilizado para analizar el comportamiento de estos minerales pertenece a la prueba con mineral mixto con la mayor extracción de cobre. Así como fue observado con el mineral oxidado en presencia del surfactante L-15767, para el mineral mixto también se presentan los mejores resultado de extracción bajo una dosificación de 20 ppm (ver sección 5.3.2).

Tabla 35: Especies mineralógicas de cobre en rípios de mineral mixto para diferente fracción obtenidas por DRX.

| | | Granulometría (mm) | | | | | | |
|------------------|--|--------------------|-------|------|------|------|------|-------|
| | | 19,05 | 12,70 | 9,53 | 6,35 | 1,65 | 0,83 | -0,83 |
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Calcosiderita | $\text{CuFe}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \times 4\text{H}_2\text{O}$ | 3,62 | 1,59 | 2,70 | 1,68 | 0,81 | 0,50 | 0,30 |
| Lammerita | $\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$ | 0,20 | X | x | x | x | x | x |
| Tenorita | CuO | 0,67 | X | 0,19 | x | x | x | x |
| Calcosina | Cu_2S | X | X | x | x | x | x | 0,37 |
| Digenita | Cu_9S_5 | X | 0,20 | x | x | x | x | x |

De ambas tablas 34 y 35 se observa cómo se genera una importante disminución en la presencia de los minerales oxidados siendo estas especies cristalinas las que generan una mayor interacción en el proceso lixiviante. La tenorita que se encuentra en grandes porcentajes en los rangos de tamaño de 6,35 mm hasta 1,65 mm llega a una disminución en el porcentaje de la matriz de 51,28% a una granulometría de 9,53 milímetros. La importancia de esta información es el identificar que en este rango de granulometría es donde se encuentra la mayor cantidad de cobre a recuperar. La calcosiderita presenta un máximo de extracción a una menor granulometría donde a tamaños menores de 0,83 milímetros, disminuye su presencia en un 62,03%. A medida que aumenta el tamaño de esta especie cristalina la presencia de la calcosiderita permanece como es el caso de tamaño de 19,05 mm.

Los minerales sulfurados no presentan disoluciones importantes como es el caso de la digenita en tamaños granulométricos de 12,70 milímetros. La calcopirita y calcosina se presentan a nivel de traza en el mineral llegando a desaparecer de la matriz del rípio como es el caso de la calcopirita y para la calcosina mostrando una disolución de 83,33%.

5.4.3. Difracción de rayos X de muestras sulfuradas

En la Tabla 36 se encuentran los resultados de la caracterización mineralógica para muestras sulfuradas donde se aprecia que las especies portadoras de cobre son la calcopirita en tamaños de 19,05 mm y calcosina en 0,83 mm y tamaños menores a esta. Aunque se esperaba que la muestra mineral fuera completamente de minerales sulfurados existe presencia de mineral oxidado como la tenorita lo que indica que este mineral podría tratarse de sulfuro primario cercano a ser un mineral mixto. La tenorita se encuentra en cantidades importantes es los tamaños granulométricos entre 19,05 y 1,65 mm.

Tabla 36: Especies mineralógicas de cobre en mineral sulfurado para diferente fracción obtenidas por DRX.

| | | Granulometría (mm) | | | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|-------|------|------|------|------|-------|--|
| | | 19,05 | 12,70 | 9,53 | 6,35 | 1,65 | 0,83 | -0,83 | |
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | |
| Tenorita | CuO | 0,26 | 0,58 | 0,52 | x | x | 0,38 | 0,40 | |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | x | X | x | x | x | x | 0,59 | |
| Calcosina | Cu ₂ S | x | X | x | x | x | 0,95 | 0,87 | |

Se realiza una comparación de este difractograma con los resultados obtenidos del análisis del ripio perteneciente a la mejor extracción obtenida los que se presentan en la Tabla 37. Esta prueba pertenece a la lixiviación realizada en presencia del surfactante L-21199 a 20 ppm.

Tabla 37: Especies mineralógicas de cobre en ripios de mineral sulfurado para diferente fracción obtenidas por DRX.

| | | Granulometría (mm) | | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------------|-------|------|------|------|------|-------|
| | | 19,05 | 12,70 | 9,53 | 6,35 | 1,65 | 0,83 | -0,83 |
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Tenorita | CuO | X | 0,20 | 0,21 | x | x | 0,25 | 0,34 |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | X | x | x | x | x | X | 0,11 |
| Calcosina | Cu ₂ S | X | x | x | x | x | 0,39 | 0,23 |

Analizando las Tablas 36 y 37 se observa cómo no existe presencia de minerales de cobre en la granulometría media del mineral lo que afirma los resultados de ley de cobre obtenidos para este mineral. Tal como lo ocurrido con el mineral mixto se obtienen disminuciones en la presencia de los minerales sulfurados de cobre en la granulometría fina.

Existe una presencia importante de tenorita en la muestra la cual presenta una dilución promedio de un 49,74% obteniendo en los tamaños granulométricos mayores sus mejores extracciones. Esto indica que existe una dependencia directa del tamaño de mineral para lograr una mayor o menor disolución en el caso de minerales oxidados o sulfurados.

Al analizar los tres tipos de minerales lixiviados es importante considerar como en presencia de surfactantes fluorocarbonados como es el F-15767 se logran extracciones importantes de los minerales oxidados de cobre teniendo granulometrías sobre los 6,35 mm. De forma contraria para los minerales sulfurados de cobre estos al estar en las fracciones de mineral fino logran ser lixiviados de forma satisfactoria aunque estos se encuentran en su mayoría en forma de trazas.

5.5. Medición de pH y potencial de la solución (Eh)

Estas variables impactan directamente a los resultados de extracción de cobre en una lixiviación. En esta investigación ambos factores son medidos con el fin de ser analizados y comparados frente a la utilización tanto de diferentes muestras minerales como dosificaciones de surfactante. Los resultados se presentan a continuación.

5.5.1. Mineral oxidado de cobre

Los resultados que se obtienen en las mediciones se presentan para las dos dosificaciones utilizadas de 20 y 50 ppm. Se observa en la Figura 76 como las pruebas de lixiviación son realizadas en torno a un pH 1,4 el cual se encuentra dentro de los rangos utilizados en tratamiento de minerales oxidados que se encuentran entre 1,4 y 1,8.

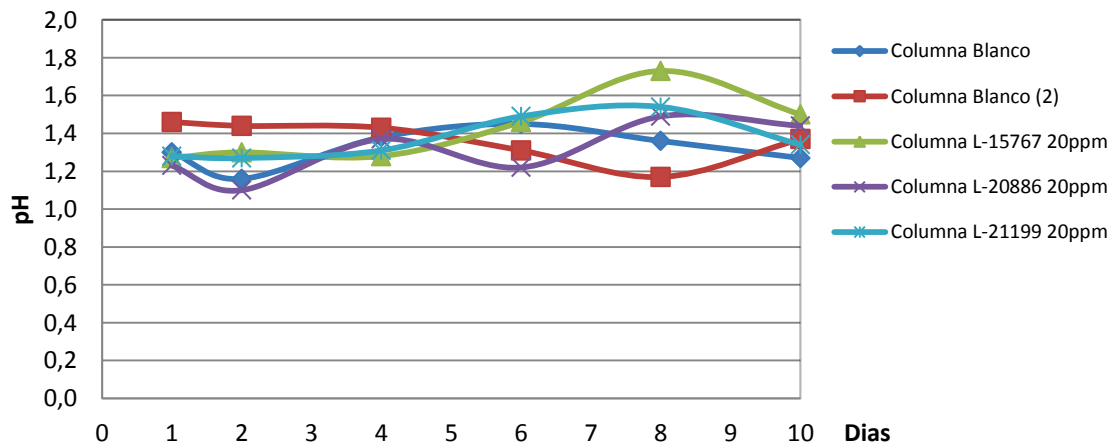


Figura 76: Medición de pH en pruebas en columnas de mineral oxidado a 20 ppm.

El pH de las pruebas con mejor resultados de recuperación (L-20886 y L15767) presentan que en el caso del surfactante L-15767 existe una alta oscilación de acidez desde 1,23 hasta a un máximo de 1,73 a los 8 días para luego decaer a 1,50. Este aumento de pH en el tiempo se presenta en ambas pruebas lo que demuestra una alta necesidad de ácido en el medio para lograr buenos resultados de extracción. Las mayores recuperaciones de cobre bajo las dosificaciones de surfactante mostradas ocurren los primeros dos días donde se presenta un ambiente ácido ideal. Las pruebas con valores bajos de extracción presentan un aumento de acidez considerable hasta llegar a pH 1,10 en el caso del surfactante L-20886 y 1,16 para la primera prueba blanco que se atribuye a la poca interacción lograda entre solución lixiviante y las partículas minerales con estas condiciones.

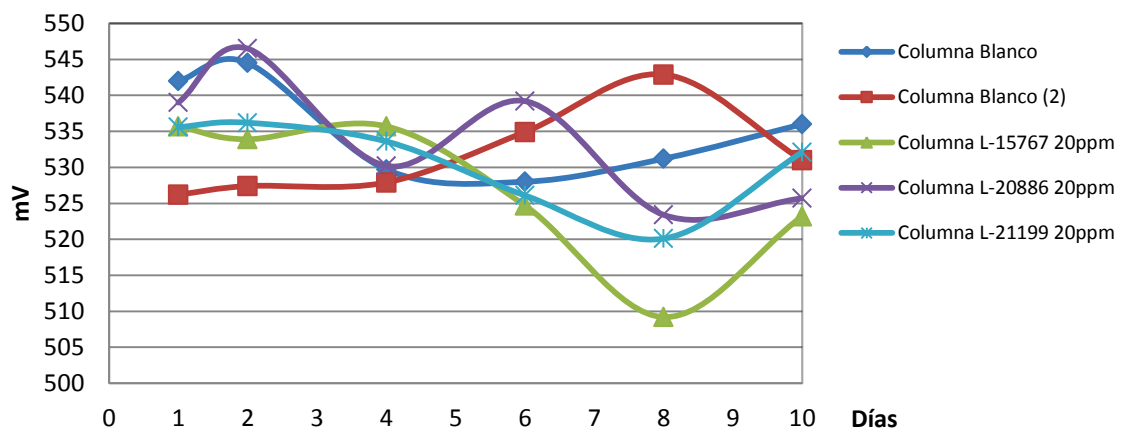


Figura 77: Medición de Eh en pruebas en columnas de mineral oxidado a 20 ppm.

Al analizar el comportamiento del potencial en las pruebas se observa como las pruebas con mejores resultados presentan un potencial cercano a 535 mV a diferencia del promedio de 540 mV que presentan las pruebas blanco y L-20886. Al ser más negativo el potencial existe una preferencia en la formación de puentes de flúor a partir de la interacción de elementos catiónicos y aniónicos.

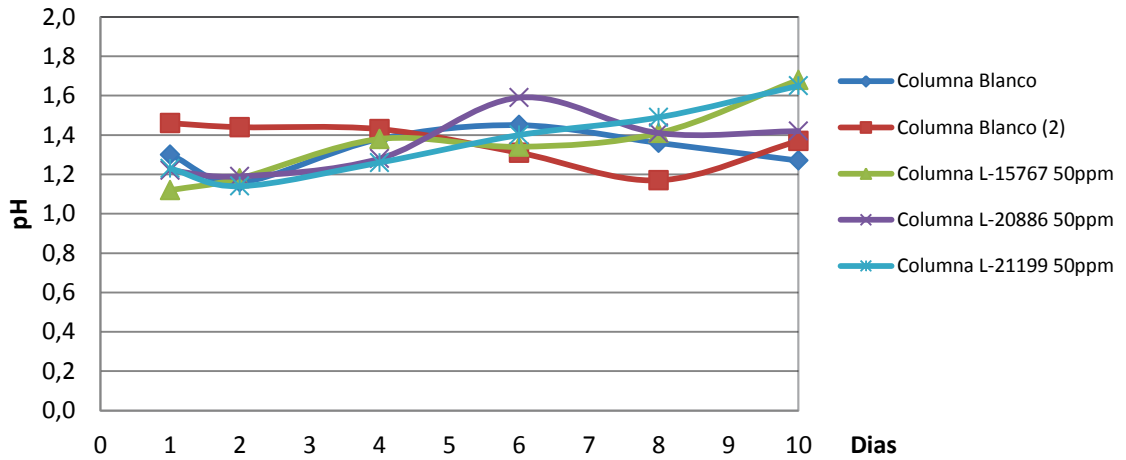


Figura 78: Medición de pH en pruebas en columnas de mineral oxidado a 50 ppm.

Al aumentar la dosificación del surfactante en la Figura 78 existe un cambio en el pH de las pruebas con mejores resultados de extracción las cuales son L-15767 y L-21199. Estas presentan un ambiente muy ácido los primeros días de lixiviación llegando a 1,70 a lo largo de los 10 días de duración de la prueba. Al igual que a dosificaciones de 20 ppm la mayor extracción de cobre se realiza los primeros días donde se encuentra un alto ambiente ácido.

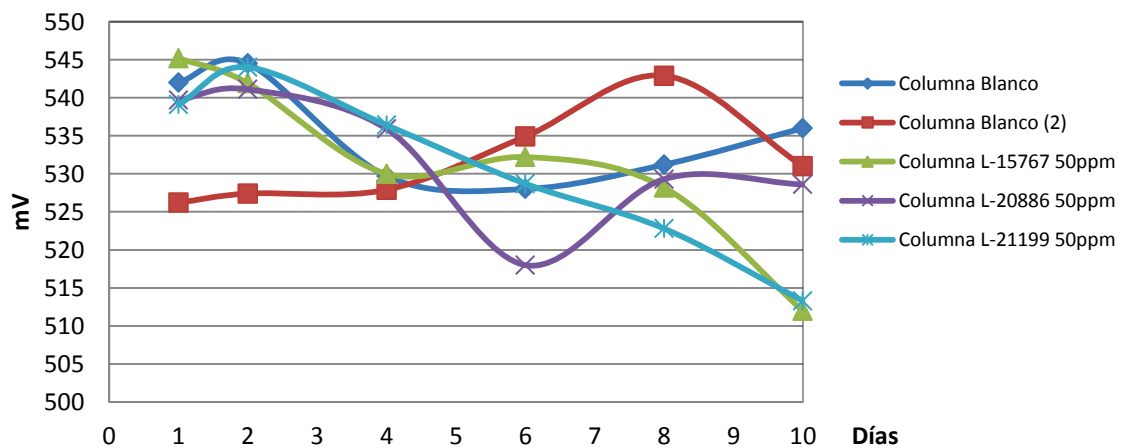


Figura 79: Medición de Eh en pruebas en columnas de mineral oxidado a 50 ppm.

El comportamiento de potencial en las pruebas a esta condición de surfactante presenta cambios notorios en los últimos días de lixiviación donde se presenta una baja en el potencial en las pruebas con mejores resultados de extracción. Las otras pruebas realizadas presentan una tendencia a mantenerse en un rango entre 525 y 540 mV. Aun con dosificaciones de surfactantes diferentes el comportamiento de las pruebas es similar.

5.5.2. Mineral mixto de cobre

Al lixiviar este tipo de mineral a una concentración de 20 ppm de surfactante nuevamente en presencia del agente L-15767 se encuentran los mejores resultados de extracción llegando a un 62,39%. El segundo mejor resultado se obtiene de mano del surfactante L-20886 el cual llega a un 59% de extracción de cobre. El comportamiento del pH en las pruebas como se indica en la Figura 80 es regular a lo largo de los 10 días de riego a diferencia de lo ocurrido con el mineral oxidado. Los dos primeros días existe una menor acidez en presencia de los agentes L-15767 y L-20886 en donde existe un alto consumo de ácido al producirse la primera fase en la extracción de cobre superando un pH de 1,5. A medida que pasan los días las pruebas se realizan a valores de pH en torno a 1,4 lo que representa la fase de pasivación en la lixiviación.

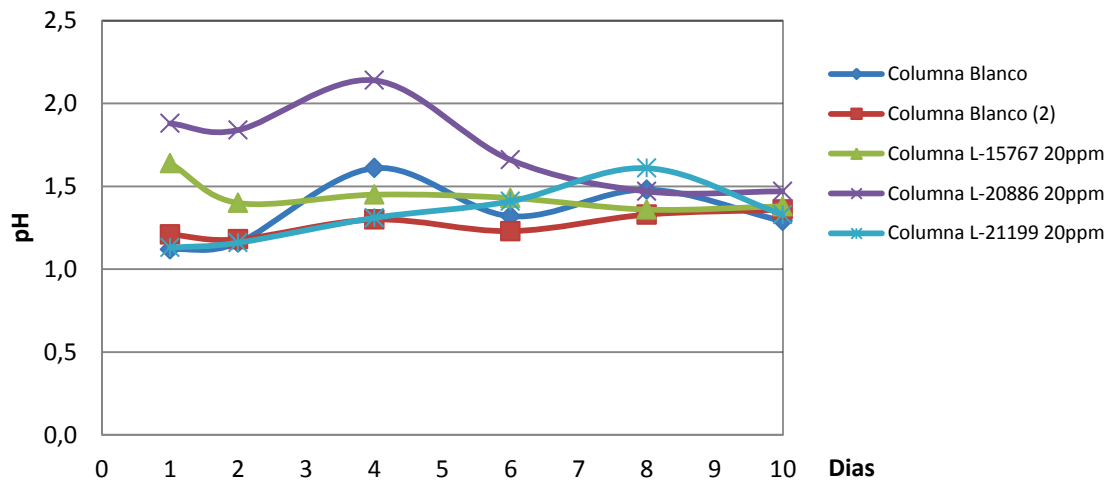


Figura 80: Medición de pH en pruebas en columnas de mineral mixto a 20 ppm.

Para las pruebas con menores resultados de extracción se observa un comportamiento regular a lo largo de la misma donde los agentes surfactantes no generan cambios.

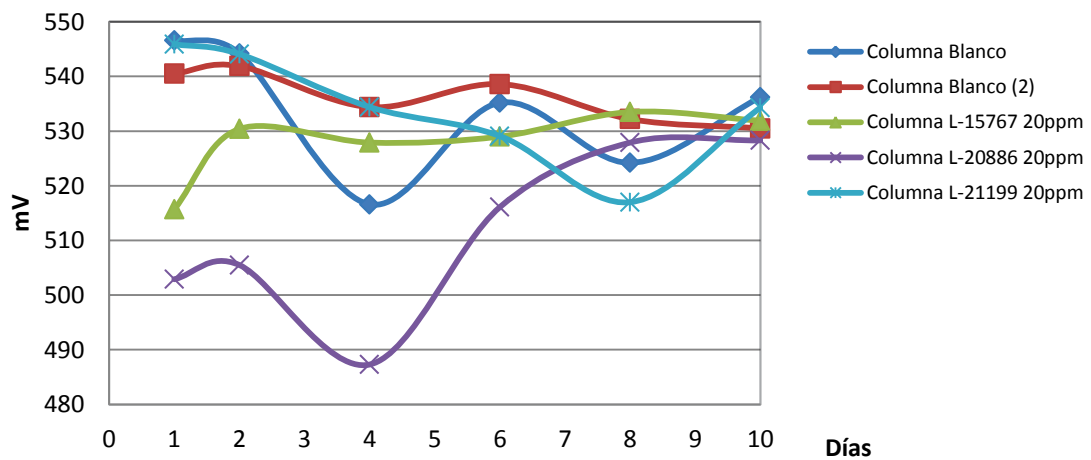


Figura 81: Medición de Eh en pruebas en columnas de mineral mixto a 20 ppm.

Los potenciales presentes en las pruebas a 20 ppm (Figura 81) poseen una baja variabilidad especialmente en aquellas con menores resultados de

extracción. En el caso del surfactante L-20886 con 59% de recuperación se observa una alta oscilación de 487 mV en su punto más bajo. Este tipo de comportamiento es ideal para la formación de puentes de flúor que ayuden a la lixiviación de minerales oxidados.

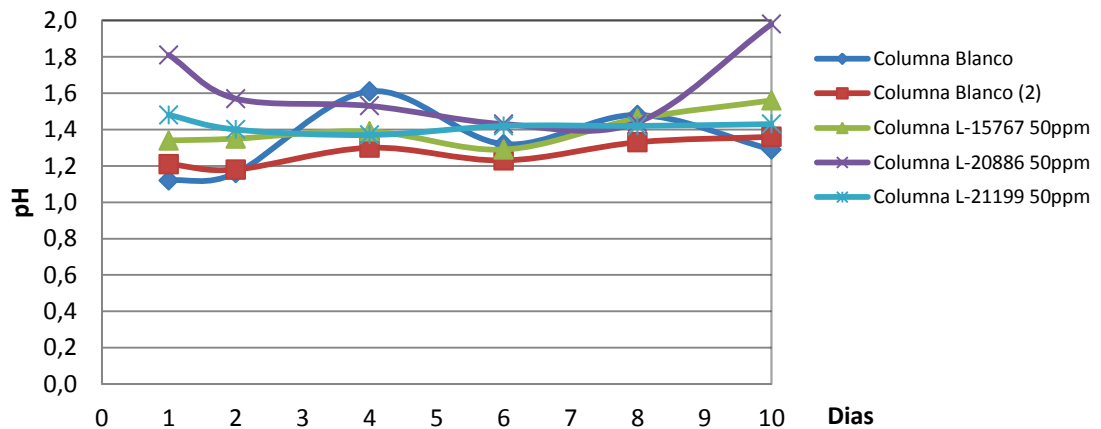


Figura 82: Medición de pH en pruebas en columnas de mineral mixto a 50 ppm.

Analizando las pruebas con dosificaciones de 50 ppm los mejores resultados fueron en las columnas con presencia de surfactante L-20886 y L-21199 sobrepasando el 65% de extracción.

El comportamiento del pH en las pruebas de la Figura 82 muestra como nuevamente los mejores resultados poseen ambientes menos ácidos frente a las otras pruebas realizadas debido a la interacción entre el mineral y la solución lixivante. Como ocurrió a una dosificación de 20 ppm al finalizar el tiempo de lixiviación se obtiene un pH de 1,4 en la fase de pasivación. En el caso del surfactante L-20886 su pH se eleva llegando a 2,0 lo que puede traer consecuencias al producir alto contenido de hierro en la extracción.

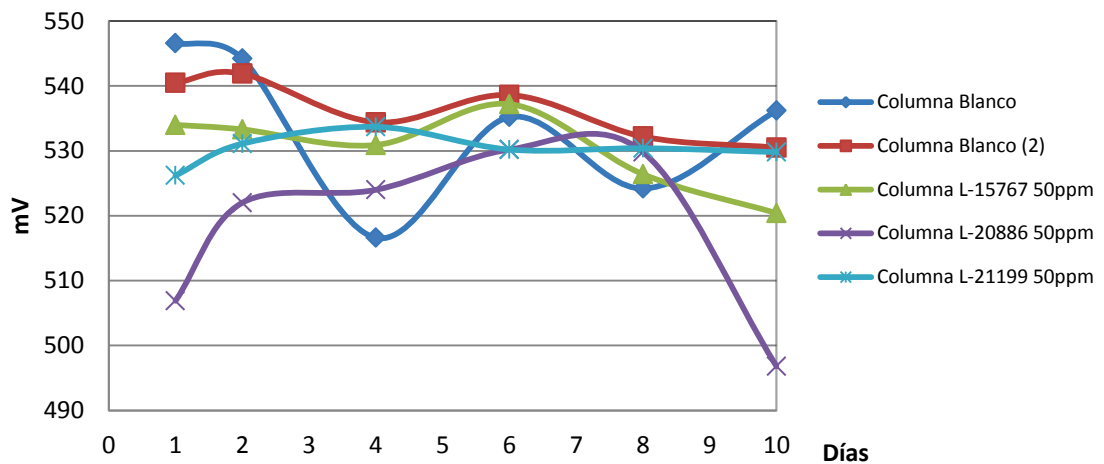


Figura 83: Medición de Eh en pruebas en columnas de mineral mixto a 50 ppm.

La Figura 83 presenta como nuevamente en las pruebas con bajo potencial existe una alta extracción los primeros días en comparación a las otras pruebas realizadas. A lo largo de la lixiviación estos valores aumentan para terminar en rangos entre 520 y 540 mV similares a los vistos en pruebas anteriores. La muestra en presencia de surfactante L-20886 es la única que presenta un menor potencial al terminar las pruebas siendo este el único que no logra llegar a su fase de pasivación en el tiempo de lixiviación realizado.

5.5.3. Mineral sulfurado de cobre

Cuando se utiliza un mineral sulfurado de cobre no se logran cambios importantes en la extracción de cobre en presencia de los surfactantes. A una dosificación de 20 ppm sólo el surfactante L-15767 logra superar los resultados de extracción obtenidos por las pruebas blanco en un 2%. En el caso de una dosificación de 50 ppm se observan mejoras en la extracción de cobre llegando a un 34 y 36% para los surfactantes L-20886 y L-21199 respectivamente.

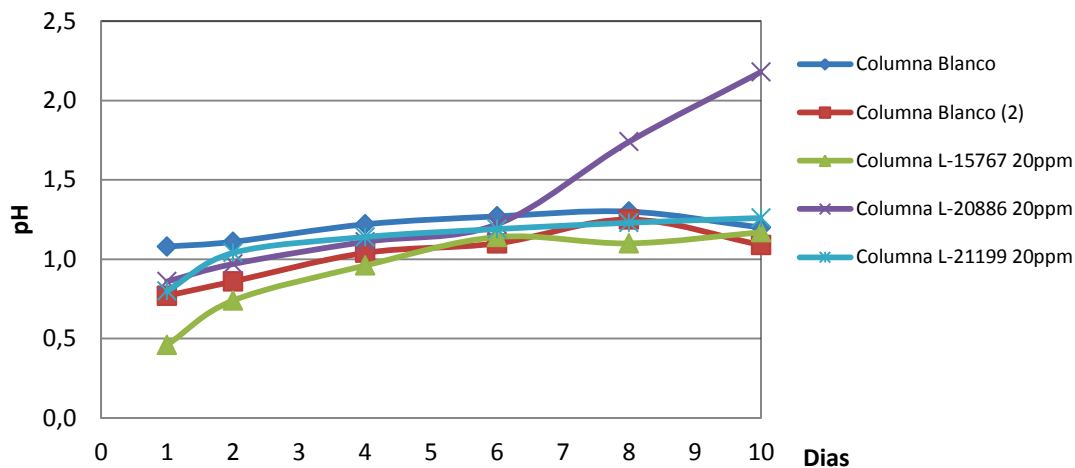


Figura 84: Medición de pH en pruebas en columnas de mineral sulfurado a 20 ppm.

Al observar los resultados de la Figura 84 el surfactante L-15767 es el que presenta una mayor acidez los primeros días de lixiviación llegando bajo un pH de 0,5 el primer día lo que se ve reflejado en la alta extracción lograda en esta prueba a ese momento. Si se compara con las pruebas realizadas con mineral oxidado se ve una disminución en el pH presentando un ambiente ácido cercano a 1,0. Este ambiente ácido se mantiene a lo largo de las pruebas donde la presencia de los agentes surfactantes no produce variación en el comportamiento. A partir del tercer día de lixiviación se comienza a observar la pasivación de la curva de extracción para finalizar al igual que las pruebas con minerales oxidados y mixtos a un pH cercano a 1,4 mucho menor al observado Lewadowski quien obtuvo sus mejores resultados a un pH de 1,8.

En cuanto al potencial, como se observa en la Figura 85, se muestra que a mayores potenciales se encuentran los mejores resultados de extracción.

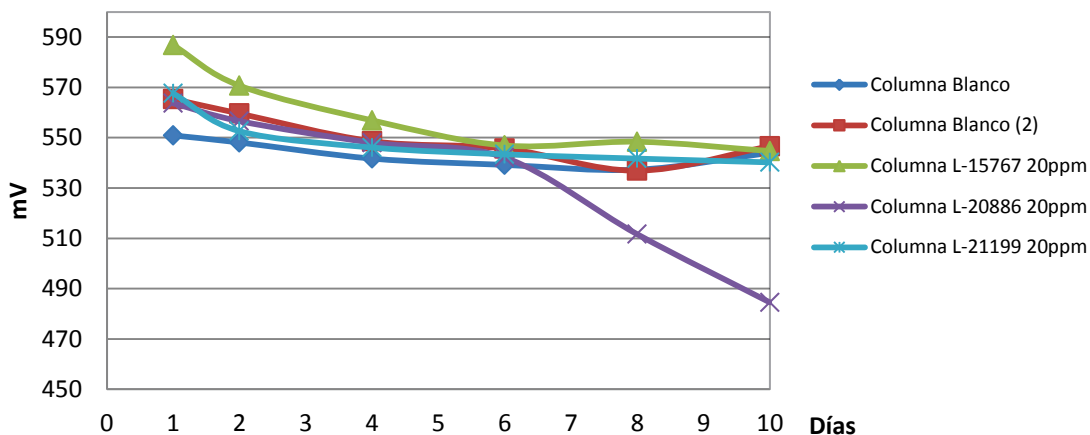


Figura 85: Medición de Eh en pruebas en columnas de mineral sulfurado a 20 ppm.

El comportamiento del potencial a una dosificación de 20 ppm es mayor al observado en presencia de minerales oxidados de cobre y que, como fue observado por Clarke, incrementa la oxidación en la superficie de los minerales sulfurados. Esta situación se ve reflejada en presencia de los tres surfactantes fluorocarbonados siendo el surfactante L-15767 el que mayor potencial presenta comenzando a 585 mV. Sin importar la presencia de los agentes surfactantes al llegar a una pasivación de la lixiviación se obtienen potenciales cercanos a 540 mV.

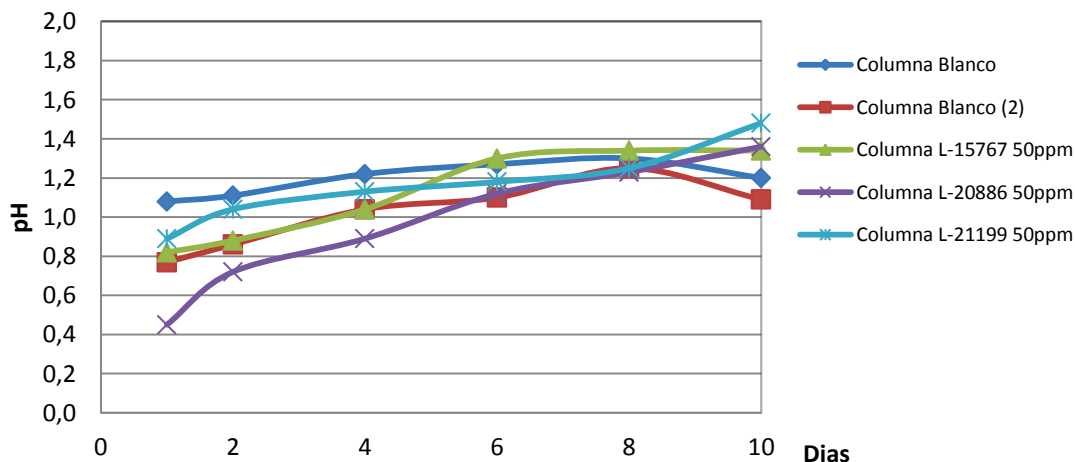


Figura 86: Medición de pH en pruebas en columnas de mineral sulfurado a 50 ppm.

A una dosificación de 50 ppm el pH de los mejores resultados de extracción presentan diferencias en su acidez. En el caso de la prueba con surfactante L-20886 este posee un crecimiento lineal empezando en 0,45 llegando a 1,38, siendo un ambiente favorable para la extracción de cobre pero que no se refleja al analizar su curva de extracción. En el caso del surfactante L-21199 este posee un pH menos ácido de 0,8 que logra un comportamiento de iguales características al del surfactante L-20886 y similar extracción. Los resultados de recuperación obtenidos en las otras pruebas difieren casi en 4% de las mencionadas anteriormente pero el pH no presenta diferencias importantes al encontrarse dos de ellas entre los pH de las pruebas en presencia de L-20886 y L-21199.

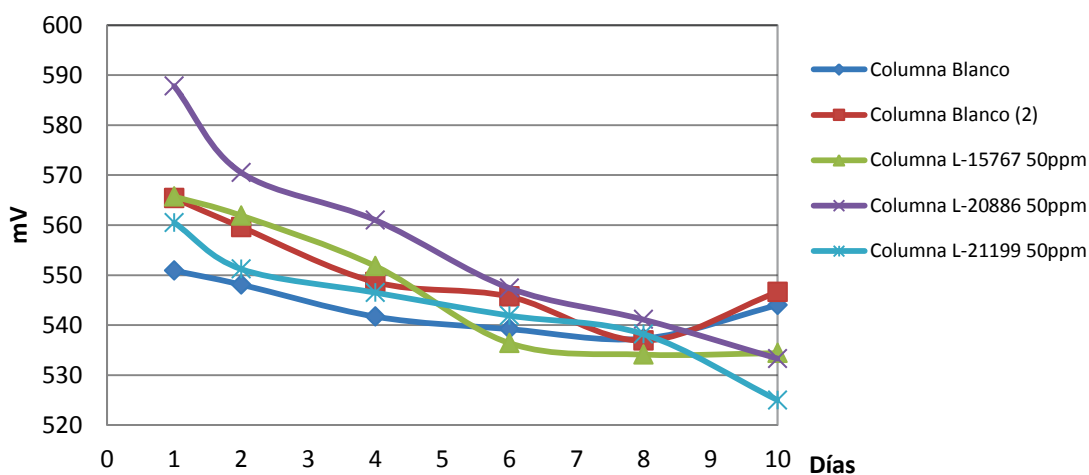


Figura 87: Medición de Eh en pruebas en columnas de mineral sulfurado a 50 ppm.

Como ocurrió con las pruebas anteriores a 20 ppm los dos mejores resultados de recuperación se encuentran a mayores potenciales. En este caso, también se observa que las pruebas blanco (2) y L-15767 parten en este rango de potencial. Esta situación se asemeja a lo observado por Schultze

donde en presencia de agentes aditivos se logra una disminución en el potencial observado.

5.6. Tensión superficial, densidad y consumo de ácido

Para obtener más información de las variables en lixiviación se controla la tensión superficial, densidad y consumo de ácido de las pruebas en columnas con el fin de entender el mejor o peor comportamiento que se obtiene en la extracción de cobre.

5.6.1. Mineral oxidado de cobre

En presencia de surfactantes fluorocarbonados utilizando un mineral oxidado se logran los mayores porcentajes de extracción de cobre. Como se observa en la Figura 88 a una dosificación de 20 ppm de surfactante la densidad aumenta considerablemente en el caso de los tres surfactantes utilizados.

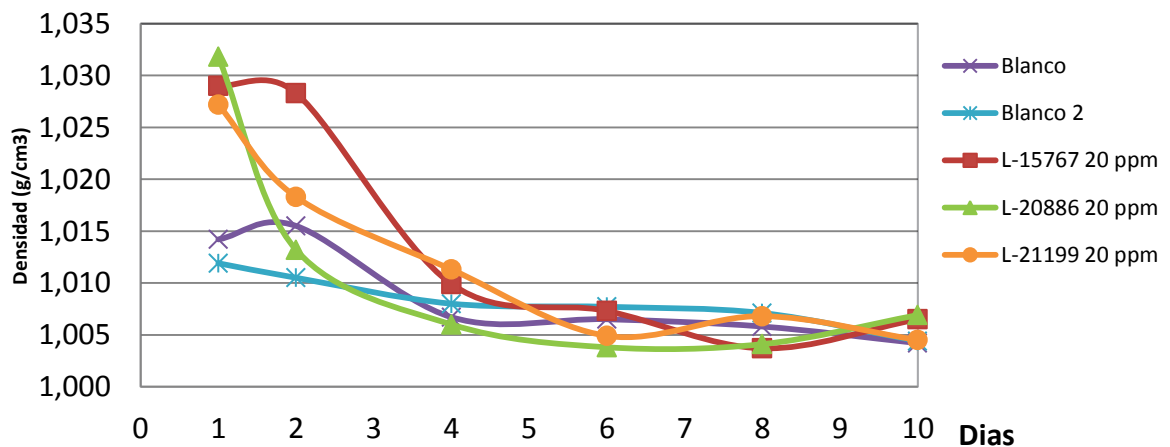


Figura 88: Densidad de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

A una dosificación de 20 ppm se observan densidades de 1,027 y 1,029 g/cm³ en el primer día de riego para las pruebas L-21199 y L-15767 que son las que presentan los mejores resultados de extracción. Ambas pruebas además disminuyen su densidad hasta el quinto día donde se encuentran el resto de las otras pruebas presentes. Para la prueba L-15767 la importancia de mantener una alta densidad por más tiempo puede significar un cambio importante en los objetivos de extracción logrados.

La densidad a lo largo de la prueba en presencia del surfactante L-20886 es similar a las mencionadas anteriormente comenzando con un valor de 1,03 g/cm³. Esta situación indica que la densidad se ve alterada en presencia de agentes fluorocarbonados especialmente cuando ocurre una alta interacción entre la solución lixivante y el mineral oxidado. A medida que la lixiviación continua, se observa que las densidades tienden a comportarse de forma regular llegando a valores de 1,00 g/cm³.

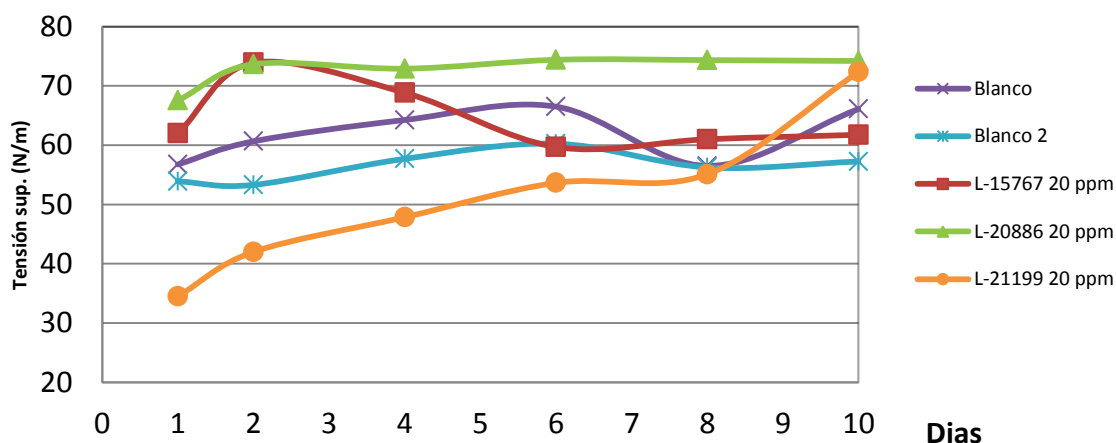


Figura 89: Tensión superficial de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Al analizar la Figura 89 el surfactante L-15767 posee un comportamiento interesante, al elevar su tensión por debajo de las 75 N/m, para posteriormente

decaer y pasado la mitad de tiempo de riego mantenerse en torno a los 63 N/m. Estos resultados son contrarios a lo expresado por Vest en su investigación el cual estipula que tensión superficial necesariamente debe disminuir. Esta situación, puede deberse al tipo de enlace más electronegativo que se forma por el ion flúor y que genera una mejor estabilidad en el sistema. Por otro lado en presencia del surfactante L-21199 la tensión al comienzo de la prueba es significativamente baja para luego elevándose proporcionalmente hasta el fin de la prueba y terminar con una tensión superficial similar a la lograda en la prueba L-20886.

Según lo postulado por Olave, la presencia de los surfactantes ayuda en forma importante a los resultados a obtener en una etapa de lixiviación. La Figura 89 nos muestra como efectivamente la utilización de los surfactantes modifica la interacción lograda entre las partículas sólidas y la solución acuosa modificando el equilibrio en el sistema frente a las pruebas blanco.

La Figura 90 muestra el consumo de ácido presente en las pruebas con mineral oxidado donde existe una baja de consumo entre los días 2 y 4 en presencia de surfactantes para luego incrementarse en forma importante hasta llegar a un máximo en el caso del surfactante L-15767 de 41,71 kg/t. Los otros reactivos presentan un comportamiento similar entre ellos aunque existe una leve alza en el consumo por parte del surfactante L-20886 pero que disminuye para finalizar dentro del promedio de consumo obtenido por las pruebas blanco. Bajo una dosificación de 20 ppm se observa el comportamiento descrito por Waddell donde el consumo de ácido disminuye al haber presencia de agentes surfactantes en el medio. Esto se aplica hasta el momento de la pasivación donde existe un incremento hasta finalizar con un consumo de ácido superior al observado en las pruebas blanco.

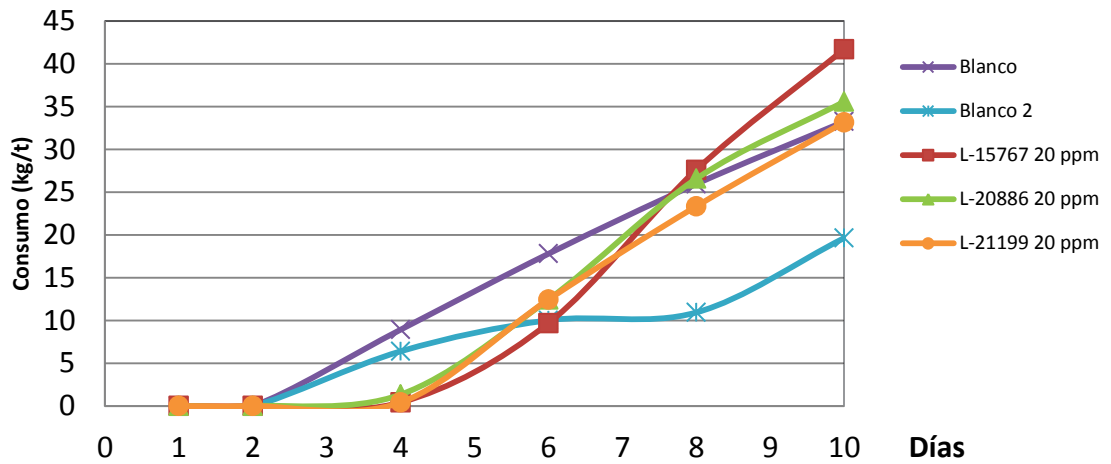


Figura 90: Consumo de ácido del mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Al analizar las pruebas a una dosificación de surfactante de 50 ppm se observa un comportamiento similar al descrito a dosificaciones menores de 20 ppm a excepción del surfactante L-15767 el cual presenta densidades similares a las obtenidas en las pruebas blanco especialmente a la prueba blanco 2. A esta dosificación todas las pruebas terminan en un rango de densidad cercano a $1,005 \text{ g/cm}^3$.

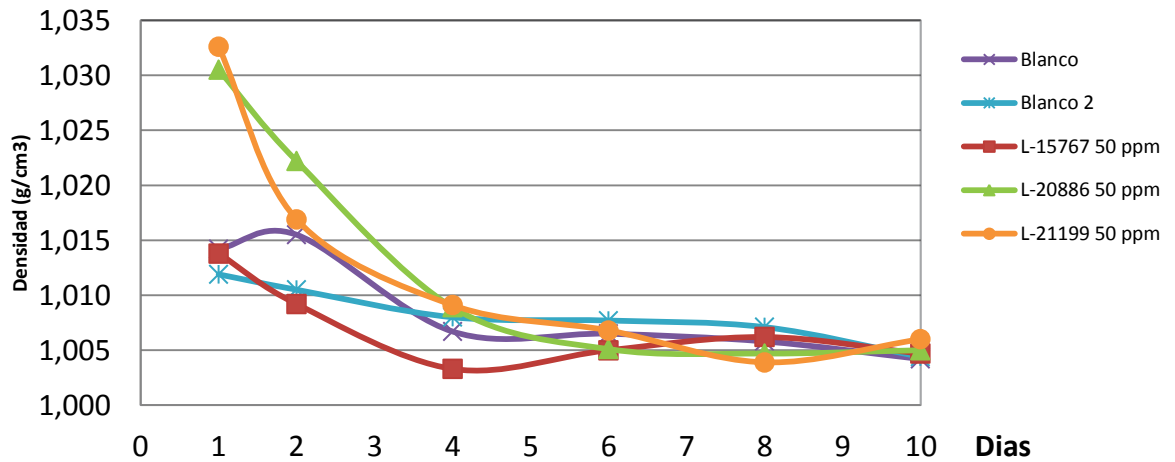


Figura 91: Densidad del mineral oxidado con surfactantes a 50 ppm.

Los resultados de tensión superficial en la Figura 92 dimensionan como el surfactante L-15767 a esta dosificación logra una mejora de 7% de extracción manteniendo un comportamiento simétrico a largo de la prueba a una tensión de 50 N/m. El surfactante L-21199 posee un comportamiento similar al obtenido utilizando la mitad de dosificación pero manteniendo en 5 N/m la tensión a lo largo de la prueba.

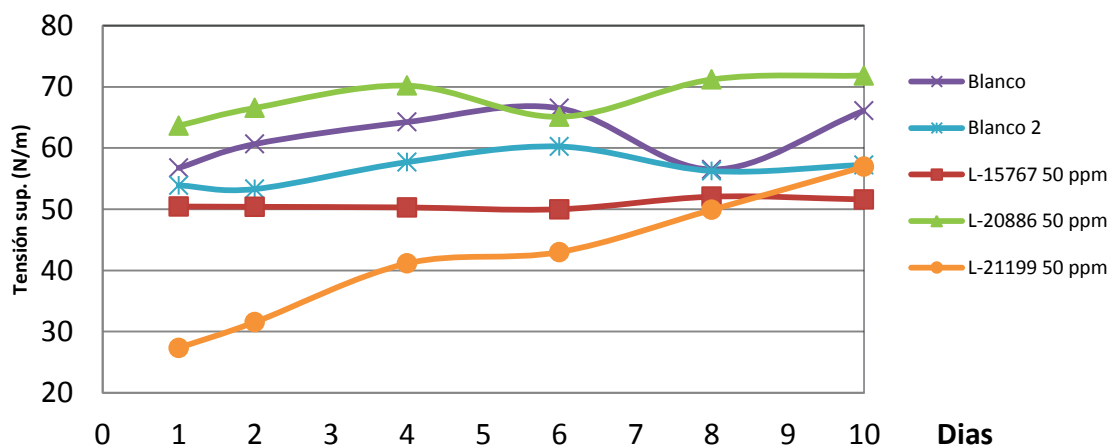


Figura 92: Tensión superficial del mineral oxidado con surfactantes a 50 ppm.

En el caso del surfactante L-20886 este presenta un comportamiento similar al obtenido anteriormente a 20 ppm de dosificación manteniéndose invariable a lo largo de la prueba.

El consumo de ácido presente a esta dosificación como se presenta en la Figura 93 identifica el mismo tipo de comportamiento obtenido anteriormente. La presencia de surfactantes en las pruebas disminuye el consumo de ácido durante los últimos días de riego. En el caso de la prueba L-15767 se mantiene por debajo de las demás pruebas hasta los últimos días de lixiviación donde se incrementa en forma lineal hasta llegar a 28,55 kg/t. De forma similar al máximo encontrado a una dosificación de 20 ppm, el surfactante L-21199 presenta un aumento en el consumo de ácido los últimos días de prueba para llegar al igual que las otras pruebas a un consumo de 35 kg/t.

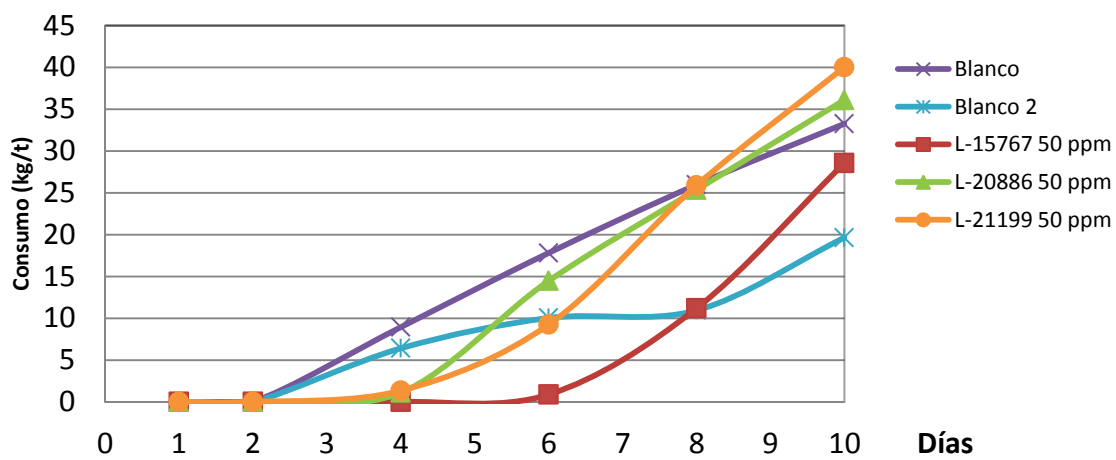


Figura 93: Consumo de ácido del mineral oxidado con surfactantes a 50 ppm.

5.6.2. Mineral mixto

En presencia de mineral mixto se puede observar como la densidad presente el surfactante L-15767 es considerablemente mayor los primeros días de lixiviación frente a las otras pruebas antes de disminuir y volver al rango presente en el resto de las pruebas.

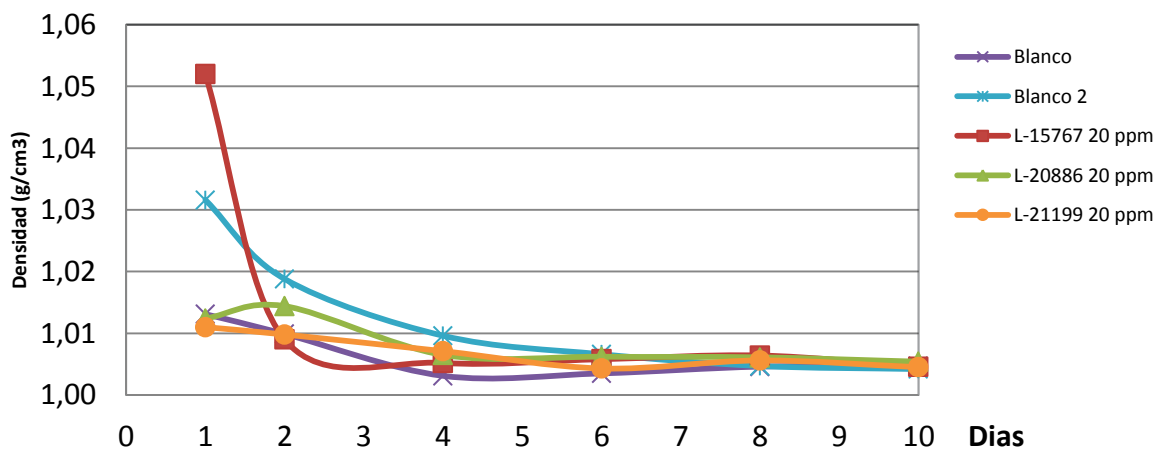


Figura 94: Densidad del mineral mixto con surfactantes a 20 ppm.

La Figura 94 también muestra como en presencia del surfactante L-21199 no existes variaciones considerables contrastando directamente con el surfactante L-15767, donde estas dos pruebas son las que poseen los mejores resultados de extracción bajo estas condiciones de surfactante y mineral.

El comportamiento de la tensión superficial presente a esta dosificación de surfactantes se ve afectado en diversas formas a lo largo de la prueba, como es el caso del surfactante L-21199 el cual aunque posee la tensión superficial más baja es el surfactante con peores resultados de extracción. El surfactante con los mejores resultados de extracción (L-15767) presenta uno de las tensiones más altas manteniéndose sobre los 70 N/m. Esta tensión superficial es superior en 5 N/m a lo logrado anteriormente con el mineral oxidado indicando directamente como las especies minerales presentes modifican el comportamiento del surfactante.

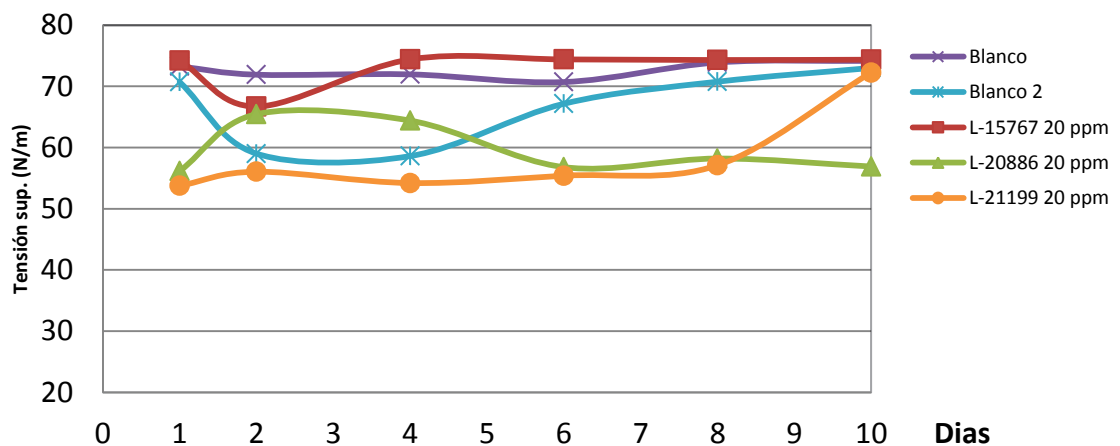


Figura 95: Tensión superficial del mineral mixto con surfactantes a 20 ppm.

Como se observa en la Figura 96 el consumo de ácido al utilizar mineral mixto depende directamente de si existe presencia o no de surfactante y en este caso del tipo utilizado. Existe un alto consumo de ácido para el surfactante L-20886 el cual se mantiene a lo largo de toda la prueba de lixiviación para

finalmente disminuir y terminar en el rango de las otras pruebas realizadas. Esta situación puede depender directamente de la cadena presente en este reactivo. El surfactante L-15767 presenta un consumo mucho menor al visto en las pruebas con mineral oxidado, acercándose al comportamiento observado en las pruebas sin surfactante.

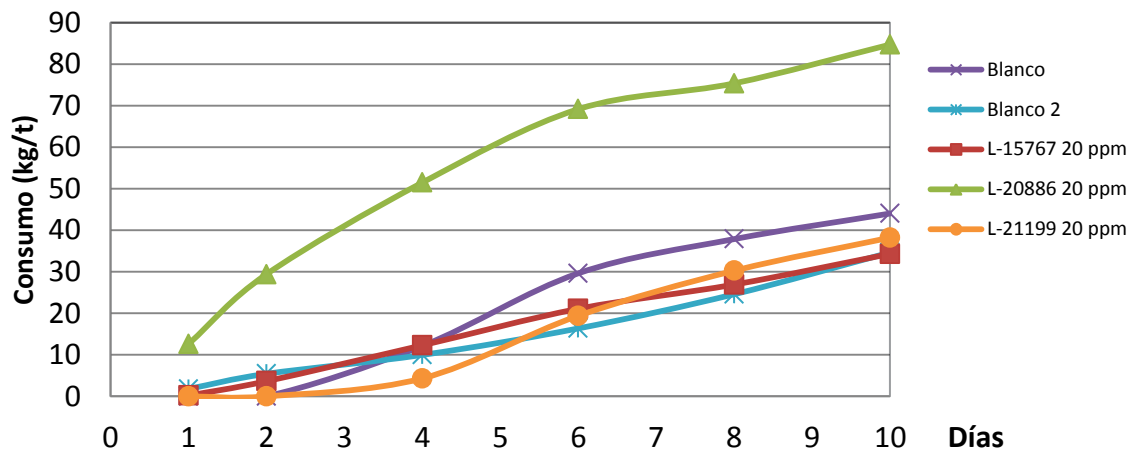


Figura 96: Consumo de ácido del mineral mixto con surfactantes a 20 ppm.

Al utilizar una dosificación mayor de surfactante la extracción de cobre depende del comportamiento que presente su densidad a medida que se realiza la lixiviación como se observa en la figura 97. El surfactante L-20886 que logro un 69% de extracción comienza con una densidad mayor al resto de las pruebas y que a lo largo de la lixiviación esta disminuye hasta llegar al rango presente en las demás. En presencia de L-21199 la densidad decrece hasta llegar a $1,003 \text{ g/cm}^3$.

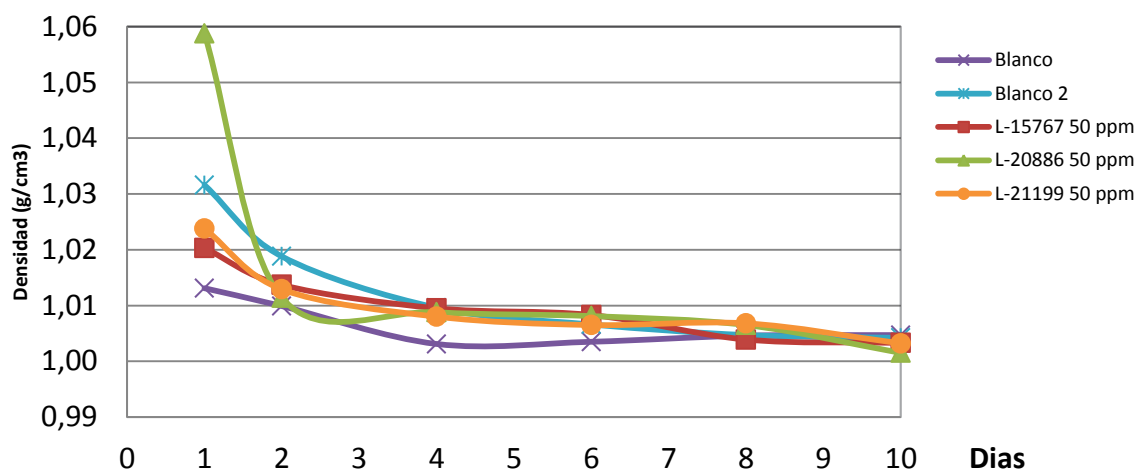


Figura 97: Densidad del mineral mixto con surfactantes a 50 ppm.

Por otro lado la Figura 98 muestra como el surfactante L-15767 aun con una dosificación al doble a la vista anteriormente logra disminuir la tensión superficial presente en la solución en casi 20 N/m pero no mejora los resultados de extracción (48,71%) obtenidos anteriormente en la prueba de 20 ppm (62,39%). Esto nos indica que utilizar dosificaciones muy altas de este surfactante, modifica drásticamente el rendimiento de extracción.

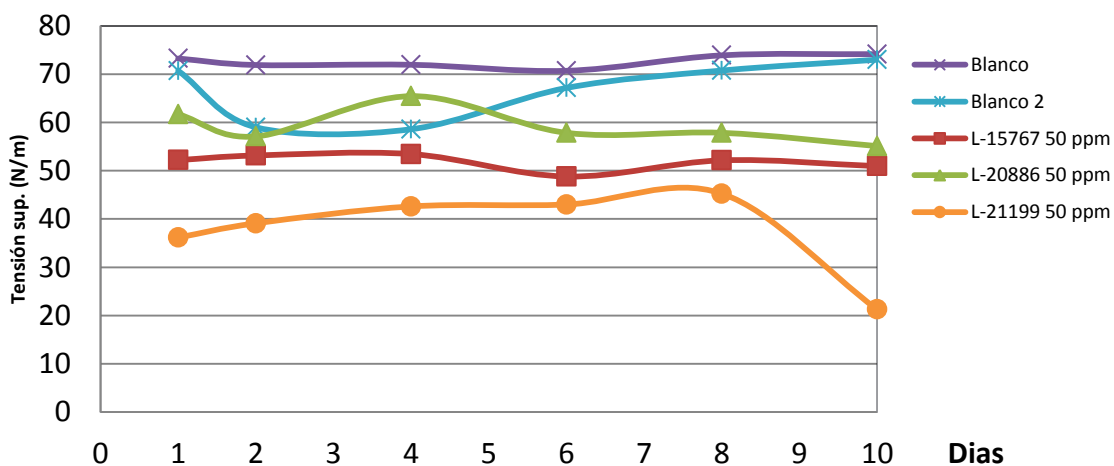


Figura 98: Tensión superficial del mineral mixto con surfactantes a 50 ppm.

Los surfactantes L-20886 y L-21199 poseen bajas tensiones superficiales a lo largo de las pruebas las que además se presentan sin grandes modificaciones. Sólo en presencia de L-21199 existe una disminución de tensión considerable en el último día de prueba llegando a los 21,25 N/m. Este valor presenta discordancia frente a lo observado en el resto de pruebas y análisis de variables por lo que no se considerara en estas discusiones. En presencia de L-21199 y produciendo una tensión superficial baja no logra superar la extracción del surfactante L-20886 de 69,46%.

El consumo de ácido como se observa en la Figura 99 muestra un incremento considerable desde el primer día de riego, especialmente en el caso de los surfactante L-20886 y L-2119 a diferencia de lo observado con el mineral oxidado. El que presenta las menores cantidades de consumo es el surfactante L-15767 el cual a partir del segundo día empieza a incrementarse hasta alcanzar un consumo similar al de la prueba con surfactante L-20886 llegando a los 54,8 kg/t.

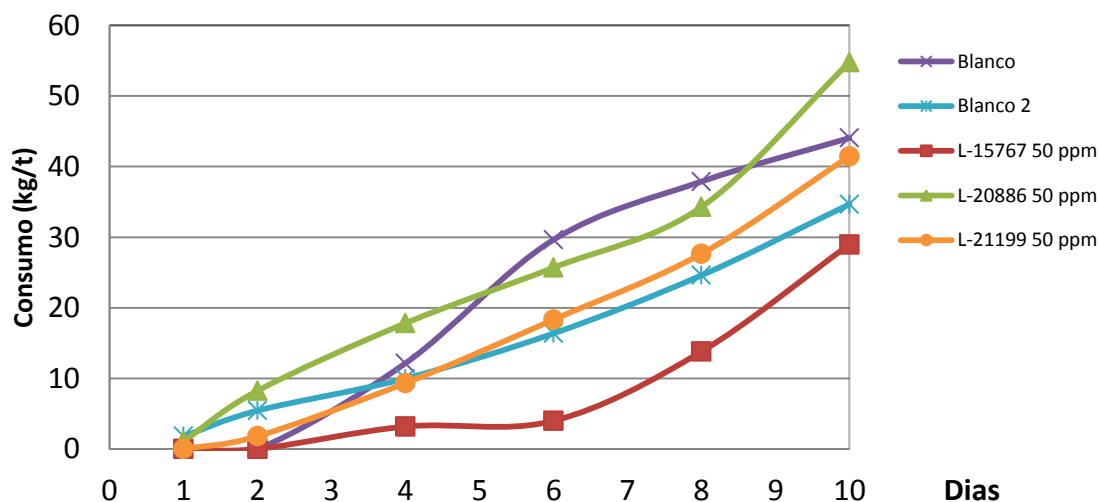


Figura 99: Consumo de ácido del mineral mixto con surfactantes a 50 ppm.

5.6.3. Mineral sulfurado de cobre

La utilización de los surfactantes con mineral sulfurado muestra interesantes incrementos en la extracción de cobre por lo que analizar sus variables nos puede entregar mayor información de los cambios producidos por cada agente fluorocarbonado.

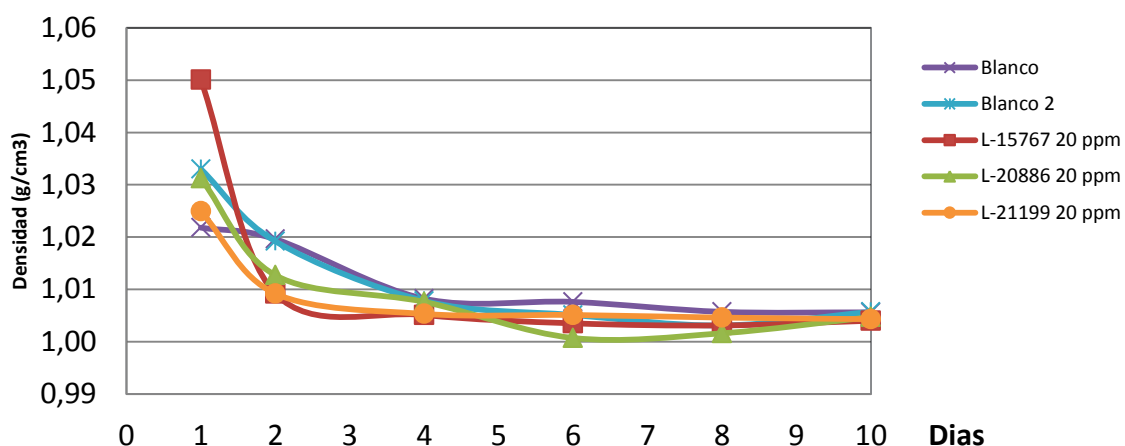


Figura 100: Densidad del mineral sulfurado con surfactantes a 20 ppm.

Como se observa en la Figura 100 existe una tendencia ya identificada anteriormente por los surfactantes que poseen las mejores extracciones y el comportamiento que presenta la densidad en cada una de ellas. El mejor resultado de extracción bajo estas condiciones fue en presencia del surfactante L-15767 el cual como se observa posee la mayor densidad al comenzar la prueba sobre $1,05 \text{ g/cm}^3$. Los otros dos surfactantes no logran incrementos en la extracción de cobre comparado con las pruebas de control. Estas pruebas poseen un comportamiento de densidad similar llegando a una densidad de cercana a $1,009 \text{ g/cm}^3$.

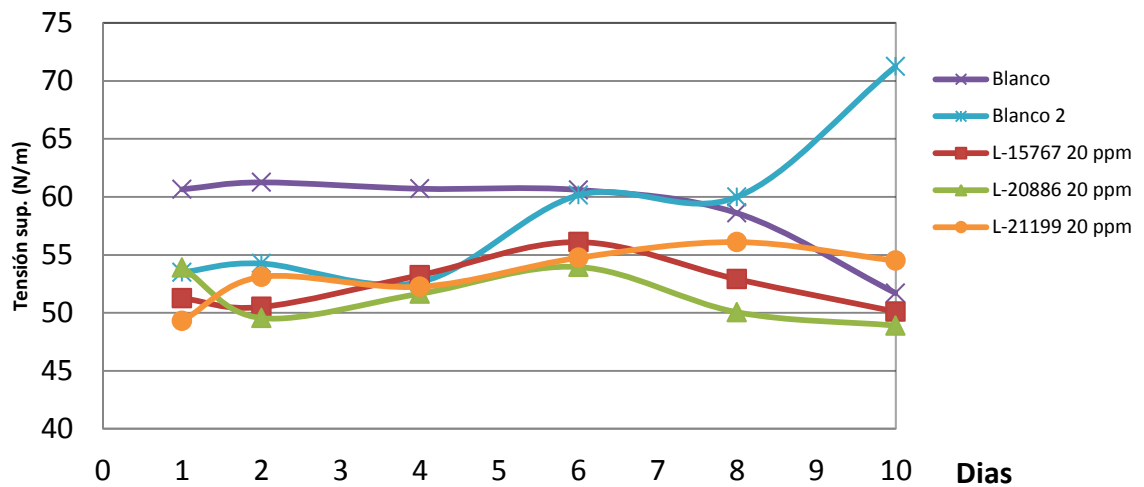


Figura 101: Tensión superficial del mineral sulfurado con surfactantes a 20 ppm.

Las tensiones superficiales presentes en las pruebas con mineral sulfurado se mantienen en un rango entre 50 y 55 N/m, considerablemente bajas a lo observado en presencia de un mineral oxidado. Los surfactantes fluorocarbonados logran crear un efecto disminuyendo la tensión pues como se observa las pruebas poseen un comportamiento diferente al estar con o sin presencia de reactivos.

La Figura 102 muestra casi un nulo consumo de ácido los primeros días de riego hasta llegar al cuarto día donde en el caso del surfactante L-20886 existe un incremento considerable llegando sobre los 40 kg/t. Esta situación no se justifica dado los resultados de extracción obtenidos con este surfactante y se puede asociar a la presencia de alguna ganga. En el caso del reactivo L-15767 este presenta un comportamiento similar de consumo al visto en las pruebas blanco y es menor al realizado en presencia del reactivo L-21199.

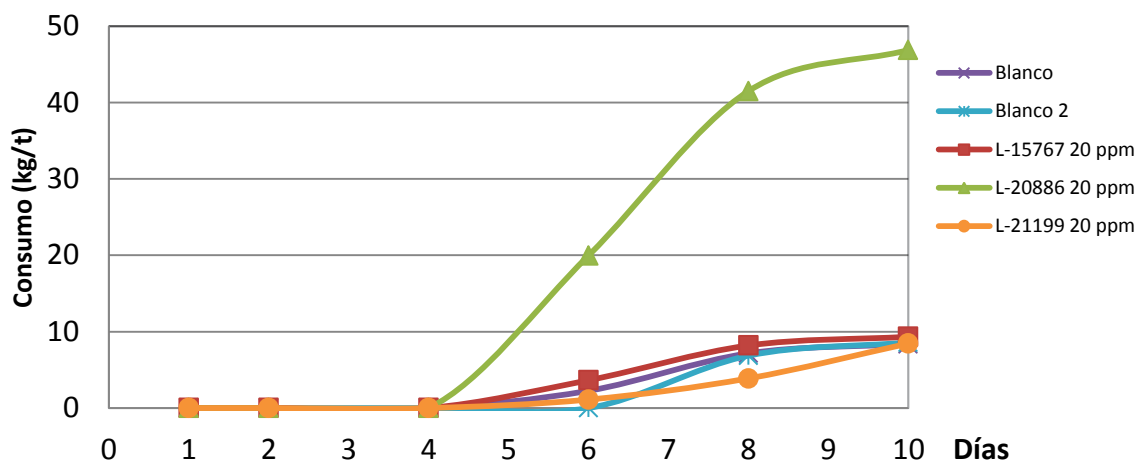


Figura 102: Consumo de ácido del mineral sulfurado con surfactantes a 20 ppm.

A dosificaciones de 50 ppm se observa un incremento en la extracción de cobre como fue el caso de los surfactantes L-20886 (36,71%) y L-21199 (34,56%). El primero de estos reactivos presenta una mayor densidad al comenzar la prueba y donde transcurre la primera fase de extracción frente al resto de las pruebas que poseen un comportamiento similar a lo largo del tiempo de riego.

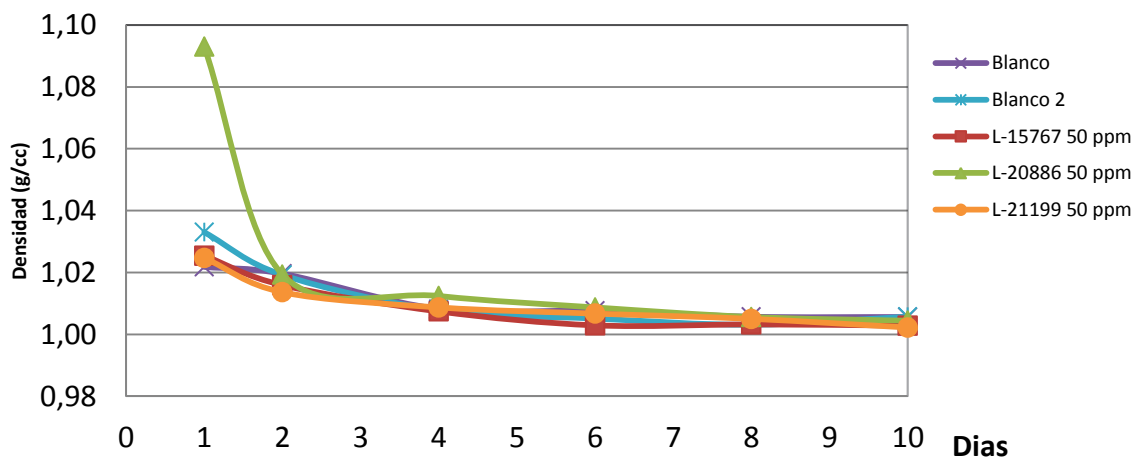


Figura 103: Densidad del mineral sulfurado con surfactantes a 50 ppm.

La tensión superficial presente muestra como para las pruebas con mejores resultados de extracción a esta dosificación existe una disminución en esta variable, donde el surfactante L-21199 nuevamente presenta un aumento a medida que avanza los días de prueba. En el caso del surfactante con mejores resultados (L-20886) este no presenta cambios de tensión significativos a los vistos en las pruebas blanco o el surfactante L-15767, considerando que entre estas pruebas existe un incremento de por lo menos 7%. Doblando la cantidad de dosificación de surfactante no existe un aumento importante de la tensión la cual se sigue manteniendo entre 50 y 55 N/m.

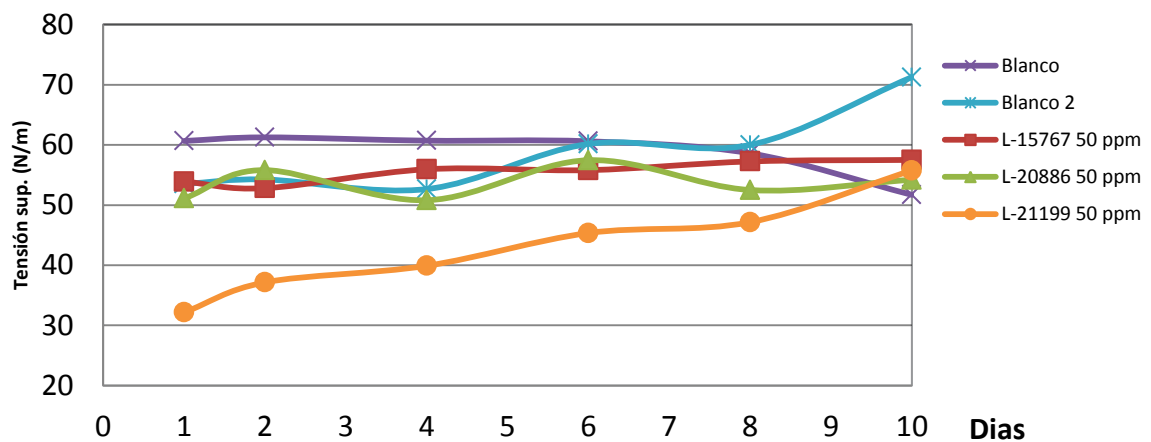


Figura 104: Tensión superficial del mineral sulfurado con surfactantes a 50 ppm.

El consumo de ácido en la Figura 105 se presenta de forma bastante irregular dependiendo de la presencia o no de un surfactante fluorocarbonado y directamente del tipo de surfactante. L-21199 es el que presenta el menor consumo llegando a un incremento considerable al finalizar la prueba llegando a 17,22 kg/t.

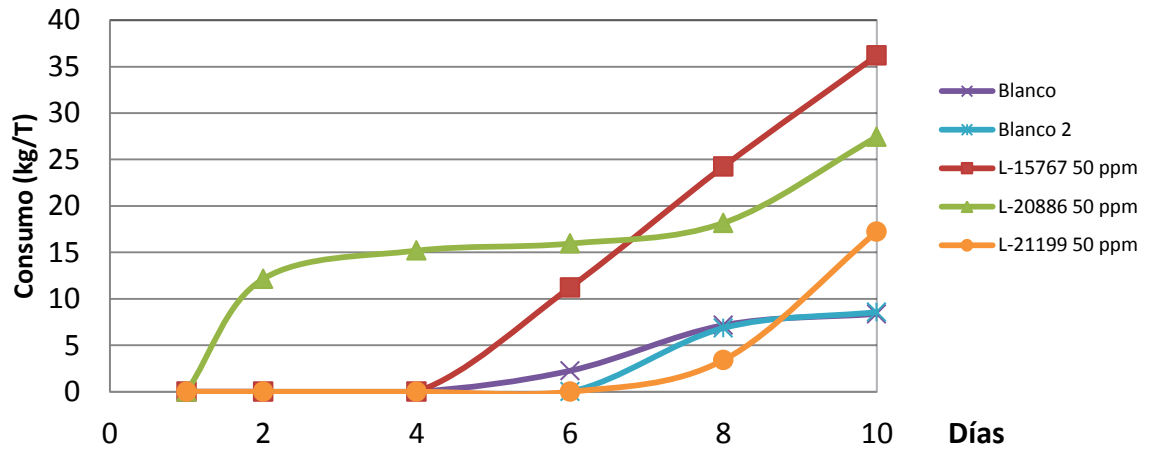


Figura 105: Consumo de ácido del mineral sulfurado con surfactantes a 50 ppm.

5.7. Viscosidad

La viscosidad impacta directamente en la mojabilidad entre la solución lixiviante y el mineral particulado. Su análisis puede entregar información importante sobre como la presencia de los surfactantes puede afectar el comportamiento de la etapa.

La identificación de la viscosidad se realiza para motivos de esta investigación a partir de las pruebas en presencia de mineral oxidado al ser bajo este tipo de especies minerales donde se lograron los mejores resultados y mayor diferencia en presencia de los surfactantes fluorocarbonados.

5.7.1. Mineral Oxidado de Cobre

En la Figura 106 se observa como en presencia del surfactante L-15767 la viscosidad de la solución se ve afectada a medida que se realiza la lixiviación

lo que produce una mejor mojabilidad en la partícula a lo largo de la prueba al reducir el ángulo de contacto. Si se analiza la curva de extracción en presencia de este surfactante no se ve afectada por este cambio en la viscosidad especialmente en la fase de pasivación donde se presenta un mínimo de 60 cP. Esta situación se presenta en ambas dosificaciones de surfactantes de 20 y 50 ppm, llegando a incluso al mismo valor al terminar la prueba de 70 cP.

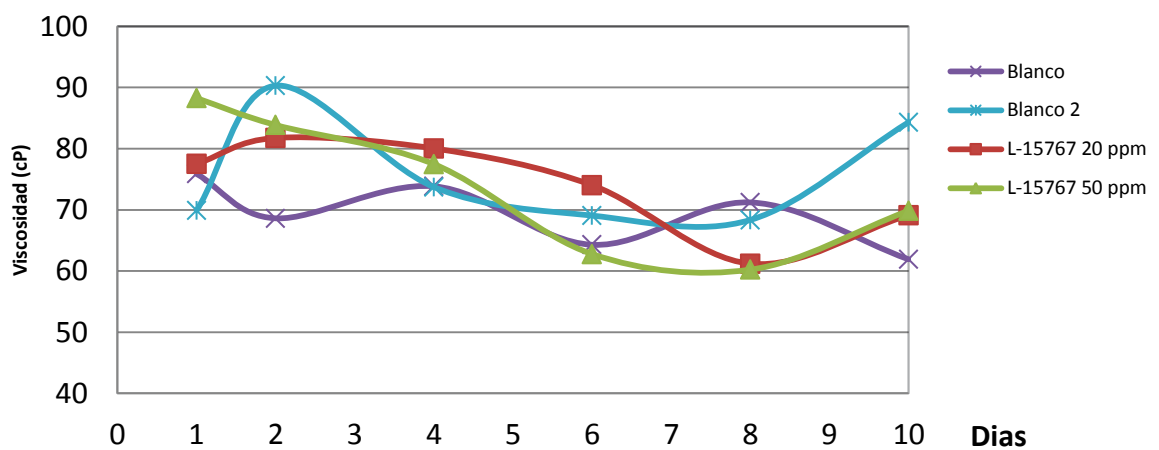


Figura 106: Viscosidad del mineral oxidado con surfactante L-15767.

El comportamiento del surfactante L-21199 en la Figura 107 muestra como al aumentar la dosificación presente aumenta la viscosidad de la solución llegando hasta 80 cP. Como ocurrió con el surfactante L-15767, existen diferencias al aumentar la dosificación presente lo que debería entregar cambios en la capacidad de deformación y posterior mojabilidad, sin embargo el comportamiento de ambas pruebas incluyendo a las blanco son similares. Comparando las extracciones de cobre obtenidas aumentar en 50 ppm entrega un aumento de extracción de nulo llegando ambos a un 64%.

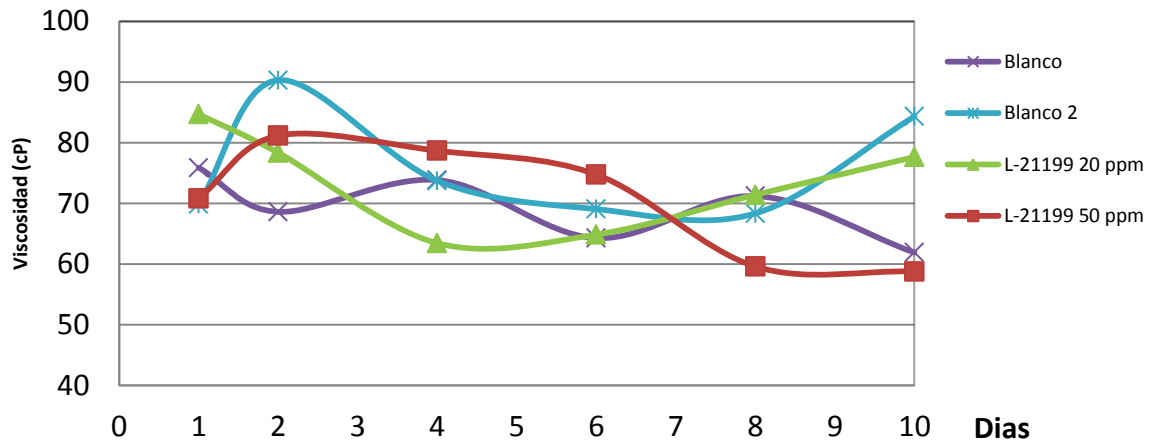


Figura 107: Viscosidad del mineral oxidado con surfactante L-21199.

La utilización del surfactante L-20886 a 50 ppm produce un aumento de 4,79% en la extracción de cobre lo que hace necesario un aumento de dosificación necesario bajo estas condiciones de lixiviación para lograr mejoras en la extracción. En la Figura 108 se muestra el comportamiento de las pruebas en presencia de este surfactante donde existe una variación importante de viscosidad donde el tener una baja viscosidad afecta los tiempos de contacto partícula- solución lo que podría traducirse en una menor recuperación de cobre.

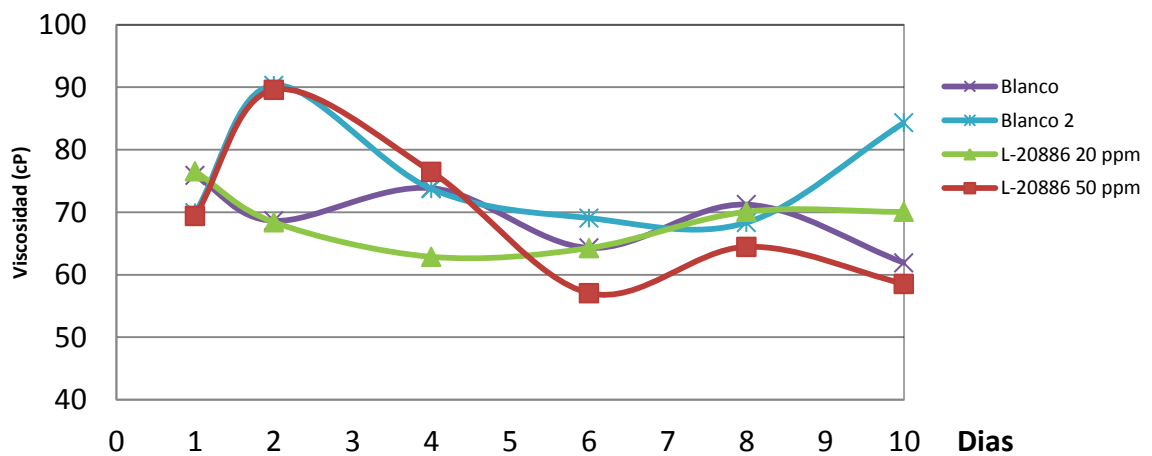


Figura 108: Viscosidad del mineral oxidado con surfactante L-20886.

Al comparar los diferentes surfactantes a una misma dosificación en la Figura 109 se observa como a una mayor viscosidad en el caso del surfactante L-15767 se produce una mejor extracción de mineral. No existe un comportamiento homogéneo en ninguna de las pruebas como es el caso del surfactante L-21199 el cual a medida que avanza el tiempo, disminuye considerablemente su viscosidad para luego aumentar a 77,64 cP.

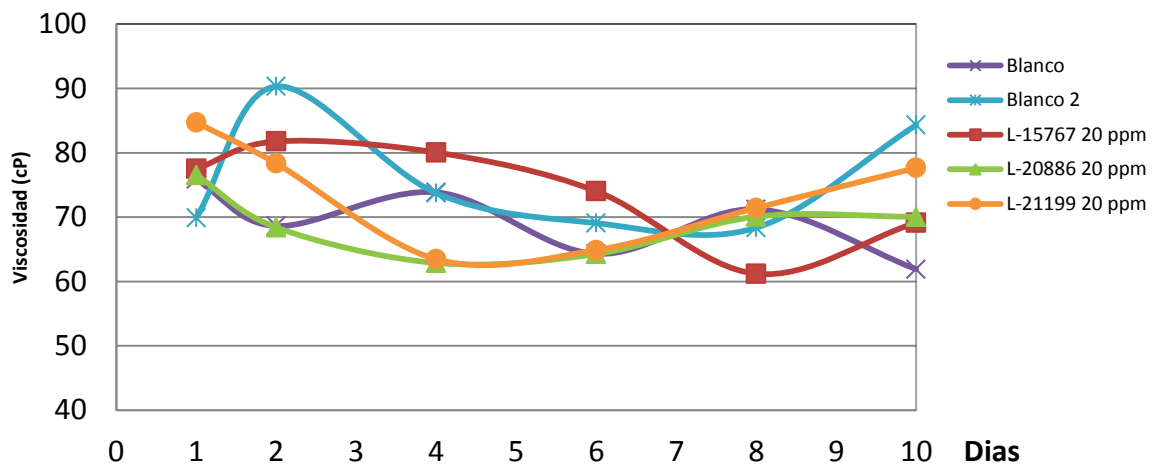


Figura 109: Viscosidad del mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Una situación similar ocurre al comparar los surfactantes a una dosificación de 50 ppm donde también con una viscosidad mayor el presencia de L-15767 se logran mejores resultados de extracción, especialmente los primeros días de riego.

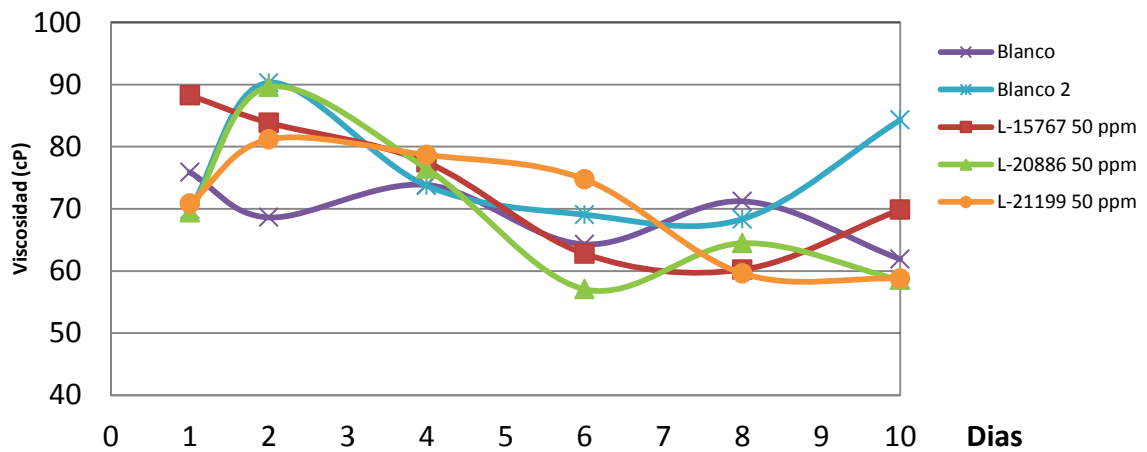


Figura 110: Viscosidad del mineral oxidado con surfactantes a 50 ppm.

5.8. Comparación surfactantes C-F/C-H

Para identificar de mejor manera el comportamiento que se obtiene al agregar un agente surfactante al proceso de lixiviación, se considera el realizar una prueba en presencia de un surfactante del tipo C-H. Estos agentes utilizados anteriormente en la industria minera están formados por un enlace del tipo hidrógeno-carbono. Algunos reactivos de este tipo fueron utilizados en yacimientos mineros importantes como el agente humectante DEARCODOX en Chuquicamata. Estos surfactantes logran incrementar la extracción de cobre lograda en una etapa de lixiviación pero se requieren altas dosificaciones de surfactante para obtener los resultados buscados.

5.8.1. Disolución de cobre en presencia de surfactante C-H

Como se observa en la Figura 111 se comparan los resultados del surfactante C-H utilizado con dosificación de 20 ppm frente a los resultados obtenidos anteriormente en presencia de los surfactante fluorocarbonados. La presencia de este surfactante C-H no produce cambios en la extracción incluso siendo menor que la registrada por las columnas sin surfactante.

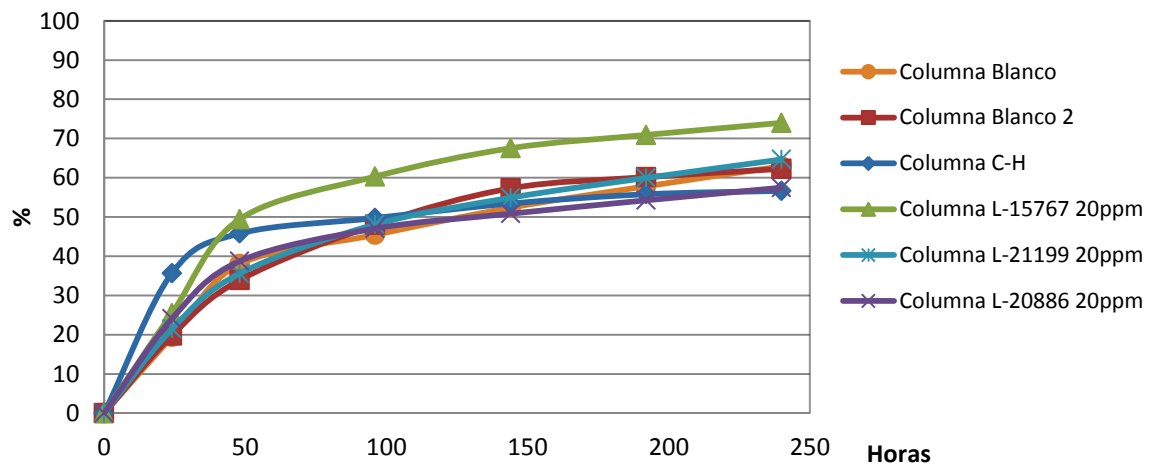


Figura 111: Disolución de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Al realizar un balance de masa del surfactante C-H y compararlo con los resultados de las pruebas con surfactante C-F se observa la misma tendencia anterior en la cual el surfactante hidrocarbónico no logra mejoras importantes en la extracción de cobre desde el mineral, llegando en el caso de la extracción a partir de sólidos sólo a un 59,02%.

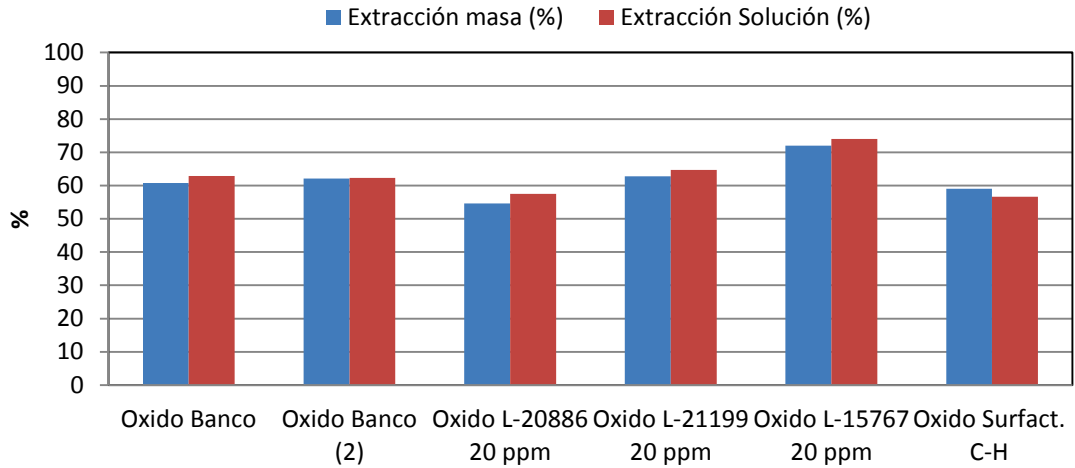


Figura 112: Extracción del mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

5.8.2. Densidad, tensión superficial y viscosidad

Al comparar la densidad del surfactante C-H frente a los tipos C-F, se observa como la densidad presente en la prueba varía considerablemente disminuyendo bruscamente al comenzar la prueba para luego aumentar. Como se había mencionado anteriormente los surfactantes fluorocarbonados que presentan una alta densidad al comenzar la prueba son los que logran los mejores resultados de extracción.

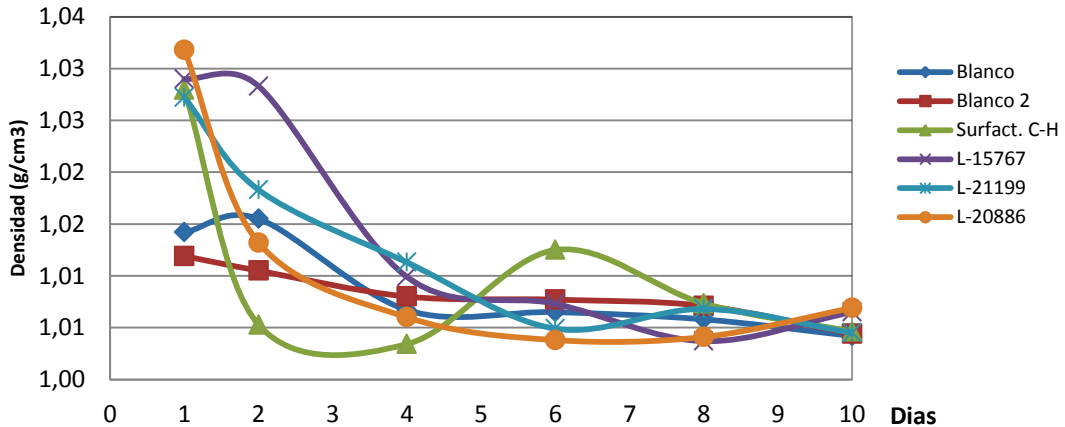


Figura 113: Densidad de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

La tensión superficial como se muestra en la Figura 114 en presencia del surfactante C-H se encuentra invariable a lo largo de la prueba manteniendo un comportamiento similar al observado en las pruebas blanco. Aunque existe una disminución en la tensión de la solución esta no afecta de forma importante los resultados de extracción.

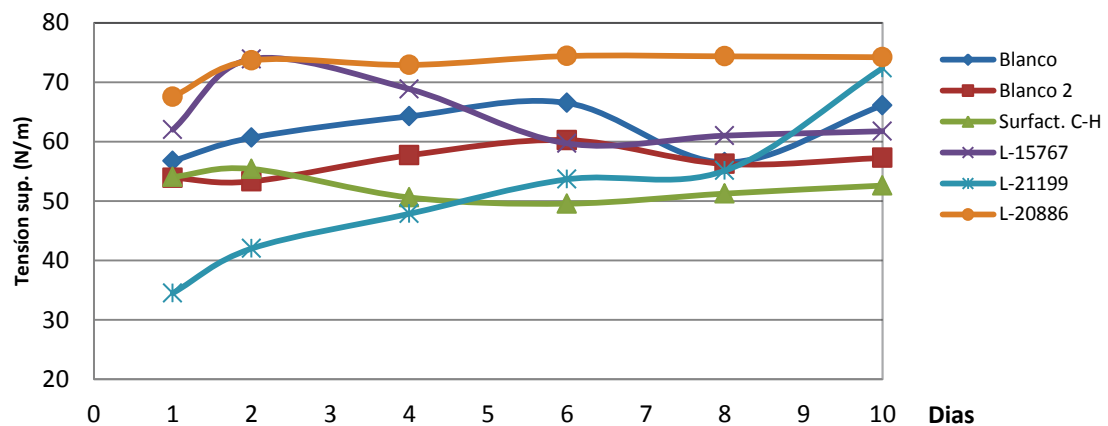


Figura 114: Tensión superficial de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Finalmente la viscosidad de la solución en presencia del surfactante C-H entrega una variación importante a lo largo de la prueba donde los primeros días de extracción (que son los más fuertes en términos de presencia de recuperación) posee una viscosidad extremadamente baja frente a los surfactantes C-F.

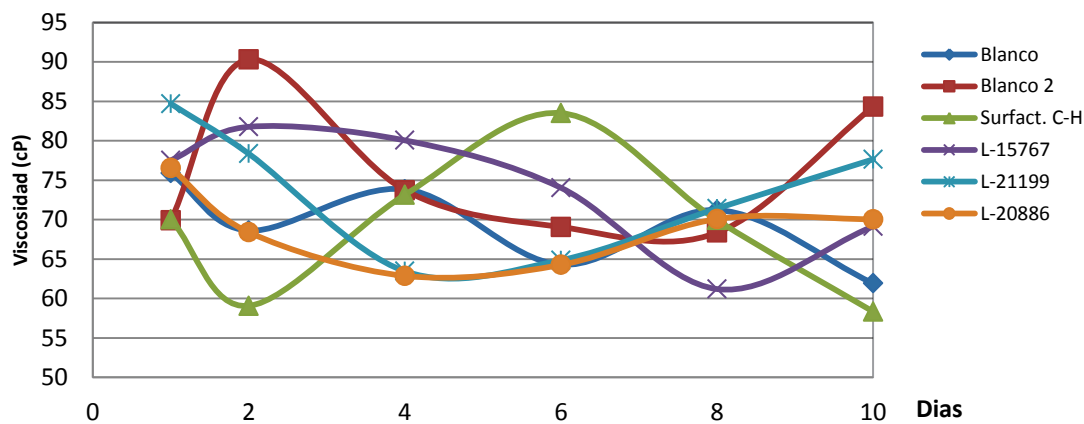


Figura 115: Viscosidad de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

5.9. Pruebas columnares con recirculación

Con el fin de complementar las pruebas anteriores se realizan pruebas de recirculación de solución lixiviante para observar como es el comportamiento de los surfactantes bajo estas condiciones de operación. Se utilizan las mismas variables de operación vistas en las pruebas columnares diferenciándose sólo en que cada 2 días de operación se realiza una recirculación de la solución lixiviante además de una toma de muestra. Para estas pruebas se considera además la utilización del surfactante C-H.



Figura 116: Pruebas de lixiviación en columnas con recirculación

5.9.1. Disolución de Columna con surfactante C-H

Como se observa en la Figura 117 las extracciones obtenidas bajo este tipo de operación son similares a las analizadas anteriormente con solución sin recirculación. El surfactante L-15767 es el que presenta los mejores resultados de recuperación llegando a un 74%. Existe una fase de extracción más lenta que la observada en las pruebas realizadas sin recirculación lo que se muestra en que la fase de pasivación se ve presente al entrar los últimos dos días de lixiviación. En el caso del surfactante C-H este presenta un aumento de 2% frente a la columna de control pero es bajo frente a los resultados obtenidos por los tres surfactantes fluorocarbonados.

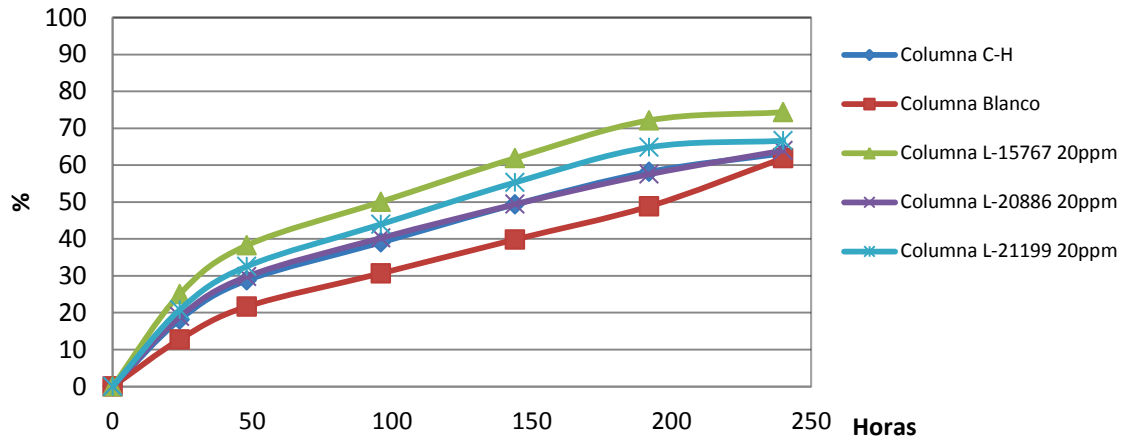


Figura 117: Disolución de pruebas de recirculación mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Al analizar los balances de masa de cada prueba en la Figura 118 existe una similitud entre los resultados obtenidos con la extracción por solución. El surfactante C-H presenta una mejor extracción llegando a un 66%, lo cual lo acerca a los resultados obtenidos con el surfactante L-21199 y también por la columna de control. Nuevamente el surfactante L-15767 es el que posee una mejora en la interacción partícula- solución bajo estas condiciones.

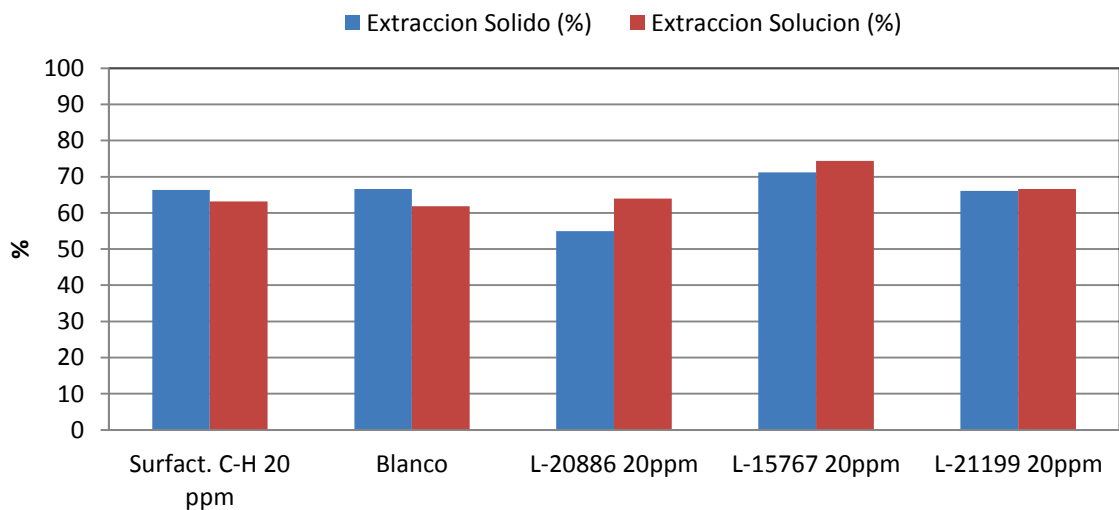


Figura 118: Extracción de pruebas de recirculación mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

A diferencia de lo observado en las pruebas sin recirculación se puede identificar de forma concreta la extracción de cobre producida en estas pruebas. El balance de mineral entrega la información adicional necesaria para asegurar que los valores de extracción obtenidos a partir de las soluciones es el correcto. Será importante analizar las variables operacionales de estas pruebas para identificar las diferencias entre el surfactante C-H y C-F.

5.9.2. Densidad, tensión superficial y viscosidad

La Figura 119 presenta las densidades presentes en cada prueba de lixiviación donde se observa como existe una tendencia a disminuir la densidad de la solución a medida que pasa el tiempo. Nuevamente un aumento en la densidad mejora las condiciones para la extracción de cobre tal como se observó en las pruebas anteriores sin recirculación. En presencia de surfactantes la densidad disminuye a medida que continúa el tiempo lo que también puede relacionarse con la acidez del medio el cual se ve disminuido a medida que la lixiviación avanza.

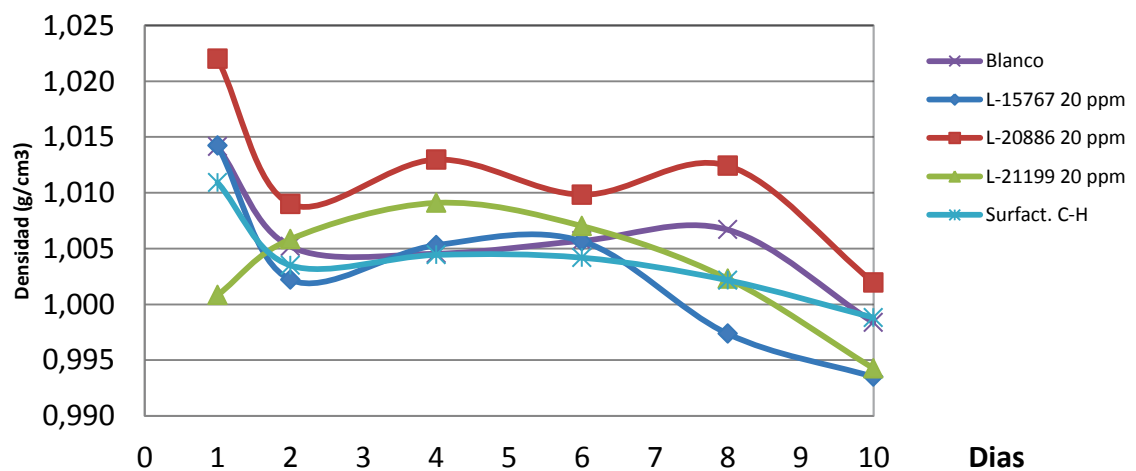


Figura 119: Densidad de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

Existe una tendencia a mantener la viscosidad como se presenta en la Figura 120 durante gran parte del tiempo de lixiviación. El surfactante C-H es el que presenta las mayores oscilaciones de viscosidad llegando desde 90 cP en un principio hasta el punto más bajo de 61,71 cP. En el caso del surfactante L-15767 este posee un comportamiento similar al surfactante C-H.

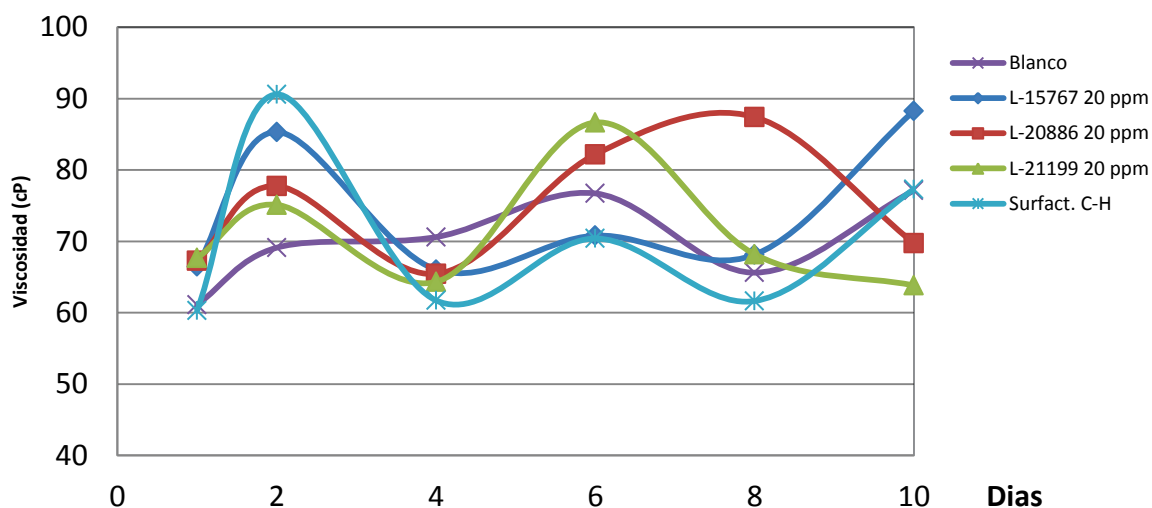


Figura 120: Viscosidad de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

La tensión superficial como se muestra en la Figura 121 muestra cómo el surfactante C-H mantiene la tensión más alta del grupo de pruebas sobrepasando los 70 N/m. En el caso de los surfactantes C-F estos presentan el comportamiento similar al observado anteriormente en las primeras pruebas en columna, donde en el caso del surfactante L-21199 su tensión se comporta en forma creciente hasta finalizar la prueba en 58,1 N/m. El rango de las tensiones en cada prueba se mantiene entre 55 N/m y 65 N/m que es el rango utilizado anteriormente en las pruebas de lixiviación sin recirculación.

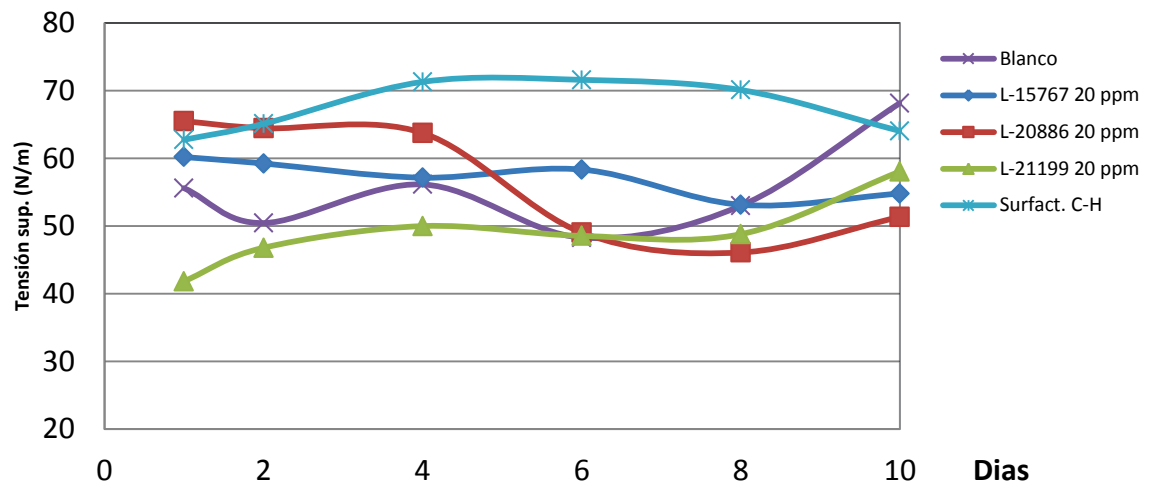


Figura 121: Tensión superficial de mineral oxidado con surfactantes a 20 ppm.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones generales

- Los surfactantes fluorocarbonados incrementan la extracción de cobre desde un mineral desde un 2% para minerales sulfurados hasta un 10% para minerales oxidados de cobre.
- La adición de estos agentes surfactantes en la etapa de aglomeración genera mayor estabilidad en los glómeros aumentando la adhesión de las partículas finas en el sistema.
- A dosificaciones de 20 ppm los surfactantes fluorocarbonados generan incrementos en la recuperación de cobre que no logran los surfactantes hidrocarbonados y otros agentes aglomerantes como el estuco.

6.2. Mineral Oxidado de Cobre

- En presencia del surfactante L-15767 a una dosificación de 20 ppm la extracción de cobre con minerales oxidados se incrementa en 10%. A dosificaciones de surfactante C-F a 50 ppm se aumenta la extracción de cobre sólo en 7%.
- Al trabajar con potenciales bajo 535 mV y un pH cercano a 1,4 se presentan las mejores condiciones de lixiviación para minerales oxidados de cobre en presencia de surfactantes fluorocarbonados.

- A dosificaciones de surfactante de 20 ppm en mineral oxidado la tensión superficial depende directamente del surfactante.
- El consumo de ácido disminuye en presencia de surfactantes a 20 ppm. Existe un aumento de este consumo a medida que aumenta el tiempo de lixiviación. A dosificaciones de 50 ppm se observa el mismo comportamiento.
- La presencia del surfactante C-H en minerales oxidados no produce cambios en la extracción a dosificaciones de 20 o 50 ppm tanto en pruebas con y sin recirculación siendo en algunos casos menores a la registrada por las columnas sin surfactante.
- La densidad en presencia del surfactante C-H varía considerablemente a lo largo de la prueba a diferencia de los surfactantes C-F que mantienen una alta densidad como se observa en las pruebas que logran los mejores resultados de extracción.
- Al utilizar minerales oxidados el surfactante C-H presenta una variación similar de tensión superficial a la observada en los surfactantes C-F por lo que la mojabilidad producida en la partícula mineral es la misma.
- Una mayor viscosidad de los diferentes surfactantes fluorocarbonados produce una mejor extracción desde el mineral oxidado. No existe un comportamiento homogéneo de esta variable en ninguna de las pruebas.

6.3. Mineral Mixto de Cobre

- El surfactante L-15767 presenta los mejores resultados de extracción en minerales mixtos de cobre. Una concentración de 50 ppm no involucra cambios en los resultados independiente del surfactante utilizado.
- En presencia de mineral mixto utilizando un potencial de 520 mV y pH 1,4 se generan los mejores resultados de extracción de cobre.
- El consumo de ácido al lixiviar este tipo de mineral depende directamente de la presencia o no de surfactante y del tipo utilizado. Existe un alto consumo de ácido en presencia de estos aditivos a medida que la prueba continúa.
- Los surfactantes generan un incremento en la densidad lo que favorece la lixiviación de cobre como se observa en presencia del surfactante L-15767.
- En minerales mixtos el consumo de ácido es irregular al aumentar la dosificación del agente fluorocarbonado dependiendo directamente del tipo de surfactante utilizado.

6.4. Mineral Sulfurado de Cobre

- En presencia del surfactante L-21199 se logran los mejores resultados de lixiviación para mineral sulfurado incrementando las extracciones de cobre en un 8%.

- Las mejores condiciones para la extracción de cobre desde mineral sulfurado es con un potencial de 560 mV y pH 1,0.
- El surfactante L-15767 no es una opción adecuada para la extracción de cobre en este tipo de mineral a diferencia de lo observado en un mineral oxidado de cobre.
- Los minerales sulfurados presentan sus mayores disoluciones en granulometrías de menor tamaño en donde se encuentra la mayor ley de ley de cobre disponible.
- Las tensiones superficiales en las pruebas con mineral sulfurado a 20 y 50 ppm se mantienen en un rango entre 50 y 55 N/m. La presencia de los surfactantes mantiene una tensión superficial elevada.
- Con minerales sulfurados los surfactantes no presentan consumos de ácido los primeros días de riego. Al avanzar la lixiviación se genera una oxidación en la superficie mineral provocando un incremento en el consumo que llega a 46,87 kg/t para el surfactante L-20886 a 20 ppm. Para dosificaciones de 50 ppm el consumo de ácido de este surfactante junto a L-15767 llegan a 36,19 kg/t.

7. RECOMENDACIONES

- Efectuar pruebas de recirculación en presencia de minerales mixtos y sulfurados para completar el análisis de comparación entre ambos tipos de operación.
- Medir viscosidad a minerales mixtos y sulfurados para identificar el comportamiento de esta variable en estas pruebas.
- Realizar columnas de lixiviación de minerales sulfurados de cobre a dosificaciones mayores de surfactante para analizar su efecto en la extracción de cobre.
- Analizar mediante SEM/EDS muestras cabeza y ripio con el objetivo de tener más información sobre el comportamiento de la solución al estar en contacto con los diferentes tipos de mineral.
- Desarrollar un análisis estadístico de las variables encontradas.

8. BIBLIOGRAFIA

- ADAMSON A. W, GAST A. P., 1997. Physical Chemistry of Surfaces, 6th Edition. Editorial John Wiley.
- CASTELLAN G., 1992. Fisicoquímica. Ed. Mc Graw Hill. 6ta Edición.
- CHAMBERLIN P.D., 1986. Agglomeration: cheap insurance for good recovery when heap leaching gold and silver ores. *Minning Engineering* 38 (12), 1105–1109.
- CONTEL M., 2005. Fluorocarbon Soluble Copper(II) Carboxylate Complexes with Nonfluoroponytailed Nitrogen Ligands as Precatalysts Modes: Structural and Mechanistic Aspects. Departamento de Química Inorgánica and Departamento de Física de la Materia Condensada, Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza - España.
- DOMIC E.M., 2001. Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones, 1ª Edición. Chile.
- GREEN V.S., STOTT D.E., 2001. Polyacrylamide: a review of the use, effectiveness, and cost of a soil erosion control amendment. In: Stott, D.E., Mohtar, R., Steinhardt, G. (Eds.), *The Global Farm — Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization meeting*. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, May 24–29, 1999. Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

- GREEN V.S., STOTT D.E., NORTON L.D., GRAVEEL J.G., 2000. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1786–1791.
- KODALI P., 2010. Pretreatment of Copper Ore Prior to Heap Leaching. Master's Thesis, Department of Metallurgical Engineering, University of Utah.
- LEWANDOWSKI K.A., KAWATRA S.K., 2009. Polyacrylamide as an agglomeration additive for copper heap leaching. *International Journal of Mineral Processing* 91, 88–93.
- LEWANDOWSKI K.A., KAWATRA S.K., 2009. Binders for heap leaching agglomeration. *Minerals & Metallurgical Processing* 26 (1), 1–24.
- LEWANDOWSKI K.A., EISELE, T.C., KAWATRA, S.K., 2010. Agglomeration for copper heap leaching. In: XXV International Mineral Processing Congress (IMPC) 2010 Proceedings, Brisbane, QLD, Australia, pp. 183–192.
- MASOOD A, STORR T., 2007. Synthesis, characterization and copper chemistry of a non- symmetric phenanthroline ligand. Laboratory of Proteomics and Analytical Technologies, SAIC- Frederick Inc. United States.
- MICHAELS A.S., 1954. Aggregation of suspensions by polyelectrolytes. *Ind.Eng.Chem.* 46 (7), 1485–1490.

- MILLER J.D., LIN C.L., KODALI P., XUMING W., 2009. Methods for Agglomerating Ores. US Provisional Patent.
- MOKONE T.P., LEWIS A.E., VAN HILLE R.P., 2012. Effect Of Post-precipitation Conditions On Surface Properties Of Colloidal Metal Sulphide Precipitates, Centre for Bioprocess Engineering Research, Department of Chemical Engineering, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.
- MUKERJEE P., CARDINAL J.R., DESAI N.R., 1977. Micellization, Solubilization, and Microemulsions. K. Mittal Ed., Plenum Press, pp. 1-241.
- NASSER M.S., JAMES A.E., 2006. The effect of polyacrylamide charge density and molecular weight on the flocculation and sedimentation behaviour of kaolinite suspensions. Sep. Purif. Technol. 52, 241–252.
- NOWAK P., 2009. Influence of surfactant adsorption on the leaching of copper sulfides. Institute of Catalysis and Surface Chemistry. Polish Academy of Sciences. Poland.
- OLAVE X.G, PAVEZ E.A., 1998. Fluorsurfactantes para la Hidrometalurgia del Cobre y Oro, 3M Chile.
- SANCHEZ M.A., VERGARA F, CASTRO S.H., 1998. Environment & innovation in mining and mineral technology. University of Concepcion - Chile.

- SCHULTZE L.E., SANDOVAL S.P., BUSH R.P., 1995. Effect of Additives on Chalcopyrite Leaching. United States Bureau of mines.
- SIERAKOWSKI M.J., 1993. Acid Leaching of Copper Ore Heap With Fluoroaliphatic Surfactant, Minnesota Mining and Manufacturing Company, St. Paul, Minn.
- SMITH M.E., 2002. Problemas potenciales de lixiviación, Mining Magazine. Vector Engineering, Inc.
- VELARDE G., 2005. Agglomeration control for heap leaching processes. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review 26, 219–231.
- VEST M, LÜTZERATH A., 2009. Improvements in copper heap leaching by use of wetting agents. IME Process Metallurgy and metal recycling. RWTH Aachen University, Germany.
- WADDELL J.E, SIERAKOWSKI M.J., 1998. Leaching of precious metal ore with fluoroaliphatic surfactant. Minnesota Mining and Manufacturing Company. Minnesota
- YANNAPOLOUS J.C., 1991. Extractive Metallurgy of Gold, pp.115-117 & 127.
- ZHOU Y., FRANKS G.V., 2006. Flocculation mechanism induced by cationic polymers investigated by light scattering. Langmuir 22, 6775–6786.

ANEXO A

**Tablas de análisis granulométricos ripios pruebas
de lixiviación en columnas y pruebas ISO-pH**

Anexo A.1: Análisis granulométricos ripios pruebas ISO-pH

Tabla 38: Análisis granulométricos mineral oxido

| Óxido Blanco | |
|--------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 13,9 |
| 1/2" | 79,7 |
| 3/8" | 71,2 |
| 1/4" | 71,7 |
| 10 | 120,1 |
| 20 | 32,1 |
| -20 | 56,6 |
| | 445,3 |

| Óxido L-15767 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 21,9 |
| 1/2" | 70,2 |
| 3/8" | 66,2 |
| 1/4" | 60,2 |
| 10 | 111,5 |
| 20 | 31,4 |
| -20 | 89,7 |
| | 451,1 |

| Óxido L-15767 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 19,0 |
| 1/2" | 46,5 |
| 3/8" | 77,1 |
| 1/4" | 59,0 |
| 10 | 117,6 |
| 20 | 48,7 |
| -20 | 102,6 |
| | 470,5 |

| Óxido L-20886 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 8,2 |
| 1/2" | 69,3 |
| 3/8" | 83,3 |
| 1/4" | 59,6 |
| 10 | 122,8 |
| 20 | 40,2 |
| -20 | 92,7 |
| | 476,1 |

| Óxido L-20886 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 10,9 |
| 1/2" | 68,5 |
| 3/8" | 75,4 |
| 1/4" | 69,5 |
| 10 | 116,2 |
| 20 | 35,8 |
| -20 | 66,9 |
| | 443,2 |

| Óxido L-21199 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 8,6 |
| 1/2" | 80,3 |
| 3/8" | 77,8 |
| 1/4" | 81,8 |
| 10 | 127,8 |
| 20 | 26,1 |
| -20 | 47,8 |
| | 450,2 |

| Óxido L-21199 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 5,6 |
| 1/2" | 58,6 |
| 3/8" | 80,5 |
| 1/4" | 98,1 |
| 10 | 128,5 |
| 20 | 23,0 |
| -20 | 58,3 |
| | 452,6 |

Tabla 39: Análisis granulométricos mineral mixto

| Mixto Blanco | |
|--------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 0,0 |
| 1/2" | 59,6 |
| 3/8" | 46,2 |
| 1/4" | 54,3 |
| 10 | 110,0 |
| 20 | 78,5 |
| -20 | 127,0 |
| | 475,6 |

| Mixto L-20886 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 0,0 |
| 1/2" | 63,0 |
| 3/8" | 52,8 |
| 1/4" | 54,3 |
| 10 | 114,5 |
| 20 | 32,4 |
| -20 | 27,2 |
| | 344,2 |

| Mixto L-20886 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 99,0 |
| 1/2" | 46,2 |
| 3/8" | 72,6 |
| 1/4" | 57,3 |
| 10 | 105,9 |
| 20 | 63,5 |
| -20 | 125,2 |
| | 569,7 |

| Mixto L-15767 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 0,0 |
| 1/2" | 95,7 |
| 3/8" | 40,6 |
| 1/4" | 57,9 |
| 10 | 109,6 |
| 20 | 27,2 |
| -20 | 24,4 |
| | 355,4 |

| Mixto L-15767 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 59,5 |
| 1/2" | 68,6 |
| 3/8" | 42,5 |
| 1/4" | 53,1 |
| 10 | 96,4 |
| 20 | 41,9 |
| -20 | 110,3 |
| | 472,3 |

| Mixto L-21199 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 15,0 |
| 1/2" | 96,4 |
| 3/8" | 47,2 |
| 1/4" | 61,7 |
| 10 | 99,9 |
| 20 | 40,2 |
| -20 | 62,4 |
| | 422,8 |

| Mixto L-21199 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 8,0 |
| 1/2" | 56,8 |
| 3/8" | 59,6 |
| 1/4" | 48,7 |
| 10 | 114,1 |
| 20 | 40,2 |
| -20 | 79,0 |
| | 406,4 |

Tabla 40: Análisis granulométricos mineral sulfuro

| Sulfuro Blanco | |
|----------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 40,5 |
| 1/2" | 45,8 |
| 3/8" | 37,4 |
| 1/4" | 34,4 |
| 10 | 95,1 |
| 20 | 61,3 |
| -20 | 115,7 |
| | 430,2 |

| Sulfuro L-21199 20 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 11,1 |
| 1/2" | 125,4 |
| 3/8" | 61,4 |
| 1/4" | 45,3 |
| 10 | 97,3 |
| 20 | 39,2 |
| -20 | 87,1 |
| | 466,8 |

| Sulfuro L-21199 50 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 0,0 |
| 1/2" | 116,3 |
| 3/8" | 69,6 |
| 1/4" | 53,1 |
| 10 | 130,4 |
| 20 | 42,9 |
| -20 | 53,6 |
| | 465,9 |

| Sulfuro L-15767 20 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 59,8 |
| 1/2" | 76,0 |
| 3/8" | 59,2 |
| 1/4" | 43,6 |
| 10 | 109,1 |
| 20 | 40,6 |
| -20 | 99,7 |
| | 488 |

| Sulfuro L-15767 50 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 53,1 |
| 1/2" | 78,1 |
| 3/8" | 57,4 |
| 1/4" | 63,4 |
| 10 | 122,4 |
| 20 | 39,2 |
| -20 | 76,4 |
| | 490 |

| Sulfuro L-20886 20 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 27,1 |
| 1/2" | 52,6 |
| 3/8" | 60,5 |
| 1/4" | 70,6 |
| 10 | 141,1 |
| 20 | 51,8 |
| -20 | 85,3 |
| | 489 |

| Sulfuro L-20886 50 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 11,5 |
| 1/2" | 72,5 |
| 3/8" | 62,1 |
| 1/4" | 56,2 |
| 10 | 142,3 |
| 20 | 53,8 |
| -20 | 88,4 |
| | 486,8 |

Anexo A.2: Análisis granulométricos ripios pruebas columnas unitarias

Tabla 41: Análisis granulométricos mineral oxido

| Óxido Blanco | |
|--------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 122,8 |
| 1/2" | 926,7 |
| 3/8" | 635,5 |
| 1/4" | 604,7 |
| 10 | 912,2 |
| 20 | 171,0 |
| -20 | 364,2 |
| | 3737,2 |

| Óxido Blanco 2 | |
|----------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 76,3 |
| 1/2" | 463,3 |
| 3/8" | 502,6 |
| 1/4" | 609,2 |
| 10 | 1308,0 |
| 20 | 366,2 |
| -20 | 514,0 |
| | 3839,6 |

| Oxido L-20886 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 26,0 |
| 1/2" | 552,6 |
| 3/8" | 567,5 |
| 1/4" | 658,3 |
| 10 | 1216,7 |
| 20 | 289,5 |
| -20 | 408,5 |
| | 3719,2 |

| Oxido L-20886 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 16,3 |
| 1/2" | 441,1 |
| 3/8" | 503,4 |
| 1/4" | 488,8 |
| 10 | 1123,8 |
| 20 | 429,9 |
| -20 | 694,3 |
| | 3697,7 |

| Oxido L-15767 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 51,4 |
| 1/2" | 622,2 |
| 3/8" | 562,5 |
| 1/4" | 610,0 |
| 10 | 1021,7 |
| 20 | 284,1 |
| -20 | 399,5 |
| | 3551,4 |

| Oxido L-15767 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 60,6 |
| 1/2" | 769,9 |
| 3/8" | 738,1 |
| 1/4" | 631,3 |
| 10 | 1040,8 |
| 20 | 247,4 |
| -20 | 382,7 |
| | 3870,8 |

| Oxido L-21199 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 51,2 |
| 1/2" | 828,9 |
| 3/8" | 692,7 |
| 1/4" | 598,9 |
| 10 | 934,5 |
| 20 | 196,6 |
| -20 | 357,1 |
| | 3659,9 |

| Oxido L-21199 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 26,1 |
| 1/2" | 582,9 |
| 3/8" | 418,8 |
| 1/4" | 488,0 |
| 10 | 1210,1 |
| 20 | 369,1 |
| -20 | 573,0 |
| | 3668,1 |

| Surfact. C-H 20 ppm | |
|---------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 43,7 |
| 1/2" | 627,6 |
| 3/8" | 649,9 |
| 1/4" | 670,9 |
| 10 | 992,9 |
| 20 | 289,3 |
| -20 | 505,2 |
| | 3779,5 |

Tabla 42: Análisis granulométricos mineral mixto

| Mixto Blanco | |
|--------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 57,6 |
| 1/2" | 613,9 |
| 3/8" | 426,1 |
| 1/4" | 546,8 |
| 10 | 1117,9 |
| 20 | 384,5 |
| -20 | 772,6 |
| | 3919,6 |

| Mixto Blanco 2 | |
|----------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 73,3 |
| 1/2" | 506,7 |
| 3/8" | 540,0 |
| 1/4" | 557,4 |
| 10 | 1015,5 |
| 20 | 396,6 |
| -20 | 755,7 |
| | 3845,2 |

| Mixto L-20886 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 12,3 |
| 1/2" | 718,0 |
| 3/8" | 653,4 |
| 1/4" | 531,2 |
| 10 | 1063,8 |
| 20 | 293,1 |
| -20 | 551,4 |
| | 3823,2 |

| Mixto L-20886 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 12,1 |
| 1/2" | 366,2 |
| 3/8" | 376,9 |
| 1/4" | 492,4 |
| 10 | 1054,3 |
| 20 | 428,6 |
| -20 | 887,5 |
| | 3617,9 |

| Mixto L-15767 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 15,9 |
| 1/2" | 868,9 |
| 3/8" | 738,2 |
| 1/4" | 746,1 |
| 10 | 1227,8 |
| 20 | 69,1 |
| -20 | 122,8 |
| | 3788,9 |

| Mixto L-15767 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 13,1 |
| 1/2" | 1020,1 |
| 3/8" | 539,2 |
| 1/4" | 600,4 |
| 10 | 855,1 |
| 20 | 241,6 |
| -20 | 531,8 |
| | 3801,2 |

| Mixto L-21199 20 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 16,0 |
| 1/2" | 653,9 |
| 3/8" | 523,6 |
| 1/4" | 581,6 |
| 10 | 1015,8 |
| 20 | 334,2 |
| -20 | 601,5 |
| | 3726,7 |

| Mixto L-21199 50 ppm | |
|----------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 5,7 |
| 1/2" | 858,2 |
| 3/8" | 471,9 |
| 1/4" | 649,2 |
| 10 | 1219,5 |
| 20 | 77,6 |
| -20 | 206,4 |
| | 3488,5 |

Tabla 43: Análisis granulométricos mineral sulfuro

| Sulfuro Blanco | |
|----------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 125,3 |
| 1/2" | 620,3 |
| 3/8" | 351,9 |
| 1/4" | 452,3 |
| 10 | 1080,1 |
| 20 | 400,7 |
| -20 | 674,7 |
| | 3705,2 |

| Sulfuro Blanco 2 | |
|------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 191,0 |
| 1/2" | 428,1 |
| 3/8" | 417,5 |
| 1/4" | 375,8 |
| 10 | 1143,5 |
| 20 | 470,2 |
| -20 | 753,4 |
| | 3779,6 |

| Sulfuro L-20886 20 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 276,1 |
| 1/2" | 1007,8 |
| 3/8" | 361,7 |
| 1/4" | 728,0 |
| 10 | 535,1 |
| 20 | 256,1 |
| -20 | 599,5 |
| | 3764,1 |

| Sulfuro L-20886 50 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 128,2 |
| 1/2" | 489,9 |
| 3/8" | 431,9 |
| 1/4" | 716,6 |
| 10 | 616,2 |
| 20 | 297,6 |
| -20 | 644,1 |
| | 3324,5 |

| Sulfuro L-15767 20 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 646,1 |
| 1/2" | 1470,8 |
| 3/8" | 655,0 |
| 1/4" | 376,8 |
| 10 | 446,7 |
| 20 | 63,5 |
| -20 | 108,2 |
| | 3767,1 |

| Sulfuro L-15767 50 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 83,7 |
| 1/2" | 696,6 |
| 3/8" | 396,0 |
| 1/4" | 534,6 |
| 10 | 1247,3 |
| 20 | 384,8 |
| -20 | 556,0 |
| | 3898,9 |

| Sulfuro L-21199 20 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 630,9 |
| 1/2" | 1181,0 |
| 3/8" | 558,9 |
| 1/4" | 437,4 |
| 10 | 489,1 |
| 20 | 570,9 |
| -20 | 72,7 |
| | 3940,9 |

| Sulfuro L-21199 50 ppm | |
|------------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 560,3 |
| 1/2" | 667,7 |
| 3/8" | 472,3 |
| 1/4" | 491,8 |
| 10 | 978,5 |
| 20 | 275,3 |
| -20 | 443,6 |
| | 3889,4 |

Anexo A.3: Análisis granulométricos pruebas columnas unitarias con recirculación

Tabla 44: Análisis granulométricos mineral oxido

| Blanco | |
|--------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 51,8 |
| 1/2" | 738,9 |
| 3/8" | 722,2 |
| 1/4" | 725,8 |
| 10 | 932,7 |
| 20 | 220,9 |
| -20 | 441,4 |
| | 3833,8 |

| Surfact. C-H 20 ppm | |
|---------------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 52,5 |
| 1/2" | 878,8 |
| 3/8" | 740,0 |
| 1/4" | 586,0 |
| 10 | 861,0 |
| 20 | 238,9 |
| -20 | 441,0 |
| | 3798,2 |

| L-15767 20ppm | |
|---------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 153,9 |
| 1/2" | 846,4 |
| 3/8" | 763,0 |
| 1/4" | 578,1 |
| 10 | 790,9 |
| 20 | 261,1 |
| -20 | 475,3 |
| | 3868,8 |

| L-21199 20ppm | |
|---------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 31,0 |
| 1/2" | 796,8 |
| 3/8" | 812,8 |
| 1/4" | 671,2 |
| 10 | 930,4 |
| 20 | 226,9 |
| -20 | 374,4 |
| | 3843,4 |

| L-20886 20ppm | |
|---------------|----------|
| Malla | Masa (g) |
| 3/4" | 127,9 |
| 1/2" | 767,3 |
| 3/8" | 716,1 |
| 1/4" | 662,2 |
| 10 | 927,1 |
| 20 | 181,8 |
| -20 | 424,4 |
| | 3806,9 |

ANEXO B

**Tablas de datos con detalles pruebas de
lixiviación en columnas e ISO-pH**

Anexo B.1: Tabla datos pruebas de lixiviación ISO-pH

Tabla 45: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral oxido

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|----------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Botella Blanco | 0,74 | 0,73 | 0,74 | 1 | 1,10 | 0,29 | 0,29 | 0,74 | 34,24 | 52,01 |
| | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 4 | 1,24 | 0,25 | 0,55 | 0,83 | 38,48 | 58,45 |
| | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 8 | 1,27 | 0,19 | 0,74 | 0,84 | 39,32 | 59,72 |
| | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 24 | 1,20 | 0,12 | 0,86 | 0,80 | 37,36 | 56,75 |
| | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 48 | 1,33 | 0,12 | 0,99 | 0,88 | 41,21 | 62,60 |
| | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 72 | 1,45 | 0,12 | 1,11 | 0,97 | 45,06 | 68,45 |
| L-15767 5ppm | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 1 | 1,33 | 0,35 | 0,35 | 0,89 | 41,23 | 62,63 |
| | 0,69 | 0,72 | 0,71 | 4 | 1,41 | 0,28 | 0,64 | 0,94 | 43,84 | 66,59 |
| | 0,57 | 0,59 | 0,58 | 8 | 1,51 | 0,23 | 0,87 | 1,00 | 46,77 | 71,05 |
| | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 24 | 1,75 | 0,23 | 1,10 | 1,16 | 54,21 | 82,35 |
| | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 48 | 1,84 | 0,20 | 1,30 | 1,22 | 57,05 | 86,66 |
| | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 72 | 1,96 | 0,18 | 1,47 | 1,31 | 60,81 | 92,37 |
| L-15767 20ppm | 0,92 | 0,91 | 0,92 | 1 | 1,37 | 0,37 | 0,37 | 0,92 | 42,62 | 64,75 |
| | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 4 | 1,48 | 0,30 | 0,66 | 0,98 | 45,84 | 69,63 |
| | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 8 | 1,63 | 0,26 | 0,92 | 1,09 | 50,61 | 76,87 |
| | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 24 | 1,85 | 0,25 | 1,17 | 1,23 | 57,45 | 87,27 |
| | 0,57 | 0,58 | 0,58 | 48 | 2,03 | 0,23 | 1,40 | 1,35 | 63,06 | 95,79 |
| | 0,50 | 0,51 | 0,51 | 72 | 2,16 | 0,20 | 1,60 | 1,44 | 66,94 | 101,69 |
| L-15767 50ppm | 1,03 | 1,01 | 1,02 | 1 | 1,53 | 0,41 | 0,41 | 1,02 | 47,52 | 72,18 |
| | 0,85 | 0,84 | 0,85 | 4 | 1,68 | 0,34 | 0,75 | 1,12 | 52,03 | 79,04 |
| | 0,83 | 0,82 | 0,83 | 8 | 1,98 | 0,33 | 1,08 | 1,32 | 61,60 | 93,57 |
| | 0,85 | 0,84 | 0,85 | 24 | 2,34 | 0,34 | 1,41 | 1,56 | 72,78 | 110,56 |
| | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 48 | 2,57 | 0,31 | 1,72 | 1,71 | 79,78 | 121,19 |
| | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 72 | 2,72 | 0,27 | 1,99 | 1,81 | 84,46 | 128,29 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| L-20886 20ppm | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 1 | 1,43 | 0,38 | 0,38 | 0,96 | 44,49 | 67,58 |
| | 0,77 | 0,78 | 0,78 | 4 | 1,54 | 0,31 | 0,69 | 1,03 | 47,97 | 72,86 |
| | 0,69 | 0,69 | 0,69 | 8 | 1,73 | 0,28 | 0,97 | 1,15 | 53,63 | 81,47 |
| | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 24 | 1,97 | 0,27 | 1,24 | 1,32 | 61,27 | 93,08 |
| | 0,62 | 0,62 | 0,62 | 48 | 2,17 | 0,25 | 1,48 | 1,44 | 67,27 | 102,18 |
| | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 72 | 2,32 | 0,22 | 1,71 | 1,54 | 71,94 | 109,28 |
| L-20886 50ppm | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1 | 1,48 | 0,39 | 0,39 | 0,99 | 45,88 | 69,70 |
| | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 4 | 1,53 | 0,30 | 0,70 | 1,02 | 47,41 | 72,01 |
| | 0,67 | 0,70 | 0,69 | 8 | 1,72 | 0,27 | 0,97 | 1,15 | 53,52 | 81,31 |
| | 0,85 | 0,87 | 0,86 | 24 | 2,26 | 0,34 | 1,31 | 1,51 | 70,19 | 106,62 |
| | 0,73 | 0,72 | 0,73 | 48 | 2,40 | 0,29 | 1,60 | 1,60 | 74,58 | 113,29 |
| | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 72 | 2,16 | 0,15 | 1,75 | 1,44 | 67,05 | 101,85 |
| L-21199 20ppm | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 1 | 1,08 | 0,29 | 0,29 | 0,72 | 33,54 | 50,95 |
| | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 4 | 1,23 | 0,25 | 0,54 | 0,82 | 38,29 | 58,17 |
| | 0,57 | 0,55 | 0,56 | 8 | 1,38 | 0,22 | 0,76 | 0,92 | 42,86 | 65,10 |
| | 0,33 | 0,34 | 0,34 | 24 | 1,27 | 0,13 | 0,90 | 0,84 | 39,33 | 59,75 |
| | 0,36 | 0,42 | 0,39 | 48 | 1,48 | 0,16 | 1,05 | 0,99 | 46,06 | 69,96 |
| | 0,36 | 0,35 | 0,36 | 72 | 1,59 | 0,14 | 1,20 | 1,06 | 49,27 | 74,84 |
| L-21199 50ppm | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 1 | 1,07 | 0,28 | 0,28 | 0,71 | 33,07 | 50,24 |
| | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 4 | 1,23 | 0,25 | 0,54 | 0,82 | 38,17 | 57,98 |
| | 0,54 | 0,53 | 0,54 | 8 | 1,34 | 0,21 | 0,75 | 0,89 | 41,57 | 63,14 |
| | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 24 | 1,43 | 0,18 | 0,93 | 0,95 | 44,25 | 67,23 |
| | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 48 | 1,58 | 0,17 | 1,10 | 1,05 | 48,91 | 74,30 |
| | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 72 | 1,72 | 0,17 | 1,27 | 1,15 | 53,56 | 81,35 |

Tabla 46: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral mixto

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|----------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Botella Blanco | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 1 | 1,00 | 0,27 | 0,27 | 0,67 | 32,25 | 71,73 |
| | 0,38 | 0,69 | 0,54 | 4 | 1,07 | 0,21 | 0,48 | 0,71 | 34,55 | 76,83 |
| | 0,57 | 0,58 | 0,58 | 8 | 1,34 | 0,23 | 0,71 | 0,90 | 43,41 | 96,53 |
| | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 24 | 1,55 | 0,22 | 0,93 | 1,03 | 50,12 | 111,45 |
| | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 48 | 1,59 | 0,18 | 1,11 | 1,06 | 51,54 | 114,62 |
| | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 72 | 1,67 | 0,15 | 1,26 | 1,11 | 53,84 | 119,72 |
| L-15767 20ppm | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 1 | 1,28 | 0,34 | 0,34 | 0,85 | 41,23 | 91,68 |
| | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 4 | 1,50 | 0,31 | 0,65 | 1,00 | 48,34 | 107,50 |
| | 0,61 | 0,61 | 0,61 | 8 | 1,56 | 0,24 | 0,89 | 1,04 | 50,54 | 112,39 |
| | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 24 | 1,66 | 0,20 | 1,10 | 1,10 | 53,58 | 119,15 |
| | 0,84 | 0,42 | 0,63 | 48 | 2,04 | 0,25 | 1,35 | 1,36 | 66,00 | 146,76 |
| | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 72 | 1,89 | 0,14 | 1,49 | 1,26 | 61,05 | 135,76 |
| L-15767 50ppm | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 1 | 0,96 | 0,26 | 0,26 | 0,64 | 31,04 | 69,03 |
| | 0,56 | 0,57 | 0,57 | 4 | 1,10 | 0,23 | 0,48 | 0,74 | 35,68 | 79,35 |
| | 0,47 | 0,45 | 0,46 | 8 | 1,17 | 0,18 | 0,67 | 0,78 | 37,90 | 84,27 |
| | 0,41 | 0,42 | 0,42 | 24 | 1,29 | 0,17 | 0,83 | 0,86 | 41,66 | 92,65 |
| | 0,37 | 0,38 | 0,38 | 48 | 1,39 | 0,15 | 0,98 | 0,93 | 45,09 | 100,27 |
| | 0,33 | 0,34 | 0,34 | 72 | 1,48 | 0,13 | 1,12 | 0,99 | 48,00 | 106,74 |
| L-20886 20ppm | 0,77 | 0,78 | 0,78 | 1 | 1,16 | 0,31 | 0,31 | 0,78 | 37,59 | 83,59 |
| | 0,68 | 0,67 | 0,68 | 4 | 1,32 | 0,27 | 0,58 | 0,88 | 42,76 | 95,10 |
| | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 8 | 1,38 | 0,21 | 0,79 | 0,92 | 44,70 | 99,41 |
| | 0,47 | 0,48 | 0,48 | 24 | 1,51 | 0,19 | 0,98 | 1,00 | 48,71 | 108,33 |
| | 0,39 | 0,40 | 0,40 | 48 | 1,58 | 0,16 | 1,14 | 1,05 | 50,98 | 113,36 |
| | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 72 | 1,67 | 0,14 | 1,28 | 1,11 | 53,90 | 119,87 |
| L-20886 50ppm | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 1 | 1,31 | 0,35 | 0,35 | 0,87 | 42,20 | 93,84 |
| | 0,69 | 0,68 | 0,69 | 4 | 1,38 | 0,27 | 0,62 | 0,92 | 44,48 | 98,91 |
| | 0,54 | 0,55 | 0,55 | 8 | 1,44 | 0,22 | 0,84 | 0,96 | 46,55 | 103,51 |
| | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 24 | 1,63 | 0,21 | 1,05 | 1,09 | 52,63 | 117,03 |
| | 0,45 | 0,46 | 0,46 | 48 | 1,73 | 0,18 | 1,23 | 1,16 | 56,02 | 124,58 |
| | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 72 | 1,80 | 0,15 | 1,38 | 1,20 | 58,27 | 129,57 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| L-21199 20ppm | 0,68 | 0,72 | 0,70 | 1 | 1,05 | 0,28 | 0,28 | 0,70 | 33,95 | 75,50 |
| | 0,62 | 0,64 | 0,63 | 4 | 1,23 | 0,25 | 0,53 | 0,82 | 39,61 | 88,09 |
| | 0,52 | 0,55 | 0,54 | 8 | 1,33 | 0,21 | 0,75 | 0,89 | 43,15 | 95,96 |
| | 0,59 | 0,61 | 0,60 | 24 | 1,65 | 0,24 | 0,99 | 1,10 | 53,22 | 118,36 |
| | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 48 | 1,70 | 0,19 | 1,18 | 1,13 | 54,92 | 122,13 |
| | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 72 | 1,78 | 0,16 | 1,34 | 1,18 | 57,43 | 127,71 |
| L-21199 50ppm | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 1 | 1,15 | 0,31 | 0,31 | 0,77 | 37,10 | 82,51 |
| | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 4 | 0,88 | 0,15 | 0,46 | 0,58 | 28,33 | 62,99 |
| | 0,40 | 0,41 | 0,41 | 8 | 1,07 | 0,16 | 0,62 | 0,71 | 34,45 | 76,62 |
| | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 24 | 1,41 | 0,21 | 0,83 | 0,94 | 45,51 | 101,21 |
| | 0,46 | 0,45 | 0,46 | 48 | 1,51 | 0,18 | 1,01 | 1,01 | 48,91 | 108,76 |
| | 0,38 | 0,37 | 0,38 | 72 | 1,57 | 0,15 | 1,16 | 1,05 | 50,91 | 113,22 |

Tabla 47: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral sulfuro

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino muest. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|----------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Botella Blanco | 0,44 | 0,46 | 0,45 | 1 | 0,68 | 0,18 | 0,18 | 0,45 | 12,05 | 85,93 |
| | 0,68 | 0,39 | 0,54 | 4 | 0,98 | 0,21 | 0,39 | 0,66 | 17,53 | 125,08 |
| | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 8 | 0,87 | 0,13 | 0,52 | 0,58 | 15,60 | 111,27 |
| | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 24 | 1,06 | 0,14 | 0,67 | 0,71 | 18,95 | 135,20 |
| | 0,25 | 0,39 | 0,32 | 48 | 1,15 | 0,13 | 0,79 | 0,76 | 20,45 | 145,90 |
| | 0,38 | 0,38 | 0,38 | 72 | 1,36 | 0,15 | 0,95 | 0,91 | 24,34 | 173,65 |
| L-15767 20ppm | 0,62 | 0,65 | 0,64 | 1 | 0,95 | 0,25 | 0,25 | 0,64 | 17,00 | 121,26 |
| | 0,50 | 0,52 | 0,51 | 4 | 1,02 | 0,20 | 0,46 | 0,68 | 18,18 | 129,73 |
| | 0,42 | 0,45 | 0,44 | 8 | 1,11 | 0,17 | 0,63 | 0,74 | 19,82 | 141,38 |
| | 0,41 | 0,45 | 0,43 | 24 | 1,28 | 0,17 | 0,80 | 0,85 | 22,79 | 162,57 |
| | 0,43 | 0,46 | 0,45 | 48 | 1,47 | 0,18 | 0,98 | 0,98 | 26,26 | 187,34 |
| | 0,41 | 0,43 | 0,42 | 72 | 1,61 | 0,17 | 1,15 | 1,07 | 28,77 | 205,22 |
| L-15767 50ppm | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 1 | 1,17 | 0,31 | 0,31 | 0,78 | 20,88 | 148,95 |
| | 0,67 | 0,65 | 0,66 | 4 | 1,30 | 0,26 | 0,58 | 0,87 | 23,23 | 165,76 |
| | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 8 | 1,37 | 0,21 | 0,79 | 0,91 | 24,47 | 174,54 |
| | 0,53 | 0,54 | 0,54 | 24 | 1,59 | 0,21 | 1,00 | 1,06 | 28,38 | 202,49 |
| | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 48 | 1,83 | 0,22 | 1,22 | 1,22 | 32,74 | 233,55 |
| | 0,50 | 0,51 | 0,51 | 72 | 1,98 | 0,20 | 1,43 | 1,32 | 35,36 | 252,26 |
| L-20886 20ppm | 0,70 | 0,73 | 0,72 | 1 | 1,07 | 0,29 | 0,29 | 0,72 | 19,14 | 136,54 |
| | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 4 | 1,18 | 0,24 | 0,52 | 0,79 | 21,03 | 150,03 |
| | 0,50 | 0,52 | 0,51 | 8 | 1,29 | 0,20 | 0,73 | 0,86 | 23,00 | 164,10 |
| | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 24 | 1,61 | 0,23 | 0,96 | 1,07 | 28,65 | 204,39 |
| | 0,70 | 0,82 | 0,76 | 48 | 2,10 | 0,30 | 1,27 | 1,40 | 37,51 | 267,60 |
| | 0,66 | 0,66 | 0,66 | 72 | 2,26 | 0,26 | 1,53 | 1,50 | 40,26 | 287,21 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| L-20886 50ppm | 0,68 | 0,74 | 0,71 | 1 | 1,07 | 0,28 | 0,28 | 0,71 | 19,01 | 135,58 |
| | 0,53 | 0,61 | 0,57 | 4 | 1,14 | 0,23 | 0,51 | 0,76 | 20,33 | 145,01 |
| | 0,47 | 0,51 | 0,49 | 8 | 1,25 | 0,20 | 0,71 | 0,83 | 22,25 | 158,75 |
| | 0,49 | 0,44 | 0,47 | 24 | 1,41 | 0,19 | 0,89 | 0,94 | 25,08 | 178,93 |
| | 0,56 | 0,39 | 0,48 | 48 | 1,61 | 0,19 | 1,08 | 1,07 | 28,67 | 204,52 |
| | 0,52 | 0,55 | 0,54 | 72 | 1,89 | 0,21 | 1,30 | 1,26 | 33,67 | 240,17 |
| L-21199 20ppm | 0,55 | 0,56 | 0,56 | 1 | 0,83 | 0,22 | 0,22 | 0,56 | 14,86 | 105,98 |
| | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 4 | 0,94 | 0,19 | 0,41 | 0,63 | 16,81 | 119,93 |
| | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 8 | 1,03 | 0,16 | 0,58 | 0,69 | 18,36 | 131,00 |
| | 0,50 | 0,51 | 0,51 | 24 | 1,34 | 0,20 | 0,78 | 0,89 | 23,83 | 170,02 |
| | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 48 | 1,44 | 0,18 | 0,96 | 0,96 | 25,70 | 183,33 |
| | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 72 | 1,65 | 0,18 | 1,14 | 1,10 | 29,37 | 209,55 |
| L-21199 50ppm | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 1 | 1,28 | 0,34 | 0,34 | 0,85 | 22,75 | 162,32 |
| | 0,51 | 0,52 | 0,52 | 4 | 1,11 | 0,21 | 0,55 | 0,74 | 19,85 | 141,63 |
| | 0,44 | 0,45 | 0,45 | 8 | 1,21 | 0,18 | 0,72 | 0,81 | 21,66 | 154,49 |
| | 0,50 | 0,52 | 0,51 | 24 | 1,49 | 0,20 | 0,93 | 0,99 | 26,57 | 189,56 |
| | 0,57 | 0,58 | 0,58 | 48 | 1,79 | 0,23 | 1,16 | 1,19 | 31,95 | 227,95 |
| | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 72 | 1,95 | 0,21 | 1,37 | 1,30 | 34,72 | 247,68 |

Anexo B.2: Tabla datos pruebas de lixiviación columnas unitarias

Tabla 48: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral oxido

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna Blanco | 3,00 | 2,96 | 2,98 | 24 | 71,52 | 0,30 | 0,30 | 2,98 | 19,48 | 22,20 |
| | 2,85 | 2,78 | 2,82 | 48 | 67,86 | 0,28 | 0,58 | 2,83 | 37,97 | 43,26 |
| | 1,11 | 1,13 | 1,12 | 96 | 27,46 | 0,11 | 0,69 | 1,14 | 45,45 | 51,78 |
| | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 144 | 25,41 | 0,10 | 0,79 | 1,06 | 52,37 | 59,67 |
| | 0,79 | 0,81 | 0,80 | 192 | 19,99 | 0,08 | 0,87 | 0,83 | 57,82 | 65,87 |
| | 0,70 | 0,79 | 0,75 | 240 | 18,75 | 0,07 | 0,95 | 0,78 | 62,93 | 71,69 |
| Columna Blanco (2) | 2,98 | 3,00 | 2,99 | 24 | 72,71 | 0,30 | 0,30 | 3,03 | 19,81 | 22,57 |
| | 2,13 | 2,16 | 2,15 | 48 | 51,78 | 0,21 | 0,51 | 2,16 | 33,91 | 38,64 |
| | 2,12 | 2,16 | 2,14 | 96 | 51,87 | 0,21 | 0,73 | 2,16 | 48,04 | 54,74 |
| | 1,07 | 1,70 | 1,39 | 144 | 33,97 | 0,14 | 0,87 | 1,42 | 57,30 | 65,28 |
| | 0,30 | 0,50 | 0,40 | 192 | 10,47 | 0,04 | 0,91 | 0,44 | 60,15 | 68,53 |
| | 0,25 | 0,32 | 0,29 | 240 | 7,75 | 0,03 | 0,93 | 0,32 | 62,26 | 70,93 |
| Columna L-15767 20ppm | 7,80 | 7,70 | 7,75 | 24 | 186,93 | 0,78 | 0,78 | 7,79 | 25,46 | 29,01 |
| | 7,40 | 7,20 | 7,30 | 48 | 175,98 | 0,73 | 1,51 | 7,33 | 49,43 | 56,32 |
| | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 96 | 39,91 | 0,16 | 1,67 | 1,66 | 60,30 | 68,70 |
| | 1,04 | 1,03 | 1,04 | 144 | 26,51 | 0,10 | 1,77 | 1,10 | 67,52 | 76,93 |
| | 0,43 | 0,46 | 0,45 | 192 | 12,45 | 0,04 | 1,81 | 0,52 | 70,91 | 80,79 |
| | 0,39 | 0,40 | 0,40 | 240 | 11,29 | 0,04 | 1,85 | 0,47 | 73,99 | 84,30 |
| Columna L-15767 50ppm | 4,80 | 4,86 | 4,83 | 24 | 116,54 | 0,48 | 0,48 | 4,86 | 15,87 | 18,08 |
| | 3,12 | 3,15 | 3,14 | 48 | 75,72 | 0,31 | 0,80 | 3,16 | 26,19 | 29,84 |
| | 2,74 | 2,80 | 2,77 | 96 | 67,28 | 0,28 | 1,07 | 2,80 | 44,52 | 50,72 |
| | 2,10 | 2,14 | 2,12 | 144 | 51,95 | 0,21 | 1,29 | 2,16 | 58,67 | 66,84 |
| | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 192 | 26,97 | 0,11 | 1,39 | 1,12 | 66,01 | 75,21 |
| | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 240 | 12,91 | 0,05 | 1,44 | 0,54 | 69,53 | 79,22 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna L-20886 20ppm | 7,30 | 7,30 | 7,30 | 24 | 176,64 | 0,73 | 0,73 | 7,36 | 24,06 | 27,41 |
| | 2,25 | 2,18 | 2,22 | 48 | 53,89 | 0,22 | 0,95 | 2,25 | 38,74 | 44,14 |
| | 0,98 | 1,48 | 1,23 | 96 | 30,47 | 0,12 | 1,07 | 1,27 | 47,04 | 53,59 |
| | 0,52 | 0,55 | 0,54 | 144 | 13,91 | 0,05 | 1,13 | 0,58 | 50,83 | 57,91 |
| | 0,45 | 0,50 | 0,48 | 192 | 12,53 | 0,05 | 1,18 | 0,52 | 54,25 | 61,80 |
| | 0,44 | 0,45 | 0,45 | 240 | 11,86 | 0,04 | 1,22 | 0,49 | 57,47 | 65,48 |
| Columna L-20886 50ppm | 7,50 | 7,80 | 7,65 | 24 | 184,82 | 0,77 | 0,77 | 7,70 | 25,17 | 28,68 |
| | 4,70 | 4,90 | 4,80 | 48 | 115,97 | 0,48 | 1,25 | 4,83 | 40,97 | 46,68 |
| | 1,36 | 1,37 | 1,37 | 96 | 34,01 | 0,14 | 1,38 | 1,42 | 50,23 | 57,23 |
| | 0,65 | 0,72 | 0,69 | 144 | 17,82 | 0,07 | 1,45 | 0,74 | 55,09 | 62,76 |
| | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 192 | 9,85 | 0,04 | 1,49 | 0,41 | 57,77 | 65,82 |
| | 0,32 | 0,34 | 0,33 | 240 | 9,41 | 0,03 | 1,52 | 0,39 | 60,33 | 68,74 |
| Columna L-21199 20ppm | 6,50 | 6,50 | 6,50 | 24 | 157,52 | 0,65 | 0,65 | 6,56 | 21,46 | 24,44 |
| | 4,40 | 4,20 | 4,30 | 48 | 103,85 | 0,43 | 1,08 | 4,33 | 35,60 | 40,56 |
| | 1,85 | 1,88 | 1,87 | 96 | 45,84 | 0,19 | 1,27 | 1,91 | 48,09 | 54,79 |
| | 0,97 | 1,01 | 0,99 | 144 | 25,03 | 0,10 | 1,37 | 1,04 | 54,91 | 62,55 |
| | 0,69 | 0,74 | 0,72 | 192 | 18,53 | 0,07 | 1,44 | 0,77 | 59,95 | 68,30 |
| | 0,60 | 0,72 | 0,66 | 240 | 17,28 | 0,07 | 1,50 | 0,72 | 64,66 | 73,67 |
| Columna L-21199 50ppm | 8,20 | 7,90 | 8,05 | 24 | 194,70 | 0,81 | 2,31 | 8,11 | 26,52 | 30,21 |
| | 3,63 | 3,56 | 3,60 | 48 | 88,59 | 0,36 | 2,67 | 3,69 | 38,59 | 43,96 |
| | 1,37 | 1,36 | 1,37 | 96 | 35,43 | 0,14 | 2,80 | 1,48 | 48,24 | 54,96 |
| | 1,07 | 1,06 | 1,07 | 144 | 28,36 | 0,11 | 2,91 | 1,18 | 55,97 | 63,76 |
| | 0,58 | 0,61 | 0,60 | 192 | 17,19 | 0,06 | 2,97 | 0,72 | 60,65 | 69,10 |
| | 0,52 | 0,55 | 0,54 | 240 | 15,81 | 0,05 | 3,02 | 0,66 | 64,96 | 74,00 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna C-H | 4,87 | 4,86 | 4,87 | 24 | 130,97 | 0,49 | 0,49 | 5,46 | 35,68 | 40,65 |
| | 1,37 | 1,35 | 1,36 | 48 | 37,10 | 0,14 | 0,62 | 1,55 | 45,78 | 52,16 |
| | 0,51 | 0,52 | 0,52 | 96 | 14,49 | 0,05 | 0,67 | 0,60 | 49,73 | 56,66 |
| | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 144 | 13,60 | 0,05 | 0,72 | 0,57 | 53,43 | 60,88 |
| | 0,29 | 0,30 | 0,30 | 192 | 8,66 | 0,03 | 0,75 | 0,36 | 55,79 | 63,57 |
| | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 240 | 3,17 | 0,01 | 0,76 | 0,13 | 56,66 | 64,55 |

Tabla 49: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral mixto

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|--------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna Blanco | 0,87 | 0,86 | 0,87 | 24 | 20,88 | 0,09 | 0,09 | 0,87 | 5,92 | 9,88 |
| | 0,61 | 0,61 | 0,61 | 48 | 14,73 | 0,06 | 0,15 | 0,61 | 10,10 | 16,84 |
| | 0,36 | 0,35 | 0,36 | 96 | 8,79 | 0,04 | 0,18 | 0,37 | 12,59 | 21,00 |
| | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 144 | 6,42 | 0,03 | 0,21 | 0,27 | 14,41 | 24,04 |
| | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 192 | 6,21 | 0,03 | 0,24 | 0,26 | 16,18 | 26,98 |
| | 0,21 | 0,20 | 0,21 | 240 | 5,28 | 0,02 | 0,26 | 0,22 | 17,67 | 29,47 |
| Columna Blanco (2) | 5,50 | 5,60 | 5,55 | 24 | 133,46 | 0,56 | 0,56 | 5,56 | 18,93 | 21,04 |
| | 3,00 | 3,05 | 3,03 | 48 | 73,16 | 0,30 | 0,86 | 3,05 | 32,76 | 44,12 |
| | 1,23 | 1,20 | 1,22 | 96 | 30,02 | 0,12 | 0,98 | 1,25 | 41,27 | 58,32 |
| | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 144 | 6,02 | 0,02 | 1,00 | 0,25 | 42,98 | 61,16 |
| | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 192 | 4,60 | 0,02 | 1,02 | 0,19 | 44,29 | 63,34 |
| | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 240 | 4,50 | 0,01 | 1,03 | 0,19 | 45,56 | 65,47 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna L-15767 20ppm | 9,60 | 9,59 | 9,60 | 24 | 231,43 | 0,96 | 0,96 | 9,64 | 43,76 | 36,49 |
| | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 48 | 24,96 | 0,10 | 1,06 | 1,04 | 50,84 | 48,30 |
| | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 96 | 11,62 | 0,04 | 1,10 | 0,48 | 54,14 | 53,80 |
| | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 144 | 10,70 | 0,04 | 1,14 | 0,45 | 57,17 | 58,86 |
| | 0,35 | 0,34 | 0,35 | 192 | 9,54 | 0,04 | 1,18 | 0,40 | 59,88 | 63,38 |
| | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 240 | 8,86 | 0,03 | 1,21 | 0,37 | 62,39 | 67,57 |
| Columna L-15767 50ppm | 3,55 | 3,55 | 3,55 | 24 | 86,41 | 0,36 | 0,36 | 3,60 | 12,25 | 20,44 |
| | 2,10 | 2,09 | 2,10 | 48 | 50,76 | 0,21 | 0,57 | 2,11 | 26,65 | 32,44 |
| | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 96 | 33,45 | 0,14 | 0,70 | 1,39 | 36,14 | 48,27 |
| | 0,83 | 0,83 | 0,83 | 144 | 20,62 | 0,08 | 0,79 | 0,86 | 41,99 | 58,02 |
| | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 192 | 12,31 | 0,05 | 0,83 | 0,51 | 45,48 | 63,84 |
| | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 240 | 11,39 | 0,04 | 0,88 | 0,47 | 48,71 | 69,23 |
| Columna L-20886 20ppm | 2,68 | 2,68 | 2,68 | 24 | 65,20 | 0,27 | 0,27 | 2,72 | 18,49 | 15,42 |
| | 2,43 | 2,42 | 2,43 | 48 | 58,59 | 0,24 | 0,51 | 2,44 | 35,11 | 29,28 |
| | 1,29 | 1,28 | 1,29 | 96 | 31,47 | 0,13 | 0,64 | 1,31 | 44,04 | 44,17 |
| | 0,86 | 0,85 | 0,86 | 144 | 21,28 | 0,09 | 0,73 | 0,89 | 50,07 | 54,23 |
| | 0,69 | 0,69 | 0,69 | 192 | 17,29 | 0,07 | 0,80 | 0,72 | 54,98 | 62,41 |
| | 0,60 | 0,59 | 0,60 | 240 | 15,20 | 0,06 | 0,86 | 0,63 | 59,29 | 69,60 |
| Columna L-20886 50ppm | 14,30 | 14,29 | 14,30 | 24 | 344,06 | 1,43 | 1,43 | 14,34 | 32,53 | 36,17 |
| | 1,91 | 1,91 | 1,91 | 48 | 47,27 | 0,19 | 1,62 | 1,97 | 45,94 | 51,08 |
| | 1,26 | 1,26 | 1,26 | 96 | 31,86 | 0,13 | 1,75 | 1,33 | 54,97 | 61,13 |
| | 0,84 | 0,83 | 0,84 | 144 | 21,91 | 0,08 | 1,83 | 0,91 | 61,19 | 68,03 |
| | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 192 | 15,27 | 0,06 | 1,89 | 0,64 | 65,52 | 72,85 |
| | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 240 | 13,89 | 0,05 | 1,94 | 0,58 | 69,46 | 77,23 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna L-21199 20ppm | 1,31 | 1,30 | 1,31 | 24 | 33,26 | 0,13 | 0,13 | 1,39 | 9,43 | 15,73 |
| | 1,04 | 1,01 | 1,03 | 48 | 24,73 | 0,10 | 0,23 | 1,03 | 16,45 | 27,43 |
| | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 96 | 19,91 | 0,08 | 0,32 | 0,83 | 22,10 | 36,85 |
| | 0,55 | 0,59 | 0,57 | 144 | 14,00 | 0,06 | 0,37 | 0,58 | 26,07 | 43,47 |
| | 0,53 | 0,52 | 0,53 | 192 | 12,97 | 0,05 | 0,42 | 0,54 | 29,74 | 49,61 |
| | 0,46 | 0,50 | 0,48 | 240 | 11,94 | 0,05 | 0,47 | 0,50 | 33,13 | 55,26 |
| Columna L-21199 50ppm | 5,10 | 5,09 | 5,10 | 24 | 122,87 | 0,51 | 0,51 | 5,12 | 34,85 | 29,06 |
| | 1,81 | 1,81 | 1,81 | 48 | 43,95 | 0,18 | 0,69 | 1,83 | 47,32 | 42,92 |
| | 0,89 | 0,88 | 0,89 | 96 | 22,05 | 0,09 | 0,78 | 0,92 | 53,57 | 53,36 |
| | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 144 | 13,98 | 0,06 | 0,84 | 0,58 | 57,54 | 59,97 |
| | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 192 | 14,04 | 0,06 | 0,89 | 0,58 | 61,52 | 66,61 |
| | 0,53 | 0,52 | 0,53 | 240 | 13,61 | 0,05 | 0,94 | 0,57 | 65,38 | 73,05 |

Tabla 50: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral sulfuro

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna Blanco | 4,43 | 4,42 | 4,43 | 24 | 106,32 | 0,44 | 0,44 | 4,43 | 8,32 | 17,81 |
| | 3,35 | 3,34 | 3,35 | 48 | 80,84 | 0,34 | 0,78 | 3,37 | 17,36 | 37,16 |
| | 1,25 | 1,25 | 1,25 | 96 | 30,78 | 0,13 | 0,90 | 1,28 | 22,18 | 45,75 |
| | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 144 | 23,94 | 0,10 | 1,00 | 1,00 | 25,93 | 52,43 |
| | 0,31 | 0,3 | 0,31 | 192 | 8,44 | 0,03 | 1,03 | 0,35 | 27,25 | 55,97 |
| | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 240 | 5,59 | 0,02 | 1,05 | 0,23 | 28,12 | 58,31 |
| Columna Blanco (2) | 5,6 | 5,9 | 5,75 | 24 | 139,05 | 0,58 | 0,58 | 5,79 | 14,51 | 25,88 |
| | 2,48 | 2,5 | 2,49 | 48 | 60,34 | 0,25 | 0,82 | 2,51 | 23,96 | 38,51 |
| | 0,86 | 0,85 | 0,855 | 96 | 21,34 | 0,09 | 0,91 | 0,89 | 27,30 | 44,47 |
| | 0,13 | 0,11 | 0,12 | 144 | 3,79 | 0,01 | 0,92 | 0,16 | 27,89 | 47,65 |
| | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 192 | 3,56 | 0,01 | 0,93 | 0,15 | 28,45 | 50,63 |
| | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 240 | 3,57 | 0,01 | 0,94 | 0,15 | 29,01 | 53,62 |
| Columna L-15767 20ppm | 6,7 | 6,6 | 6,65 | 24 | 160,54 | 0,67 | 0,67 | 6,69 | 25,13 | 33,62 |
| | 0,72 | 0,69 | 0,705 | 48 | 17,59 | 0,07 | 0,74 | 0,73 | 27,88 | 38,53 |
| | 0,41 | 0,35 | 0,38 | 96 | 9,86 | 0,04 | 0,77 | 0,41 | 29,43 | 46,78 |
| | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 144 | 4,13 | 0,01 | 0,79 | 0,17 | 30,07 | 50,24 |
| | 0,12 | 0,13 | 0,125 | 192 | 3,79 | 0,01 | 0,80 | 0,16 | 30,67 | 53,41 |
| | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 240 | 3,68 | 0,01 | 0,81 | 0,15 | 31,24 | 56,50 |
| Columna L-15767 50ppm | 3,62 | 3,65 | 3,635 | 24 | 88,05 | 0,36 | 0,36 | 3,67 | 13,78 | 18,44 |
| | 1,85 | 1,88 | 1,865 | 48 | 45,12 | 0,19 | 0,55 | 1,88 | 20,85 | 27,89 |
| | 0,77 | 0,78 | 0,775 | 96 | 19,15 | 0,08 | 0,63 | 0,80 | 23,84 | 31,90 |
| | 0,27 | 0,26 | 0,265 | 144 | 6,99 | 0,03 | 0,65 | 0,29 | 24,94 | 37,75 |
| | 0,26 | 0,25 | 0,255 | 192 | 6,77 | 0,03 | 0,68 | 0,28 | 26,00 | 43,42 |
| | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 240 | 5,72 | 0,02 | 0,70 | 0,24 | 26,89 | 48,21 |

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino muestr. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|---------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna L-20886 20ppm | 5,2 | 10,6 | 7,9 | 24 | 190,30 | 0,79 | 0,79 | 7,93 | 14,89 | 26,56 |
| | 1,39 | 1,44 | 1,415 | 48 | 34,75 | 0,14 | 0,93 | 1,45 | 20,33 | 33,84 |
| | 0,81 | 0,8 | 0,805 | 96 | 20,25 | 0,08 | 1,01 | 0,84 | 23,50 | 39,49 |
| | 0,54 | 0,52 | 0,53 | 144 | 13,73 | 0,05 | 1,07 | 0,57 | 25,65 | 45,25 |
| | 0,16 | 0,15 | 0,155 | 192 | 4,79 | 0,02 | 1,08 | 0,20 | 26,40 | 49,25 |
| | 0,12 | 0,11 | 0,115 | 240 | 3,84 | 0,01 | 1,09 | 0,16 | 27,00 | 52,47 |
| Columna L-20886 50ppm | 20,3 | 20 | 20,15 | 24 | 484,69 | 2,02 | 2,02 | 20,20 | 18,97 | 29,00 |
| | 3,1 | 3 | 3,05 | 48 | 75,22 | 0,31 | 2,32 | 3,13 | 24,86 | 41,60 |
| | 1,49 | 1,48 | 1,485 | 96 | 37,96 | 0,15 | 2,47 | 1,58 | 27,83 | 47,96 |
| | 0,91 | 0,92 | 0,915 | 144 | 24,43 | 0,09 | 2,56 | 1,02 | 31,65 | 54,78 |
| | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 192 | 18,16 | 0,07 | 2,63 | 0,76 | 34,49 | 59,85 |
| | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 240 | 14,15 | 0,05 | 2,67 | 0,59 | 36,71 | 63,79 |
| Columna L-21199 20ppm | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 24 | 89,07 | 0,36 | 0,36 | 3,71 | 13,94 | 24,87 |
| | 1,01 | 1 | 1,01 | 48 | 24,60 | 0,10 | 0,46 | 1,03 | 17,79 | 31,74 |
| | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 96 | 12,22 | 0,05 | 0,51 | 0,51 | 19,71 | 35,15 |
| | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 144 | 9,39 | 0,04 | 0,55 | 0,39 | 21,18 | 37,77 |
| | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 192 | 9,43 | 0,04 | 0,58 | 0,39 | 22,65 | 41,72 |
| | 0,33 | 0,32 | 0,33 | 240 | 8,50 | 0,03 | 0,62 | 0,35 | 23,98 | 45,28 |
| Columna L-21199 50ppm | 4,23 | 4,23 | 4,23 | 24 | 102,14 | 0,42 | 0,42 | 4,26 | 15,99 | 21,39 |
| | 1,91 | 1,91 | 1,91 | 48 | 46,26 | 0,19 | 0,61 | 1,93 | 23,23 | 34,30 |
| | 1,17 | 1,16 | 1,17 | 96 | 28,69 | 0,12 | 0,73 | 1,20 | 27,72 | 42,31 |
| | 0,73 | 0,72 | 0,73 | 144 | 18,25 | 0,07 | 0,80 | 0,76 | 30,58 | 47,41 |
| | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 192 | 13,04 | 0,05 | 0,86 | 0,54 | 32,62 | 51,05 |
| | 0,48 | 0,48 | 0,48 | 240 | 12,38 | 0,05 | 0,90 | 0,52 | 34,56 | 54,51 |

Anexo B.3: Tabla datos pruebas de lixiviación columnas unitarias con recirculación

Tabla 51: Tabla de datos pruebas de lixiviación mineral oxido

| Prueba | Cu+2 [g/L] | Cu+2 [g/L] | Promedio | Horas (h) | CuFino PLS (g) | CuFino muestra (g) | CuFino mue. Acumu. (g) | Conc.Real (g/l) | % Extracción (CuT) | % Extracción (CuS) |
|-----------------------|------------|------------|----------|-----------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Columna C-H | 2,40 | 2,35 | 2,38 | 24 | 66,45 | 0,24 | 0,24 | 2,77 | 18,10 | 20,62 |
| | 1,39 | 1,39 | 1,39 | 48 | 39,13 | 0,14 | 0,38 | 1,63 | 28,76 | 32,77 |
| | 1,35 | 1,32 | 1,34 | 96 | 37,73 | 0,13 | 0,51 | 1,57 | 39,04 | 44,48 |
| | 1,33 | 1,34 | 1,34 | 144 | 37,86 | 0,13 | 0,64 | 1,58 | 49,36 | 56,23 |
| | 1,13 | 1,14 | 1,14 | 192 | 32,40 | 0,11 | 0,76 | 1,35 | 58,18 | 66,29 |
| | 0,83 | 0,43 | 0,63 | 240 | 18,38 | 0,06 | 0,82 | 0,77 | 63,19 | 71,99 |
| Columna Blanco | 3,18 | 0,71 | 1,95 | 24 | 46,82 | 0,19 | 0,19 | 1,95 | 12,75 | 14,53 |
| | 1,58 | 1,12 | 1,35 | 48 | 32,69 | 0,14 | 0,33 | 1,36 | 21,66 | 24,68 |
| | 1,38 | 1,34 | 1,36 | 96 | 33,06 | 0,14 | 0,47 | 1,38 | 30,67 | 34,94 |
| | 1,36 | 1,40 | 1,38 | 144 | 33,68 | 0,14 | 0,60 | 1,40 | 39,84 | 45,39 |
| | 1,11 | 1,58 | 1,35 | 192 | 32,98 | 0,13 | 0,74 | 1,37 | 48,83 | 55,63 |
| | 0,71 | 3,21 | 1,96 | 240 | 47,92 | 0,20 | 0,93 | 2,00 | 61,88 | 70,50 |
| Columna L-15767 20ppm | 2,78 | 2,72 | 2,75 | 24 | 91,85 | 0,28 | 0,28 | 3,83 | 25,02 | 28,51 |
| | 1,43 | 1,46 | 1,45 | 48 | 48,54 | 0,14 | 0,42 | 2,02 | 38,24 | 43,57 |
| | 1,28 | 1,29 | 1,29 | 96 | 43,34 | 0,13 | 0,55 | 1,81 | 50,05 | 57,02 |
| | 1,28 | 1,29 | 1,29 | 144 | 43,47 | 0,13 | 0,68 | 1,81 | 61,89 | 70,51 |
| | 1,10 | 1,11 | 1,11 | 192 | 37,58 | 0,11 | 0,79 | 1,57 | 72,13 | 82,18 |
| | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 240 | 8,14 | 0,02 | 0,81 | 0,34 | 74,35 | 84,70 |
| Columna L-20886 20ppm | 3,26 | 3,27 | 3,27 | 24 | 69,45 | 0,33 | 0,33 | 2,89 | 18,92 | 21,55 |
| | 1,85 | 1,87 | 1,86 | 48 | 39,89 | 0,19 | 0,51 | 1,66 | 29,79 | 33,93 |
| | 1,80 | 1,76 | 1,78 | 96 | 38,37 | 0,18 | 0,69 | 1,60 | 40,24 | 45,84 |
| | 1,56 | 1,53 | 1,55 | 144 | 33,55 | 0,15 | 0,85 | 1,40 | 49,38 | 56,26 |
| | 1,37 | 1,36 | 1,37 | 192 | 29,88 | 0,14 | 0,98 | 1,24 | 57,52 | 65,53 |
| | 1,06 | 1,07 | 1,07 | 240 | 23,63 | 0,11 | 1,09 | 0,98 | 63,96 | 72,87 |
| Columna L-21199 20ppm | 2,65 | 2,57 | 2,61 | 24 | 76,26 | 0,26 | 0,26 | 3,18 | 20,78 | 23,67 |
| | 1,48 | 1,46 | 1,47 | 48 | 43,21 | 0,15 | 0,41 | 1,80 | 32,55 | 37,08 |
| | 1,43 | 1,41 | 1,42 | 96 | 41,90 | 0,14 | 0,55 | 1,75 | 43,96 | 50,09 |
| | 1,42 | 1,39 | 1,41 | 144 | 41,60 | 0,14 | 0,69 | 1,73 | 55,30 | 63,00 |
| | 1,18 | 1,17 | 1,18 | 192 | 35,02 | 0,12 | 0,81 | 1,46 | 64,84 | 73,87 |
| | 0,26 | 0,13 | 0,20 | 240 | 6,51 | 0,02 | 0,83 | 0,27 | 66,61 | 75,89 |

Anexo B.4: Balance de masa pruebas de lixiviación ISO-pH

Tabla 52: Balance de masa pruebas de lixiviación ISO-pH mineral oxido

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) | Extra. Soluc (%) |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Oxido Blanco | 0,28 | 490,39 | 1,37 | 500,10 | 3,22 | 57,41 | 45,06 |
| Oxido L-20886 20 ppm | 0,25 | 484,37 | 1,20 | 499,30 | 3,22 | 62,53 | 71,94 |
| Oxido L-20886 50 ppm | 0,27 | 485,17 | 1,29 | 500,50 | 3,22 | 59,87 | 67,05 |
| Oxido L-21199 20 ppm | 0,29 | 489,84 | 1,41 | 500,30 | 3,22 | 56,31 | 49,27 |
| Oxido L-21199 50 ppm | 0,24 | 488,61 | 1,15 | 499,70 | 3,22 | 64,26 | 53,56 |
| Oxido L-15767 20 ppm | 0,22 | 486,00 | 1,07 | 500,00 | 3,22 | 66,66 | 66,94 |
| Oxido L-15767 50 ppm | 0,23 | 483,91 | 1,13 | 501,30 | 3,23 | 64,88 | 84,46 |
| | | | | | 3,22 | 60,84 | 62,39 |

Tabla 53: Balance de masa pruebas de lixiviación ISO-pH mineral mixto

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) | Extra. Soluc (%) |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Mixto Blanco | 0,31 | 488,99 | 1,51 | 500,00 | 3,09 | 51,24 | 53,84 |
| Mixto L-20886 20 ppm | 0,26 | 489,28 | 1,26 | 500,50 | 3,10 | 59,34 | 53,90 |
| Mixto L-20886 50 ppm | 0,31 | 488,19 | 1,52 | 500,30 | 3,09 | 50,78 | 58,27 |
| Mixto L-21199 20 ppm | 0,28 | 488,31 | 1,38 | 500,00 | 3,09 | 55,33 | 57,43 |
| Mixto L-21199 50 ppm | 0,26 | 489,53 | 1,29 | 499,70 | 3,09 | 58,13 | 50,91 |
| Mixto L-15767 20 ppm | 0,22 | 485,85 | 1,07 | 498,90 | 3,09 | 65,43 | 61,05 |
| Mixto L-15767 50 ppm | 0,28 | 490,54 | 1,39 | 500,30 | 3,09 | 55,07 | 48,00 |
| | | | | | 3,09 | 56,98 | 56,79 |

Tabla 54: Balance de masa pruebas de lixiviación ISO-pH mineral sulfuro

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) | Extra. Soluc (%) |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Sulfuro Blanco | 0,95 | 492,32 | 4,68 | 500,60 | 5,61 | 16,57 | 24,34 |
| Sulfuro L-20886 20 ppm | 1,09 | 486,81 | 5,31 | 500,20 | 5,61 | 5,35 | 40,26 |
| Sulfuro L-20886 50 ppm | 1,05 | 487,62 | 5,11 | 500,00 | 5,60 | 8,86 | 33,67 |
| Sulfuro L-21199 20 ppm | 0,96 | 489,53 | 4,71 | 499,50 | 5,60 | 15,92 | 29,37 |
| Sulfuro L-21199 50 ppm | 0,88 | 488,53 | 4,28 | 500,50 | 5,61 | 23,67 | 34,72 |
| Sulfuro L15767 20 ppm | 0,76 | 489,84 | 3,74 | 499,90 | 5,60 | 33,33 | 33,14 |
| Sulfuro L15767 50 ppm | 0,79 | 487,62 | 3,85 | 500,10 | 5,60 | 31,31 | 28,77 |
| | | | | | 5,60 | 21,00 | 32,45 |

Anexo B.5: Balance de masa pruebas de lixiviación columnas unitarias

Tabla 55: Balance de masa pruebas de lixiviación columnas mineral óxido

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) | Extra. Soluc (%) |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Oxido Banco | 0,21 | 3737,24 | 7,95 | 3950,0 | 25,44 | 68,74 | 62,93 |
| Oxido Banco (2) | 0,26 | 3839,56 | 9,91 | 4063,0 | 26,17 | 62,14 | 62,26 |
| Oxido L-20886 20 ppm | 0,34 | 3719,20 | 12,50 | 4012,0 | 25,84 | 51,60 | 57,47 |
| Oxido L-20886 50 ppm | 0,22 | 3697,68 | 8,00 | 4062,0 | 26,16 | 69,43 | 60,33 |
| Oxido L-21199 20 ppm | 0,21 | 3726,68 | 7,68 | 4076,0 | 26,25 | 70,75 | 64,66 |
| Oxido L-21199 50 ppm | 0,22 | 3668,08 | 8,19 | 4033,0 | 25,97 | 68,47 | 64,96 |
| Oxido L-15767 20 ppm | 0,20 | 3551,40 | 7,19 | 3996,0 | 25,73 | 72,04 | 73,99 |
| Oxido L-15767 50 ppm | 0,31 | 3870,80 | 11,95 | 4019,0 | 25,88 | 53,82 | 69,53 |
| Oxido Surfact. C-H | 0,28 | 3779,48 | 10,46 | 3962,0 | 25,52 | 59,02 | 56,66 |
| | | | | | 25,88 | 64,00 | 63,64 |

Tabla 56: Balance de masa pruebas de lixiviación columnas mineral mixto

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) | Extra. Soluc (%) |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Mixto Blanco | 0,34 | 3919,56 | 13,43 | 3981,0 | 25,64 | 47,63 | 17,67 |
| Mixto Blanco (2) | 0,24 | 3845,24 | 9,34 | 4091,0 | 26,35 | 64,55 | 45,56 |
| Mixto L-20886 20 ppm | 0,28 | 3823,20 | 10,88 | 4026,0 | 25,93 | 58,02 | 59,29 |
| Mixto L-20886 50 ppm | 0,26 | 3617,92 | 9,52 | 4072,0 | 26,22 | 63,70 | 69,46 |
| Mixto L-21199 20 ppm | 0,29 | 3948,36 | 11,26 | 4053,0 | 26,10 | 56,87 | 33,13 |
| Mixto L-21199 50 ppm | 0,25 | 3488,52 | 8,72 | 4029,0 | 25,95 | 66,40 | 65,38 |
| Mixto L-15767 20 ppm | 0,23 | 3788,88 | 8,67 | 4074,0 | 26,24 | 66,95 | 62,39 |
| Mixto L-15767 50 ppm | 0,27 | 3801,24 | 10,31 | 4005,0 | 25,79 | 60,04 | 48,71 |
| | | | | | 26,03 | 60,52 | 50,20 |

Tabla 57: Balance de masa pruebas de lixiviación columnas mineral sulfuro

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) | Extra. Soluc (%) |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|
| Sulfuro Blanco | 1,04 | 3705,24 | 38,42 | 3957,00 | 50,97 | 24,61 | 28,12 |
| Sulfuro Blanco (2) | 0,90 | 3779,56 | 33,95 | 4006,00 | 51,60 | 34,21 | 29,01 |
| Sulfuro L-20886 20 ppm | 0,96 | 3764,08 | 36,30 | 4015,00 | 51,71 | 29,80 | 27,00 |
| Sulfuro L-20886 50 ppm | 1,13 | 3324,48 | 37,52 | 3966,00 | 51,08 | 26,55 | 36,71 |
| Sulfuro L-21199 20 ppm | 0,79 | 3940,92 | 30,96 | 4089,00 | 52,67 | 41,21 | 23,98 |
| Sulfuro L-21199 50 ppm | 0,81 | 3889,40 | 31,68 | 4097,00 | 52,77 | 39,96 | 34,56 |
| Sulfuro L-15767 20 ppm | 0,87 | 3767,12 | 32,78 | 3962,00 | 51,03 | 35,77 | 31,24 |
| Sulfuro L-15767 50 ppm | 1,11 | 3898,88 | 43,23 | 4067,00 | 52,38 | 17,48 | 26,89 |
| | | | | | 51,78 | 31,20 | 29,69 |

Anexo B.6: Balance de masa pruebas de lixiviación columnas unitarias recirculación

Tabla 58: Balance de masa pruebas de lixiviación columnas mineral óxido con recirculación

| Mineral | CuT Ripios (%) | Masa Ripio (g) | Fino Ripio (g) | Masa Cabeza (g) | Fino Cabeza (g) | Extracción solid (%) |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| Surfact. C-H 20 ppm | 0,22 | 3798,20 | 8,51 | 3925,0 | 25,28 | 66,32 |
| Blanco | 0,23 | 3833,84 | 8,73 | 4058,0 | 26,13 | 66,60 |
| L-20886 20ppm | 0,30 | 3868,84 | 11,80 | 4063,0 | 26,17 | 54,92 |
| L-15767 20ppm | 0,20 | 3806,88 | 7,55 | 4068,0 | 26,20 | 71,18 |
| L-21199 20ppm | 0,23 | 3843,40 | 8,82 | 4042,0 | 26,03 | 66,11 |
| | | | | | 25,96 | 65,02 |

ANEXO C

**Tabla de datos pH y potencial (Eh) pruebas de
lixiviación en columnas**

Anexo C.1: Tabla de pH y potencial (Eh) pruebas de lixiviación columnas unitarias

Tabla 59: Tabla de pH y potencial (Eh) pruebas de lixiviación columnas unitarias mineral óxido

| Prueba | pH | Eh (mV) |
|-----------------------|------|---------|
| Columna Blanco | 1,30 | 542,0 |
| | 1,16 | 544,5 |
| | 1,38 | 529,7 |
| | 1,45 | 528,0 |
| | 1,36 | 531,2 |
| | 1,27 | 536,0 |
| Columna Blanco (2) | 1,46 | 526,2 |
| | 1,44 | 527,4 |
| | 1,43 | 527,9 |
| | 1,31 | 534,9 |
| | 1,17 | 542,9 |
| | 1,37 | 531,0 |
| Columna L-15767 20ppm | 1,27 | 535,7 |
| | 1,30 | 533,9 |
| | 1,28 | 535,7 |
| | 1,46 | 524,7 |
| | 1,73 | 509,2 |
| | 1,50 | 523,2 |
| Columna L-15767 50ppm | 1,12 | 545,2 |
| | 1,18 | 541,9 |
| | 1,38 | 530,0 |
| | 1,34 | 532,2 |
| | 1,41 | 528,2 |
| | 1,68 | 512,0 |

| Prueba | pH | Eh (mV) |
|-----------------------|------|---------|
| Columna L-20886 20ppm | 1,23 | 539,0 |
| | 1,10 | 546,5 |
| | 1,37 | 530,2 |
| | 1,22 | 539,2 |
| | 1,49 | 523,4 |
| | 1,44 | 525,7 |
| Columna L-20886 50ppm | 1,22 | 539,7 |
| | 1,19 | 541,1 |
| | 1,28 | 535,9 |
| | 1,59 | 518,0 |
| | 1,41 | 529,3 |
| | 1,42 | 528,6 |
| Columna L-21199 20ppm | 1,28 | 535,6 |
| | 1,27 | 536,2 |
| | 1,31 | 533,6 |
| | 1,49 | 526,1 |
| | 1,54 | 520,1 |
| | 1,34 | 532,1 |
| Columna L-21199 50ppm | 1,23 | 539,1 |
| | 1,14 | 544,0 |
| | 1,26 | 536,4 |
| | 1,40 | 528,7 |
| | 1,49 | 522,8 |
| | 1,65 | 513,3 |

Tabla 60: Tabla de pH y potencial (Eh) pruebas de lixiviación columnas unitarias mineral mixto

| Prueba | pH | Eh (mV) |
|-----------------------|------|---------|
| Columna Blanco | 1,12 | 546,6 |
| | 1,16 | 544,2 |
| | 1,61 | 516,6 |
| | 1,32 | 535,2 |
| | 1,48 | 524,2 |
| | 1,29 | 536,2 |
| Columna Blanco (2) | 1,21 | 540,5 |
| | 1,18 | 541,9 |
| | 1,3 | 534,4 |
| | 1,23 | 538,6 |
| | 1,33 | 532,2 |
| | 1,36 | 530,5 |
| Columna L-15767 20ppm | 1,64 | 515,7 |
| | 1,4 | 530,4 |
| | 1,45 | 527,9 |
| | 1,43 | 529,0 |
| | 1,36 | 533,5 |
| | 1,38 | 531,9 |
| Columna L-15767 50ppm | 1,34 | 534,0 |
| | 1,35 | 533,3 |
| | 1,39 | 530,9 |
| | 1,29 | 537,2 |
| | 1,46 | 526,4 |
| | 1,56 | 520,4 |

| Prueba | pH | Eh (mV) |
|-----------------------|------|---------|
| Columna L-20886 20ppm | 1,88 | 502,9 |
| | 1,84 | 505,5 |
| | 2,14 | 487,3 |
| | 1,66 | 516,1 |
| | 1,47 | 527,9 |
| | 1,47 | 528,3 |
| Columna L-20886 50ppm | 1,81 | 506,9 |
| | 1,57 | 522,0 |
| | 1,53 | 524,0 |
| | 1,43 | 530,2 |
| | 1,44 | 529,8 |
| | 1,98 | 496,8 |
| Columna L-21199 20ppm | 1,13 | 545,9 |
| | 1,16 | 544,1 |
| | 1,31 | 534,4 |
| | 1,41 | 529,1 |
| | 1,61 | 517,0 |
| | 1,33 | 534,3 |
| Columna L-21199 50ppm | 1,48 | 526,2 |
| | 1,4 | 531,1 |
| | 1,37 | 533,7 |
| | 1,42 | 530,2 |
| | 1,42 | 530,4 |
| | 1,43 | 529,8 |

Tabla 61: Tabla de pH y potencial (Eh) pruebas de lixiviación columnas unitarias mineral sulfuro

| Prueba | pH | Eh (mV) |
|-----------------------|------|---------|
| Columna Blanco | 1,08 | 550,9 |
| | 1,11 | 548,1 |
| | 1,22 | 541,7 |
| | 1,27 | 539,2 |
| | 1,3 | 537,3 |
| | 1,2 | 544,0 |
| Columna Blanco (2) | 0,77 | 565,4 |
| | 0,86 | 559,6 |
| | 1,04 | 548,6 |
| | 1,1 | 545,7 |
| | 1,25 | 536,9 |
| | 1,09 | 546,6 |
| Columna L-15767 20ppm | 0,46 | 586,8 |
| | 0,74 | 570,7 |
| | 0,96 | 556,9 |
| | 1,14 | 546,9 |
| | 1,1 | 548,4 |
| | 1,17 | 544,7 |
| Columna L-15767 50ppm | 0,82 | 565,7 |
| | 0,88 | 561,9 |
| | 1,04 | 551,8 |
| | 1,3 | 536,4 |
| | 1,34 | 534,1 |
| | 1,34 | 534,4 |

| Prueba | pH | Eh (mV) |
|-----------------------|------|---------|
| Columna L-20886 20ppm | 0,86 | 563,7 |
| | 0,97 | 556,6 |
| | 1,11 | 548,0 |
| | 1,22 | 542,1 |
| | 1,74 | 511,6 |
| | 2,18 | 484,5 |
| Columna L-20886 50ppm | 0,45 | 587,8 |
| | 0,72 | 570,5 |
| | 0,89 | 561,0 |
| | 1,12 | 547,4 |
| | 1,23 | 541,1 |
| | 1,36 | 533,3 |
| Columna L-21199 20ppm | 0,8 | 567,6 |
| | 1,04 | 552,6 |
| | 1,14 | 546,1 |
| | 1,19 | 543,4 |
| | 1,23 | 541,7 |
| | 1,26 | 540,2 |
| Columna L-21199 50ppm | 0,89 | 560,5 |
| | 1,04 | 551,2 |
| | 1,13 | 546,5 |
| | 1,18 | 541,9 |
| | 1,25 | 538,2 |
| | 1,48 | 525,0 |

ANEXO D

**DRX, tabla de densidad, tensión superficial,
viscosidad y consumo de ácido pruebas de
lixiviación en columnas e ISO-pH**

Anexo D.1: Difracción de rayos X muestras de cabeza y ripios

Tabla 62: Difracción de rayos X muestra de cabeza óxido

| | | Ox- 3/4 | Ox- 1/2 | OX- 3/8 | OX- 1/4 | Ox- # 10 | Ox- # 20 | Ox- # - 20 |
|------------------|--|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|---------------|
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Albita Cálctica | $(\text{Na}_{0,75}\text{Ca}_{0,25})(\text{Al}_{1,26}\text{Si}_{2,74}\text{O}_8)]$ | 34,97 | 31,4 | 28,77 | 28,04 | 24,32 | 21,31 | 19,25 |
| Cuarzo | SiO_2 | 31,54 | 34,72 | 36,77 | 38,01 | 33,33 | 37,99 | 36,15 |
| Moscovita | $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ | 10,75 | 3,93 | 6,44 | 11,3 | 10,58 | 17,11 | 15,74 |
| Biotita | $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{+2})_3(\text{Al},\text{Fe}^{+3})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ | 8,26 | 10,16 | 9,71 | 10,84 | 10,89 | 7,61 | 1,76 |
| Calcosiderita | $\text{CuFe}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \times 4\text{H}_2\text{O}$ | 7,8 | 5,06 | 5,68 | 4,17 | 4,58 | 4,72 | 6,28 |
| Clorita | $(\text{Mg},\text{Fe})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | 3,15 | 3,2 | 3,23 | 2,52 | 3,32 | 3,11 | 4,27 |
| Yeso | $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ | 2,37 | x | x | x | x | 0,58 | 3,95 |
| Ortoclasa | KAlSi_3O_8 | 1,01 | 9,19 | 7,26 | 5,01 | 12,75 | 7,57 | 10,18 |
| Braunita | $\text{CaMn}_{14}\text{SiO}_{24}$ | 0,15 | 0,17 | 0,31 | 0,11 | 0,12 | x | 0,37 |
| Hematita | Fe_2O_3 | x | 2,17 | 1,83 | x | x | x | 1,56 |
| Ferroactinolita | $\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ | x | x | x | x | 0,11 | x | x |
| Atacamita | $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ | x | x | x | x | x | x | 0,49 |

Tabla 63: Difracción de rayos X muestra de cabeza mixto

| | | Mix- 3/4 | Mix- 1/2 | Mix- 3/8 | Mix- 1/4 | Mix- # 10 | Mix- # 20 | Mix- # -20 |
|------------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Cuarzo | SiO_2 | 40,66 | 43,15 | 35,82 | 45,12 | 43,09 | 39,2 | 41,69 |
| Albita Cálctica | $(\text{Na}_{0,75}\text{Ca}_{0,25})(\text{Al}_{1,26}\text{Si}_{2,74}\text{O}_8)]$ | 33,32 | 22,19 | 30,04 | 26,91 | 19,74 | 23,86 | 16,66 |
| Ortoclasa | KAlSi_3O_8 | 10,13 | 6,74 | 8,59 | 3,73 | 7,77 | 6,33 | 6,12 |
| Biotita | $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{+2})_3(\text{Al},\text{Fe}^{+3})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ | 6,24 | 3,24 | 3,89 | 3,78 | x | 2,82 | 0,86 |
| Biotita | $\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{11}(\text{OH})_2$ | x | x | x | x | 2,39 | x | x |
| Calcosiderita | $\text{CuFe}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \times 4\text{H}_2\text{O}$ | 4,35 | 2,41 | 3,4 | 1,91 | 1,55 | 1,17 | 0,79 |
| Clorita | $(\text{Mg},\text{Fe})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | 2,75 | 2,88 | 2,31 | 3,14 | 2,54 | 2,48 | 2,76 |
| Moscovita | $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ | 2,12 | 17,79 | 12,07 | 14,86 | 21,89 | 23,4 | 25,02 |
| Pirita | FeS_2 | 0,17 | 1,4 | 0,11 | 0,11 | 0,63 | 0,61 | 0,78 |

| | | | | | | | | |
|-------------|--------------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|
| Yeso | CaSO ₄ x2H ₂ O | 0,16 | x | x | x | x | x | 3,72 |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | 0,1 | x | x | x | x | x | x |
| Digenita | Cu ₉ S ₅ | x | 0,2 | x | x | x | x | x |
| Tenorita | CuO | x | x | 0,39 | 0,24 | 0,27 | x | x |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | x | x | 3,38 | x | x | x | x |
| Braunita | CaMn ₁₄ SiO ₂₄ | x | x | x | 0,2 | 0,13 | x | 0,49 |
| Calcosina | Cu ₂ S | x | x | x | x | x | 0,13 | 1,11 |

Tabla 64: Difracción de rayos X muestra de cabeza sulfuro

| | | Sulf- 3/4 | Sulf- 1/2 | Sulf- 3/8 | Sulf- 1/4 | Sulf- # 10 | Sulf- # 20 | Sulf- # - 20 |
|------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|---------------|-----------------|
| Nombre/Compuesto | Fórmula | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| Cuarzo | SiO ₂ | 52,36 | 57,83 | 58,67 | 63,93 | 64,50 | 54,93 | 51,39 |
| Moscovita | KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂] | 14,58 | 15,55 | 17,27 | 15,93 | 13,81 | 16,25 | 24,06 |
| Ortoclasa | KAlSi ₃ O ₈ | 14,09 | 15,80 | 12,91 | 13,68 | 14,24 | 14,81 | 13,73 |
| Albita Cálcida | (Na _{0,75} Ca _{0,25})(Al _{1,26} Si _{2,74} O ₈)] | 10,88 | 9,57 | 9,79 | 5,45 | 5,99 | 5,78 | 6,27 |
| Caolinita | Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | 6,83 | x | x | x | x | 6,15 | x |
| Pirita | FeS ₂ | 0,41 | 0,13 | 0,84 | 0,63 | 1,16 | 1,13 | 0,91 |
| Tenorita | CuO | 0,26 | 0,58 | 0,52 | x | x | 0,38 | 0,40 |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | x | x | x | x | x | x | 0,59 |
| Jarosita | (KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | x | 0,23 | x | x | x | x | x |
| Clorita | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | x | 0,31 | x | x | x | x | x |
| Calcosina | Cu ₂ S | x | x | x | x | x | 0,95 | 0,87 |
| Yeso | CaSO ₄ x2H ₂ O | x | x | x | x | x | x | 2,77 |

Tabla 65: Difracción de rayos X muestra ripio óxido

| Nombre/Compuesto | Fórmula | Ox- 3/4 (%) | Ox- 1/2 (%) | OX- 3/8 (%) | OX- 1/4 (%) | Ox- # 10 (%) | Ox- # 20 (%) | Ox- # -20 (%) |
|----------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Cuarzo | SiO ₂ | 33,79 | 39,84 | 34,08 | 41,15 | 35,71 | 35,43 | 39,27 |
| Moscovita | KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ | x | 1,71 | 7,58 | 7,39 | 7,76 | 8,23 | 6,94 |
| Albita Cálcica | (Na _{0,75} Ca _{0,25})(Al _{1,26} Si _{2,74} O ₈) | 22,87 | 28,07 | 29,22 | 30,22 | 29,30 | 25,76 | 27,21 |
| Clorita | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 2,84 | 1,78 | 2,99 | 2,39 | 3,22 | 2,75 | 3,47 |
| Ortoclasa | KAlSi ₃ O ₈ | 6,82 | 7,95 | 7,76 | 4,31 | 4,92 | 9,93 | 5,33 |
| Biotita | K(Mg,Fe ⁺²) ₃ (Al,Fe ⁺³)Si ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂ | x | 12,69 | 7,49 | 10,90 | 10,68 | 9,74 | 13,31 |
| Biotita-2M1 | KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ | 7,06 | x | x | x | x | x | x |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | x | 1,85 | x | x | x | x | 1,81 |
| Braunita | CaMn ₁₄ SiO ₂₄ | 0,12 | 0,17 | 0,12 | 0,30 | 0,13 | x | 0,12 |
| Calcosiderita | CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ x4H ₂ O | 2,83 | 1,79 | 3,22 | 2,15 | 2,12 | 3,03 | 2,04 |
| Atacamita | Cu ₂ Cl(OH) ₃ | x | x | x | x | x | x | 0,10 |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | x | x | x | x | x | x | 0,16 |
| Montmorillonita-15Å | Ca _{0,2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O | x | 2,70 | x | x | x | x | x |
| Montmorillonita-18Å | Na _{0,3} (AlMg) ₂ Si ₄ O ₁₀ OH ₂ ·6H ₂ O | x | 1,00 | x | x | 4,21 | x | x |
| Laumontita (zeolita) | Ca ₄ Al ₈ Si ₁₆ O ₄₈ ·14H ₂ O | x | x | 6,16 | x | x | x | x |
| Dioptasa | CuSiO ₃ ·H ₂ O | x | x | 0,56 | x | x | x | x |
| Crednerita | Cu(Cu _{0,04} Mn _{0,96})O ₂ | x | x | 0,43 | 0,37 | x | x | x |
| Criptomelano | K _{2-x} Mn ₈ O ₁₆ | x | x | 0,11 | x | 0,10 | x | x |
| Calcosina | Cu ₂ S | 0,35 | x | x | 0,29 | x | 0,21 | x |
| Thenardita | Na ₂ SO ₄ | x | x | x | 0,13 | 1,23 | x | x |
| Jarosita | K(Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆) | x | x | x | x | 0,10 | x | x |
| Tenorita | CuO | x | 0,15 | x | x | 0,16 | x | x |
| Moscovita-3T | (K,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si _{3,1} Al _{0,9})O ₁₀ (OH) ₂ | 18,67 | x | x | x | x | x | x |
| Manganita | MnO(OH) | 0,50 | 0,30 | 0,28 | 0,40 | 0,36 | 0,67 | 0,24 |
| Cristobalita | SiO ₂ | x | x | x | x | x | 0,14 | x |
| Halloysita-7Å | Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | x | x | x | x | x | 4,11 | x |
| Ilmenita | FeTiO ₃ | 0,30 | x | x | x | x | x | x |
| Bassanita | CaSO ₄ ·0.5H ₂ O | 1,87 | x | x | x | x | x | x |
| Sepiolita | Mg ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ ·6H ₂ O | 1,60 | x | x | x | x | x | x |
| Saponita-15Å | Ca _{0,2} Mg ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O | 0,20 | x | x | x | x | x | x |
| Digenita | Cu ₉ S ₅ | 0,18 | x | x | x | x | x | x |

Tabla 66: Difracción de rayos X muestra ripio mixto

| Nombre/Compuesto | Fórmula | Mix- 3/4 (%) | Mix- 1/2 (%) | Mix- 3/8 (%) | Mix- 1/4 (%) | Mix- # 10 (%) | Mix- # 20 (%) | Mix- # -20 (%) |
|----------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Cuarzo | SiO ₂ | 35,23 | 31,68 | 41,43 | 29,59 | 29,05 | 46,18 | 35,23 |
| Albita Cálcida | (Na _{0,75} Ca _{0,25})(Al _{1,26} Si _{2,74} O ₈) | 31,09 | 24,73 | 28,25 | 25,97 | 26,63 | 26,00 | 26,36 |
| Clorita | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 2,87 | 4,57 | 5,25 | 4,78 | 5,76 | 3,43 | 6,25 |
| Moscovita | KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ | 5,82 | x | x | x | x | x | x |
| Biotita-2M1 | KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂ | 7,35 | 5,36 | x | 4,04 | x | x | x |
| Ortoclasa | KAlSi ₃ O ₈ | 7,63 | 11,91 | 4,61 | 8,25 | 11,17 | 7,63 | 7,61 |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | 5,27 | 1,98 | 2,24 | 1,59 | 3,42 | x | x |
| Calcosiderita | CuFe ₆ (PO ₄) ₄ (OH) ₈ ·4H ₂ O | 3,62 | 1,59 | 2,70 | 1,68 | 0,81 | 0,50 | 0,30 |
| Lammerita | Cu ₃ (AsO ₄) ₂ | 0,20 | x | x | x | x | x | x |
| Tenorita | CuO | 0,67 | x | 0,19 | x | x | x | x |
| Natrojarosita | NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | 0,10 | x | x | 0,22 | x | x | x |
| Hematofanita | Pb ₄ Fe ₃ O ₈ Cl | 0,15 | x | x | x | x | x | x |
| Moscovita IT T | (K,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si _{3,1} Al _{0,9})O ₁₀ (OH) ₂ | x | 5,76 | x | x | x | x | x |
| Molysita | FeCl ₃ | x | 0,31 | x | x | 0,96 | x | x |
| Braunita | CaMn ₁₄ SiO ₂₄ | x | 0,15 | 0,10 | 0,16 | x | x | 0,16 |
| Montmorillonita-15Å | Ca _{0.2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O | x | 8,81 | x | x | x | x | x |
| Manganita | MnO(OH) | x | 0,11 | 3,30 | 8,69 | x | x | x |
| Tridimita | SiO ₂ | x | 0,89 | 0,34 | 1,50 | 1,52 | x | 2,85 |
| Moscovita-3T | (K,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si _{3,1} Al _{0,9})O ₁₀ (OH) ₂ | x | x | 10,16 | 12,95 | 18,42 | 3,90 | 6,57 |
| Ilmenita | FeTiO ₃ | x | x | 0,43 | 0,46 | 0,79 | 0,17 | x |
| Jarosita | KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | x | x | 0,12 | x | x | x | x |
| Thenardita | Na ₂ SO ₄ | x | x | 0,50 | x | x | x | x |
| Criptomelano | K _{2-x} Mn ₈ O ₁₆ | x | x | 0,15 | x | 0,38 | x | x |
| Pirita | FeS ₂ | x | x | 0,23 | 0,12 | 0,15 | 0,21 | 0,23 |
| Calcosina | Cu ₂ S | x | x | x | x | x | x | 0,37 |
| Hidroniojarosita | (K,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | x | 1,95 | x | x | 0,35 | x | x |
| Bixbyita | Mn ₂ O ₃ | x | x | x | x | 0,11 | x | x |
| Siderita | FeCO ₃ | x | x | x | x | 0,48 | x | x |
| Pirofilita | Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | x | x | x | x | x | 8,75 | x |
| Heulandita | Ca _{4.52} Al _{9.04} Si _{26.96} O ₇₂ (H ₂ O) _{13.4} | x | x | x | x | x | 3,23 | x |
| Estevensita-15Å | Ca _{0.2} Mg _{2.9} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O | x | x | x | x | x | x | 0,64 |
| Kinoita | Ca ₂ Cu ₂ Si ₃ O ₁₀ ·2H ₂ O | x | x | x | x | x | x | 1,97 |
| Laumontita (zeolita) | CaAl ₂ Si ₄ O ₁₂ ·4H ₂ O | x | x | x | x | x | x | 10,27 |
| Bassanita | CaSO ₄ ·0.5H ₂ O | x | x | x | x | x | x | 1,19 |
| Digenita | Cu ₉ S ₅ | x | 0,20 | x | x | x | x | x |

Tabla 67: Difracción de rayos X muestra ripio sulfuro

| Nombre/Compuesto | Fórmula | Sulf- 3/4 (%) | Sulf- 1/2 (%) | Sulf- 3/8 (%) | Sulf- 1/4 (%) | Sulf- # 10 (%) | Sulf- # 20 (%) | Sulf- # - 20 (%) |
|---------------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------|
| Cuarzo | SiO ₂ | 44,11 | 49,38 | 50,37 | 46,68 | 48,73 | 47,77 | 53,98 |
| Moscovita-3T | (K,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si _{3,1} Al _{0,9})O ₁₀ (OH) ₂ | 21,37 | 17,76 | 20,12 | 3,13 | 17,22 | 26,57 | 13,00 |
| Albita | NaAlSi ₃ O ₈ | 11,29 | 12,37 | 9,63 | 10,36 | 12,27 | 12,76 | 11,80 |
| Ortoclasa | KAlSi ₃ O ₈ | 7,15 | 11,95 | 12,69 | 12,16 | 14,38 | 7,22 | 12,28 |
| Clorita-1MIlb | (Mg ₅ Al)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | x | x | x | x | 0,58 | 0,89 | x |
| Ilmenita | FeTiO ₃ | 0,49 | x | x | x | x | 0,19 | x |
| Scheelita | CaMoO ₄ | x | x | x | x | x | 3,75 | x |
| Jarosita | KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | x | 0,32 | x | 1,60 | 0,61 | 0,11 | x |
| Tridimita | SiO ₂ | x | x | x | x | x | 0,10 | x |
| Tenorita | CuO | x | 0,20 | 0,21 | x | x | 0,25 | 0,34 |
| Calcosina | Cu ₂ S | x | x | x | x | x | 0,39 | 0,23 |
| Sepiolita | Mg ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ ·6H ₂ O | x | 0,17 | x | x | x | x | x |
| Sepiolita-(Mn) | Mn ₄ Fe ₅ Si ₁₂ O ₃₀ (OH) ₆ ·8H ₂ O | x | x | x | x | 0,18 | x | x |
| Manganita | MnO(OH) | x | 0,37 | x | 0,49 | 1,73 | x | 2,92 |
| Dickita-2M1 | Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | x | 7,05 | x | x | x | x | x |
| Rejalgar | AsS | x | 0,25 | x | x | x | x | x |
| Digenita | Cu ₉ S ₅ | x | 0,18 | x | 0,82 | 1,04 | x | 0,72 |
| Caolinita | Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | 11,81 | x | 4,29 | 23,09 | x | x | x |
| Bixbyita | Mn ₂ O ₃ | x | x | 0,14 | 0,44 | x | x | 0,14 |
| Molysita | FeCl ₃ | 2,28 | x | x | 1,13 | 1,83 | x | x |
| Paramelaconita | 6CuO·Cu ₂ O | x | x | 0,16 | 0,10 | x | x | x |
| Saponita-17Å | Na _{0,3} Mg ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·6H ₂ O | x | x | 0,70 | x | x | x | x |
| Saponita-15Å | Ca _{0,2} Mg ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O | x | x | 0,60 | x | x | x | x |
| Alumbre sódico | NaAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O | x | x | 0,70 | x | x | x | x |
| Zunyita | Al ₁₃ Si ₅ O ₂₀ [(OH) ₁₄ F ₄]Cl | x | x | 0,39 | x | x | x | x |
| Beidellita-12Å | Na _{0,3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·2H ₂ O | x | x | x | x | 0,30 | x | x |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | x | x | x | x | 0,28 | x | x |
| Criptomelano | K _{2-x} Mn ₈ O ₁₆ | 0,29 | x | x | x | 0,85 | x | x |
| Hidroniojarosita | (K,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ | 0,15 | x | x | x | x | x | 0,21 |
| Pirofilita | Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | x | x | x | x | x | x | 1,59 |
| Montmorillonita-21Å | Na _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·8H ₂ O | x | x | x | x | x | x | 2,68 |
| Calcopirita | CuFeS ₂ | x | x | x | x | x | x | 0,11 |
| Pirita | FeS ₂ | 1,06 | x | x | x | x | x | x |

Anexo D.2: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido pruebas columnas unitarias

Tabla 68: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido mineral óxido pruebas columnas unitarias

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | blanco | - | 1,014 | 75,88 | 56,75 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | blanco | - | 1,016 | 68,62 | 60,65 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | blanco | - | 1,007 | 73,85 | 64,25 | 8,93 |
| Muestra 4 | 6 | blanco | - | 1,007 | 64,29 | 66,50 | 8,87 |
| Muestra 5 | 8 | blanco | - | 1,006 | 71,22 | 56,50 | 8,16 |
| Muestra 6 | 10 | blanco | - | 1,004 | 61,91 | 66,10 | 7,29 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | blanco 2 | - | 1,012 | 69,89 | 53,90 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | blanco 2 | - | 1,011 | 90,30 | 53,30 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | blanco 2 | - | 1,008 | 73,73 | 57,70 | 6,40 |
| Muestra 4 | 6 | blanco 2 | - | 1,008 | 69,06 | 60,25 | 3,63 |
| Muestra 5 | 8 | blanco 2 | - | 1,007 | 68,35 | 56,25 | 0,91 |
| Muestra 6 | 10 | blanco 2 | - | 1,004 | 84,31 | 57,25 | 8,70 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 20 ppm | 1,032 | 76,53 | 67,55 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 20 ppm | 1,013 | 68,40 | 73,65 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 20 ppm | 1,006 | 62,87 | 72,90 | 1,34 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 20 ppm | 1,004 | 64,26 | 74,40 | 11,11 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 20 ppm | 1,004 | 70,07 | 74,35 | 14,12 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 20 ppm | 1,007 | 70,04 | 74,20 | 9,01 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 50 ppm | 1,031 | 69,39 | 63,65 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 50 ppm | 1,022 | 89,60 | 66,55 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 50 ppm | 1,009 | 76,47 | 70,20 | 1,11 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 50 ppm | 1,005 | 57,06 | 65,10 | 13,35 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 50 ppm | 1,005 | 64,46 | 71,20 | 10,89 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 50 ppm | 1,005 | 58,54 | 71,85 | 10,74 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 20 ppm | 1,029 | 77,51 | 62,00 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 20 ppm | 1,028 | 81,76 | 73,90 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 20 ppm | 1,010 | 80,05 | 68,85 | 0,42 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 20 ppm | 1,007 | 74,03 | 59,70 | 9,27 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 20 ppm | 1,004 | 61,20 | 61,00 | 17,92 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 20 ppm | 1,007 | 69,14 | 61,75 | 14,10 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 50 ppm | 1,014 | 88,27 | 50,45 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 50 ppm | 1,009 | 83,87 | 50,40 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 50 ppm | 1,003 | 77,48 | 50,30 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 50 ppm | 1,005 | 62,77 | 50,00 | 0,88 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 50 ppm | 1,006 | 60,22 | 52,05 | 10,30 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 50 ppm | 1,005 | 69,85 | 51,60 | 17,37 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 20 ppm | 1,027 | 84,69 | 34,50 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 20 ppm | 1,018 | 78,35 | 42,00 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 20 ppm | 1,011 | 63,45 | 47,85 | 0,42 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 20 ppm | 1,005 | 64,86 | 53,65 | 12,03 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 20 ppm | 1,007 | 71,42 | 55,10 | 10,90 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 20 ppm | 1,005 | 77,64 | 72,35 | 9,82 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 50 ppm | 1,033 | 70,84 | 27,35 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 50 ppm | 1,017 | 81,17 | 31,55 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 50 ppm | 1,009 | 78,68 | 41,15 | 1,34 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 50 ppm | 1,007 | 74,76 | 43,00 | 7,89 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 50 ppm | 1,004 | 59,61 | 49,90 | 16,65 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 50 ppm | 1,006 | 58,79 | 56,95 | 14,13 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) |
|-----------|---------------|--------------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Muestra 1 | 1 | Surfact. C-H | 20 | 1,028 | 70,05 | 54,05 |
| Muestra 2 | 2 | Surfact. C-H | 20 | 1,005 | 59,07 | 55,40 |
| Muestra 3 | 4 | Surfact. C-H | 20 | 1,003 | 73,14 | 50,60 |
| Muestra 4 | 6 | Surfact. C-H | 20 | 1,013 | 83,50 | 49,55 |
| Muestra 5 | 8 | Surfact. C-H | 20 | 1,007 | 69,93 | 51,25 |
| Muestra 6 | 10 | Surfact. C-H | 20 | 1,005 | 58,34 | 52,60 |

Tabla 69: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido mineral mixto pruebas columnas unitarias

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | blanco | - | 1,013 | 73,25 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | blanco | - | 1,010 | 71,90 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | blanco | - | 1,003 | 71,95 | 12,15 |
| Muestra 4 | 6 | blanco | - | 1,004 | 70,70 | 17,49 |
| Muestra 5 | 8 | blanco | - | 1,005 | 73,90 | 8,25 |
| Muestra 6 | 10 | blanco | - | 1,005 | 74,15 | 6,16 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | blanco 2 | - | 1,032 | 70,70 | 1,80 |
| Muestra 2 | 2 | blanco 2 | - | 1,019 | 59,00 | 3,63 |
| Muestra 3 | 4 | blanco 2 | - | 1,010 | 58,60 | 4,55 |
| Muestra 4 | 6 | blanco 2 | - | 1,007 | 67,15 | 6,39 |
| Muestra 5 | 8 | blanco 2 | - | 1,005 | 70,75 | 8,23 |
| Muestra 6 | 10 | blanco 2 | - | 1,004 | 73,00 | 10,07 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 20 | 1,012 | 56,15 | 12,61 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 20 | 1,014 | 65,45 | 16,80 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 20 | 1,007 | 64,40 | 22,10 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 20 | 1,006 | 56,80 | 17,68 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 20 | 1,006 | 58,20 | 6,22 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 20 | 1,005 | 56,90 | 9,34 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 50 | 1,059 | 61,70 | 1,11 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 50 | 1,011 | 57,10 | 7,14 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 50 | 1,009 | 65,45 | 9,57 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 50 | 1,008 | 57,85 | 7,87 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 50 | 1,007 | 57,85 | 8,60 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 50 | 1,002 | 55,10 | 20,51 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 20 | 1,052 | 74,20 | 0,19 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 20 | 1,009 | 66,70 | 3,46 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 20 | 1,005 | 74,40 | 8,65 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 20 | 1,006 | 74,40 | 8,79 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 20 | 1,006 | 74,30 | 5,84 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 20 | 1,005 | 74,35 | 7,40 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 50 | 1,020 | 52,20 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 50 | 1,014 | 53,15 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 50 | 1,010 | 53,45 | 3,18 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 50 | 1,008 | 48,80 | 0,80 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 50 | 1,004 | 52,15 | 9,82 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 50 | 1,003 | 50,95 | 15,18 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 20 | 1,011 | 53,75 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 20 | 1,010 | 56,05 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 20 | 1,007 | 54,20 | 4,33 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 20 | 1,004 | 55,40 | 15,08 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 20 | 1,006 | 57,10 | 10,86 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 20 | 1,005 | 72,25 | 7,97 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 50 | 1,024 | 36,15 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 50 | 1,013 | 39,10 | 1,80 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 50 | 1,008 | 42,60 | 7,54 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 50 | 1,007 | 43,00 | 8,98 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 50 | 1,007 | 45,25 | 9,34 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 50 | 1,003 | 21,25 | 13,80 |

Tabla 70: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido mineral sulfuro pruebas columnas unitarias

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | blanco | - | 1,022 | 60,65 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | blanco | - | 1,020 | 61,25 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | blanco | - | 1,008 | 60,70 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | blanco | - | 1,008 | 60,60 | 2,26 |
| Muestra 5 | 8 | blanco | - | 1,006 | 58,60 | 4,90 |
| Muestra 6 | 10 | blanco | - | 1,006 | 51,70 | 1,22 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | blanco 2 | - | 1,033 | 53,50 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | blanco 2 | - | 1,019 | 54,25 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | blanco 2 | - | 1,008 | 52,65 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | blanco 2 | - | 1,005 | 60,15 | 0,00 |
| Muestra 5 | 8 | blanco 2 | - | 1,003 | 60,00 | 6,86 |
| Muestra 6 | 10 | blanco 2 | - | 1,006 | 71,25 | 1,72 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 20 | 1,025 | 49,30 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 20 | 1,009 | 53,10 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 20 | 1,005 | 52,25 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 20 | 1,005 | 54,75 | 1,11 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 20 | 1,005 | 56,10 | 2,77 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 20 | 1,004 | 54,50 | 4,57 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 50 | 1,025 | 32,15 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 50 | 1,014 | 37,15 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 50 | 1,009 | 39,90 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 50 | 1,007 | 45,35 | 0,00 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 50 | 1,005 | 47,15 | 3,41 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 50 | 1,002 | 55,75 | 13,81 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 20 | 1,050 | 51,25 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 20 | 1,009 | 50,50 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 20 | 1,005 | 53,25 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 20 | 1,004 | 56,10 | 3,64 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 20 | 1,003 | 52,90 | 4,55 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 20 | 1,004 | 50,10 | 1,14 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 50 | 1,025 | 53,90 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 50 | 1,016 | 52,80 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 50 | 1,007 | 55,95 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 50 | 1,003 | 55,80 | 11,23 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 50 | 1,003 | 57,25 | 13,01 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 50 | 1,003 | 57,50 | 11,95 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 20 | 1,031 | 53,90 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 20 | 1,013 | 49,55 | 0,00 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 20 | 1,008 | 51,65 | 0,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 20 | 1,001 | 53,95 | 19,97 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 20 | 1,002 | 50,05 | 21,52 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 20 | 1,005 | 48,90 | 5,38 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Tensión sup. (N/m) | Consumo (kg/T) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 50 | 1,093 | 51,10 | 0,00 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 50 | 1,019 | 55,80 | 12,15 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 50 | 1,012 | 50,80 | 3,04 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 50 | 1,009 | 57,45 | 0,76 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 50 | 1,006 | 52,50 | 2,22 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 50 | 1,004 | 54,20 | 9,26 |

Anexo D.3: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido pruebas de lixiviación Columnar unitaria con recirculación

Tabla 71: Densidad, tensión superficial, viscosidad y consumo de ácido mineral óxido pruebas columnas unitarias con recirculación

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Muestra 1 | 1 | Blanco | - | 1,014 | 61,11 | 55,60 |
| Muestra 2 | 2 | Blanco | - | 1,005 | 69,11 | 50,45 |
| Muestra 3 | 4 | Blanco | - | 1,005 | 70,60 | 56,15 |
| Muestra 4 | 6 | Blanco | - | 1,006 | 76,71 | 48,30 |
| Muestra 5 | 8 | Blanco | - | 1,007 | 65,61 | 53,00 |
| Muestra 6 | 10 | Blanco | - | 0,998 | 77,11 | 68,15 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Muestra 1 | 1 | L-15767 | 20 | 1,014 | 66,49 | 60,20 |
| Muestra 2 | 2 | L-15767 | 20 | 1,002 | 85,31 | 59,25 |
| Muestra 3 | 4 | L-15767 | 20 | 1,005 | 66,04 | 57,15 |
| Muestra 4 | 6 | L-15767 | 20 | 1,006 | 70,80 | 58,35 |
| Muestra 5 | 8 | L-15767 | 20 | 0,997 | 68,13 | 53,15 |
| Muestra 6 | 10 | L-15767 | 20 | 0,993 | 88,28 | 54,80 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Muestra 1 | 1 | L-20886 | 20 | 1,022 | 67,26 | 65,50 |
| Muestra 2 | 2 | L-20886 | 20 | 1,009 | 77,74 | 64,45 |
| Muestra 3 | 4 | L-20886 | 20 | 1,013 | 65,44 | 63,75 |
| Muestra 4 | 6 | L-20886 | 20 | 1,010 | 82,18 | 49,05 |
| Muestra 5 | 8 | L-20886 | 20 | 1,012 | 87,41 | 46,10 |
| Muestra 6 | 10 | L-20886 | 20 | 1,002 | 69,73 | 51,35 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) |
|-----------|---------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Muestra 1 | 1 | L-21199 | 20 | 1,001 | 67,67 | 41,85 |
| Muestra 2 | 2 | L-21199 | 20 | 1,006 | 75,12 | 46,80 |
| Muestra 3 | 4 | L-21199 | 20 | 1,009 | 64,32 | 50,00 |
| Muestra 4 | 6 | L-21199 | 20 | 1,007 | 86,65 | 48,55 |
| Muestra 5 | 8 | L-21199 | 20 | 1,002 | 68,19 | 48,80 |
| Muestra 6 | 10 | L-21199 | 20 | 0,994 | 63,82 | 58,05 |

| | Tiempo (días) | Reactivo | Dosificación (ppm) | Densidad (g/cc) | Viscosidad (cP) | Tensión sup. (N/m) |
|-----------|---------------|--------------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Muestra 1 | 1 | Surfact. C-H | 20 | 1,011 | 60,29 | 62,75 |
| Muestra 2 | 2 | Surfact. C-H | 20 | 1,003 | 90,58 | 65,10 |
| Muestra 3 | 4 | Surfact. C-H | 20 | 1,004 | 61,72 | 71,30 |
| Muestra 4 | 6 | Surfact. C-H | 20 | 1,004 | 70,39 | 71,60 |
| Muestra 5 | 8 | Surfact. C-H | 20 | 1,002 | 61,63 | 70,10 |
| Muestra 6 | 10 | Surfact. C-H | 20 | 0,999 | 77,32 | 64,05 |