

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE
SISTEMA DE CONTROL EN PILA DE LIXIVIACIÓN DEL
LABORATORIO**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Técnico Universitario en
MINERÍA Y METALURGIA.

Alumno:

Carlos Andrés de la Paz Valencia

Profesor Guía:

Ingeniero Luis Augusto Gutiérrez
Meneses

RESUMEN

KEYWORDS: LIXIVIACION – CONTROL

La hidrometalurgia es la rama de la metalurgia la cual mediante medios acuosos busca concentrar el mineral, principalmente está pensada para óxidos de cobre, los cuales a medida que se han explotado con los años han ido disminuyendo su volumen y su ley, lo que actualmente genera un problema, ya que se está gastando más para producir menos cátodos de cobre por esta vía a como se hacía en años anteriores, por lo que empresas mineras están tratando de controlar mucho más los procesos presentes en la vía hidrometalúrgica, como lo es la lixiviación en pilas.

El presente trabajo de título busca que en el laboratorio de la universidad se cree una pila de lixiviación a la cual se le pueda medir y controlar variables críticas para que el proceso sea lo más eficiente y dentro de los rangos establecidos para que el estudiante sepa y pueda controlar estas variables.

En el primer capítulo, se habla a grandes rasgos de la lixiviación y de sus métodos para la concentración del mineral dependiendo las características del proceso, para luego profundizar en lo que es la lixiviación en pilas, la importancia del aglomerado y curado y las características en sí de la lixiviación en pilas para luego establecer una serie de variables que son importantes en el proceso, seleccionando las variables críticas como lo son el pH, potencial eléctrico y la tasa de riego.

En el segundo capítulo, se menciona que el método de control a utilizar en el proceso es el método de control concurrente en el cual se buscara medir las variables críticas, mediante sensores electrónicos, para que estas siempre estén en el rango deseado y la recuperación sea óptima. Para esto se buscaron distintos tipos de medidores de pH y formas de controlar el caudal, seleccionando el medidor de pH Edge de la empresa Hanna Instruments y las bajadas de suero para controlar la tasa de riego, ya que resulto muy caro medir y controlar esta variable mediante caudalímetros electrónicos.

En el tercer capítulo, ya que el laboratorio de la universidad no cuenta con pila de lixiviación, se dimensiono la pila y los elementos que se necesitan para construirla. Luego se presentan los sistemas de control para los métodos de medición y control elegidos en el capítulo dos, en cual para ambos casos el sistema será manual. Posteriormente, se presenta la inversión necesaria para la construcción de las quince pilas que se requieren construir en un año, la cual asciende a \$809.684 o 27,02 UF y de cómo sería la inversión si el proyecto fuera de dos o tres años. Por último, se presentan las vistas frontal, lateral y superior de una pila de lixiviación con sus distintas partes.

INDICE

RESUMEN.....	
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA.....	
A. SIGLAS	
B. SIMBOLOGÍA.....	
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1. CAPITULO: FUNDAMENTOS DE LA LIXIVIACIÓN	3
1.1 La Lixiviación	3
1.1.1 Métodos de lixiviación.....	3
1.2 Lixiviación en Pilas	5
1.2.1 Etapas previas a la lixiviación en pilas	7
1.2.2 Características de la lixiviación en pilas	8
1.3 Variables de operación	12
1.3.1 Variables generales	12
1.3.2 Variables críticas.....	17
2. CAPITULO: MEDICIONES Y MÉTODOS DE CONTROL.....	19
2.1 pH y Potencial eléctrico	19
2.1.1 Electrodos METTLER TOLEDO	20
2.1.2 Electrodos HACH	22
2.1.3 Electrodo PEAK INSTRUMENTS.....	26
2.1.4 Electrodo HANNA INSTRUMENTS.....	28
2.1.5 Método de selección.....	29
2.2 Tasa de riego	30
2.2.1 Caudalímetro de hélice McPropeller.....	31
2.2.2 Caudalímetro electromagnético FPI Mag	32
2.2.3 Caudalímetro Ultrasonido	33
2.2.4 Bajada de suero	35
2.2.5 Método de selección.....	35
3. CAPITULO: SISTEMA DE CONTROL PARA PILA DE LIXIVIACIÓN.....	37
3.1 Pila de lixiviación del laboratorio	37
3.1.1 Dimensiones de la pila de lixiviación	37
3.1.2 Construcción de la pila.....	38
3.2 Sistema de control	42
3.2.1 Sistema de control para medir el pH y potencial eléctrico.....	42
3.2.2 Sistema de control para medir tasa de riego.....	42

3.3	Inversión total.....	43
3.4	Vistas de todo el sistema	44
3.4.1	Vista frontal y lateral.....	44
3.4.2	Vista Superior	46
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		47
BIBLIOGRAFIA		49
Referencias.....		49
ANEXOS		51
ANEXO 1: Tabla de producción de cobre por productos.		51
ANEXO 2: Tabla de Producción cát. SxEw, tasa de consumo de ácido y ley de óxidos promedio, 2009 – 2018.		51
ANEXO 3: Consumo aparente, producción, importaciones y exportaciones de ácido sulfúrico en Chile.		51

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Resumen de procesos unitarios asociados a la aplicación de los principales métodos de lixiviación.	5
Figura 1-2: Esquema típico de una pila de lixiviación TL.	7
Figura 1-3: Partes de una pila de lixiviación.	12
Figura 1-4: Diagrama Eh-pH para el sistema Cu a 25 [°C] y 1 [atm]	18
Figura 2-1: pH Sensor InPro3100/120/PT1000	21
Figura 2-2: Electrodo pH InPro3100i/SG/325	22
Figura 2-3: Electrodo de pH Intellical PHC101.	24
Figura 2-4: Electrodo de ORP/RedOx Intellical MTC101	25
Figura 2-5: Medidor portátil HQ11D.	26
Figura 2-6: pH metro T-710.	28
Figura 2-7: Medidor Edge.	29
Figura 2-8: Caudalímetro de hélice McPropeller.	32
Figura 2-9: Caudalímetro electromagnético FPI Mag	33
Figura 2-10: Caudalímetro Ultrasonido	34
Figura 2-11: Bajada de suero	35
Figura 3-1: Caja contenedora de plástico.	38
Figura 3-2: Saco de arena fina de 25 kilos.	39
Figura 3-3: Membrana de polietileno de alta densidad (HDPE).	39
Figura 3-4: Tubería de drenaje.	40
Figura 3-5: Gravilla de río.	41
Figura 3-6: Canaleta de recolección.	41
Figura 3-7: Vista frontal del sistema de control.	45
Figura 3-8: Vista lateral sistema de control	45
Figura 3-9: Vista superior del sistema de control	46

INDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas.....6

Tabla 1-2: Agentes de lixiviación más utilizados 10

Tabla 1-3: Principales especies minerales de cobre de importancia económica.....13

Tabla 1-4: Velocidades de disolución de las principales especies de cobre. 14

Tabla 2-1: Especificaciones – pH Sensor InPro3100/120/PT1000.....21

Tabla 2-2: Especificaciones – Electrodo pH InPro3100i/SG/325.....22

Tabla 2-3: Especificaciones electrodo de pH Intellical PHC101.....23

Tabla 2-4: Especificaciones electrodo de ORP/RedOx Intellical MTC101.....24

Tabla 2-5: Especificaciones de modelos del pH metro T-710 27

Tabla 2-6: Especificaciones medidor Edge.....29

Tabla 2-7: Matriz de selección de equipo 30

Tabla 2-8: Especificaciones caudalímetro de hélice McPropeller 31

Tabla 2-9: Especificaciones caudalímetro electromagnético FPI Mag.....32

Tabla 2-10: Especificaciones caudalímetro ultrasonido 34

Tabla 2-11: Matriz de selección para los caudalímetros. 36

Tabla 3-1: Inversión total necesaria para cada año 44

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

Cochilco: Comisión Chilena del Cobre

H₂SO₄: Ácido Sulfúrico

CIF: Valor real considerando el costo, seguro y el flete, por sus siglas en ingles *Cost, Insurance and Freight*.

PLS: Solución de lixiviación cargada, por sus siglas en ingles Pregnant Leaching Solution.

SX: Extracción por solventes, por sus siglas en ingles Solvent Extraction.

EW: Electro obtención, por sus siglas en ingles Electro Winning.

ILS: Solución de lixiviación intermedia, por sus siglas en ingles Intermediate Leaching Solution.

Cu: Cobre

C: Carbono

O: Oxígeno

H: Hidrógeno

S: Azufre

Cl: Cloro

Si: Silicio

Fe: Hierro

Mn: Manganeseo

As: Arsénico

Sb: Plomo

ASTM: Sociedad Americana para pruebas y materiales

ORP: Potencial de oxido-reducción.

VAC: Voltaje corriente alterna.

HDPE: Polietileno de alta densidad.

LDPE: Polietileno de baja densidad.

VLDPE: Polietileno de muy baja densidad.

PVC: Policloruro de vinilo

B. SIMBOLOGÍA

Ton: Tonelada.

Km²: Kilómetros al cuadrado.

L: Litros.

h: Hora.

m²: Metros cuadrados.

pH: Potencial de hidrogeno.

Eh: Potencial eléctrico.

V: Volts.

atm: Atmosfera.

mV: milivolts.

mm: Milímetros.

barg: Unidad de presión que no considera la presión atmosférica.

s: Segundos.

mA: miliamperios.

ml: mililitros.

cm³: Centímetros al cubo.

m³: Metros cúbicos.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las principales actividades económicas en el país, por ende, constantemente se están buscando formas de optimizar los procesos para aumentar el margen de ganancias de estos, ya sea reduciendo costos o perfeccionando los procesos. Pero como todo no es para siempre, la masiva explotación del cobre en Chile ha hecho que recursos que antes abundaban, hoy sean cada vez más escasos, como lo son los óxidos de cobre.

La hidrometalurgia procesa, principalmente, óxidos de cobres que se encuentran en las capas más superficiales de la corteza terrestre, después de todo el tiempo que se han explotados estos recursos se comienza a evidenciar que estos se están agotando, un reflejo de esto es que en el año 2009 se alcanzó un peak de producción de cátodos de cobre 1971 toneladas de cobre fino, mientras que en el año 2016 la producción fue de 1660 toneladas, como se pueden ver en el Anexo 1, y se proyecta que el volumen de óxidos de cobre pasará de 30.8% en 2015 a 12% en 2027 según proyecciones de Cochilco (Cochilco, 2017).

A su vez, la producción no solo ha bajado por la disminución de óxidos de cobre, la ley de cobre media también ha disminuido con el paso de los años, en el año 2007 la lixiviación contenía leyes de mineral de 0,60% y para el 2018 bajo a un 0,43%, como se ve en el anexo 2, lo que nos dice que cada vez es mayor la presencia de ganga en el proceso lo que puede llegar a dificultarlo y a su vez hacerlo más costoso. En el proceso de lixiviación el agente lixivante más ocupado es el H_2SO_4 , y como las leyes son cada vez más bajas esto ha generado que cada vez se necesite más ácido para poder lixiviar, si en 2009 la tasa de consumo promedio (ton H_2SO_4 / ton cat. SxEw) fue de 3,25 en 2018 la tasa fue de 4,9 mostrando claramente que se está ocupando más ácido para lixiviar, a su vez, Chile no produce todo el H_2SO_4 que necesita, en 2016 el consumo aparente de H_2SO_4 fue de 7363 toneladas, mientras que la producción fue de 5708 toneladas, por lo que se tuvo que importar 1727,2 toneladas, como se ve en el anexo 3. Por consiguiente, el gasto monetario que se realiza en H_2SO_4 es alto, el precio de H_2SO_4 varía en el tiempo y en 2018 el valor fue de aproximadamente 78 [US\$ CIF/Ton] (COCHILCO, 2019).

Es por todo esto, que el presente trabajo de título se enfocara en estudiar la factibilidad técnica y económica de la creación de una pila de lixiviación en el laboratorio de nuestra universidad, midiendo mediante sensores electrónicos las variables críticas del proceso y así que los futuros estudiantes de la carrera aprendan a controlar lo que pasa en el proceso, optimizando la recuperación de cobre y el consumo de ácido.

OBJETIVO GENERAL

Estudiar la factibilidad técnica y económica de sistema de control en pila de lixiviación del laboratorio, mediante sensores electrónicos indicando variables críticas de operación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar el proceso de lixiviación en pilas por medio de información técnica estableciendo variables críticas a controlar por sensores.

Diferenciar los métodos de control de proceso de acuerdo con requerimientos técnicos y factibilidad de implementación seleccionando el método de control para el activo.

Establecer y crear una pila de lixiviación en el laboratorio con un sistema de control de acuerdo con método seleccionado indicando su factibilidad técnica y económica.

1. CAPÍTULO: FUNDAMENTOS DE LA LIXIVIACIÓN

1.1 La Lixiviación

En la metalurgia extractiva existen dos ramas de los procesos generales que se pueden llevar a cabo, estas son la pirometalurgia y la hidrometalurgia. Esta última es la encargada de extraer los metales desde las rocas extraídas desde la mina a través de métodos fisicoquímicos de fase acuosa. Este proceso es utilizado en la extracción de Uranio, Oro, Vanadio, Cobre, Plata, entre otros.

La hidrometalurgia contiene distintas etapas para lograr la extracción de la especie de interés, las cuales principalmente son: Chancado, aglomeración y Curado, lixiviación, extracción por Solventes y Electro-obtención (Cárdenas, Díaz, Guajardo, & Oliva).

La lixiviación es la disolución selectiva de los metales desde los sólidos que los contienen, mediante una solución disolvente acuosa (Domic, 2001), en otras palabras, consiste en la disolución de una sustancia o mineral soluble mediante la acción de un agente lixivante que disuelve el metal, permitiendo la recuperación de este. Es aplicable en ciertos casos que en general dependen del tipo de mineral, ley de cobre, disponibilidad de agua, terreno, etc. Por lo cual existen distintos métodos de lixiviación.

1.1.1 Métodos de lixiviación

Los métodos para ejecutar este proceso tratan de responder a las interrogantes fundamentales de toda actividad industrial, es decir, buscar obtener el máximo beneficio económico con el mínimo costo y complicaciones posibles. Entonces se quiere lograr un balance económico tal que los recursos aportados; ya sea inversión, gastos operacionales, energía, etc.; y los beneficios esperados al procesar las materias primas que se desean recuperar sean óptimas para la empresa.

La lixiviación es un proceso químico, para hacer más rápida la cinética de reacción se le aplican procedimientos de intervención externa desarrollados para mejorar el rendimiento cinético de tales procesos. Esto se puede lograr, por ejemplo, con la aplicación de alguno o varios de los siguientes factores: usando diferentes reactivos y/o variados su concentración; incorporando agitación cuando resulta posible; incorporando el efecto de la temperatura y de la presión cuando ello es posible.

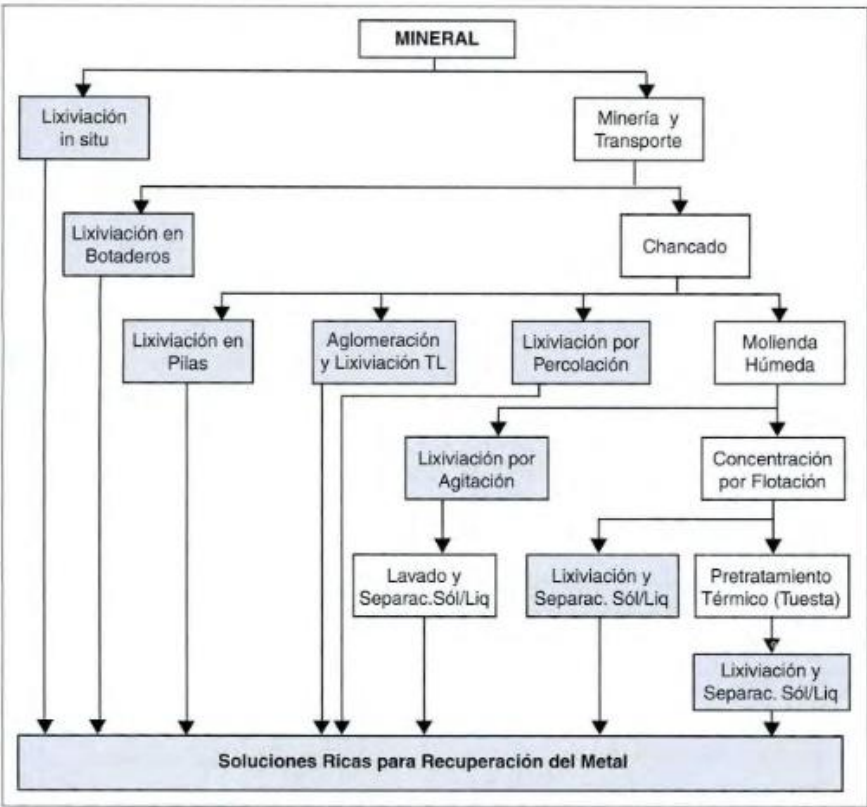
El factor tiempo, es decir, la duración de la lixiviación es un factor decisivo al momento de la selección del método, ya que es determinante sobre los costos, tanto de inversión como de operación, y por el tamaño de los equipos y/o espacios involucrados.

De esta manera el método escogido para realizar la lixiviación depende principalmente del balance económico que debe tomar en cuenta:

- El valor económico del metal a recuperar
- Porcentaje de recuperación que se puede esperar por cada método
- El costo de explotación
- El costo de procesos previos de reducción de tamaño
- La facilidad de disolución relativa de las especies deseadas

Dicho esto, los métodos de lixiviación se pueden clasificar en: lixiviación de lecho fijo o por percolación, lixiviación agitada y lixiviación bacteriana (Domic, 2001). En la primera de ellas el agente lixivante hace contacto con el mineral y a medida que este desciende va disolviendo el o los metales solubles, la solución rica en el metal deseado se recoge por el fondo para luego dirigirse a una etapa de extracción; aquí se encuentran los métodos de lixiviación en pilas, en bateas, in-situ y en botadores; la lixiviación por agitación se realiza en tanques donde la temperatura y presión son controladas y este método es aplicable cuando la ley de cabeza a tratar es alta, ya que se requiere material finamente molido o de un concentrado del mineral inicial; finalmente la lixiviación bacteriana es un complemento a la lixiviación en pilas y en botaderos para el tratamiento de minerales de cobre sulfurados, los cuales ante la presencia de determinados microorganismos incrementan la velocidad de disolución (Guiachetti, 2011).

Los principales métodos de lixiviación asociados a sus procesos unitarios se pueden clasificar de la siguiente manera:



Fuente: (Domic, 2001)

Figura 1-1: Resumen de procesos unitarios asociados a la aplicación de los principales métodos de lixiviación.

1.2 Lixiviación en Pilas

Como se dijo anteriormente, la lixiviación en pilas es uno de los procesos más relevantes de la vía hidrometalúrgica de la extracción del cobre, consiste en que el mineral extraído de la mina es apilado en alturas que pueden llegar a superar los 6 o 7 metros, y puede abarcar áreas superficiales desde los 0.1 a 1 km² en las grandes empresas mineras.

El agente lixiviante, comúnmente H₂SO₄, se aplica en la superficie de la pila desde donde percola a través del lecho mineral, disolviendo así los minerales de cobre produciendo una solución enriquecida en cobre llamada PLS que es colectada en una superficie inclinada e impermeable en la parte inferior de la pila, desde la cual la solución es transportada mediante tuberías hasta la piscina de soluciones ricas para su posteriores procesos que son SX Y EW (Broggi, 2015). Este tipo de lixiviación tiene ventajas y desventajas comparadas con el proceso de molienda y flotación de los minerales sulfurados de la vía pirometalúrgica, como se observa en la siguiente tabla:

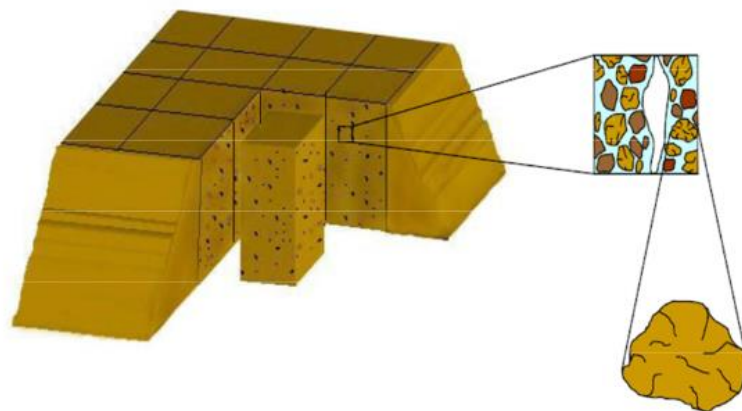
Tabla 1-1: Ventajas y desventajas de la lixiviación en pilas.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Bajo capital y bajos costos de operación	Largos ciclos de lixiviación y retención de soluciones
Ausencia de molienda, pero requiere chancado y aglomeración	
Puede ser usado para tratar minerales de baja ley, minerales de desecho y aplicable a yacimientos pequeños	Menores recuperaciones que los procesos que involucran molienda/flotación o molienda/lixiviación
La ausencia de etapas de separación solido-liquido permite operar en contra corriente	
Puede alcanzarse el contenido metálico deseado por medio de reutilización de soluciones en las pilas o refino	Extensos programas de pruebas de pilotaje
Simplicidad de equipo y operación	Impactos económicos y ambientales a largo plazo
Tiempo de arranque más breves	
Regulaciones ambientales menos intensivas	Posibles emisiones al medio ambiente de PLS

Fuente: (Broggi, 2015)

En Chile, específicamente en la minera Pudahuel en 1980, se llevó a cabo un nuevo concepto que revolucionó la industria, la lixiviación en pilas TL o Thin Layer, esta forma de lixiviar es la que se lleva a cabo actualmente, este concepto consiste en impedir la acumulación de la solución en la pila, a diferencia de la lixiviación en bateas, de manera que la solución percole formando una capa delgada de líquido. La característica principal de este concepto es que la materia prima extraída desde la mina pasa por un proceso de chancado, que puede ser secundario y principalmente terciario, ocupando tamaños de partículas relativamente pequeños, del orden del 100% -3/8” en quebrada blanca y del 100% -1/4” en el caso de Lo Aguirre (Domic, 2001). Es por estos tamaños de partícula que antes de proceder a armar la pila, se le suma un pretratamiento con H₂SO₄ para su aglomeración y curado, la cual tiene un beneficio de inhibir la disolución de algunas especies indeseables como el aluminio y la sílice (SiO₂). Luego de esto se procede al armado de la pila de lixiviación rectangulares a la cual se le riega con una solución lixivante ácida con distintas técnicas de riego.

Con estos procesos de pretratamiento se eleva la resistencia del material y mejora la permeabilidad del lecho con el fin de alcanzar alturas más bajas, mejorar la recuperación de cobre y acortar los ciclos de lixiviación.



Fuente: (Guiachetti, 2011)

Figura 1-2: Esquema típico de una pila de lixiviación TL.

1.2.1 Etapas previas a la lixiviación en pilas

Para poder realizar el proceso de lixiviación en pilas, se requieren etapas previas de tratamiento del mineral para poder construir la pila de lixiviación, la más relevante es el proceso de aglomerado y curado que se describe a continuación.

1.2.1.1 Aglomeración y Curado

Este proceso consiste en mezclar el material que paso por el chancado con agua y ácido sulfúrico, de forma que las partículas se adhieran entre ellas formando glómeros. El agua que se agrega en este proceso provee al material de una cohesión aparente, la cual ayudara a ligar el material fino con el grueso.

La cantidad de agua que se debe adicionar depende de las características del mineral, a continuación, se mencionaran las consideraciones que deben tenerse en cuenta para establecer la cantidad de agua y acido que se tienen que agregar en esta etapa.

- Un exceso de agua lleva a conseguir glómeros muy plásticos y poco estables que se destruyen, y en el momento de cargarlos en la pila estos se deformaran produciendo compactación del mineral, afectando el drenaje de la pila. En cambio, la falta de agua produce glómeros débiles mecánicamente y muy esponjosos, los que al construir la pila tendrán

muy baja densidad y al regar la pila se producirá una gran compactación lo que provocaría canalizaciones en el proceso.

- El ácido que se agrega lleva a cabo la función de comenzar a solubilizar el cobre, además, produce la inhibición de la formación de la sílice coloidal, la que trae problemas en la etapa de SX ya que aumenta la formación de borra.
- La cantidad de ácido requerida depende de la caracterización química del mineral, es decir, del consumo de la ganga.
- Siempre al reaccionar el mineral con el ácido se producen gases producto de la reacción, estos gases deben ser extraídos por políticas medioambientales y también porque estos gases pueden afectar la permeabilidad del mineral.

Es por esto por lo que el aglomerado y curado es clave, ya que mejora el lecho del mineral al hacerlo más homogéneo y permeable lo que hace que la solución pase por todas las partículas del mineral y comienza la sulfatación del cobre aumentando la velocidad de lixiviación (Lopez, 2012).

1.2.2 Características de la lixiviación en pilas

En la gran minería, las condiciones necesarias para realizar el proceso de lixiviación se necesitan de amplias superficies de terreno para apoyar la pila con una pendiente menor al 10%, considerar un margen de sobrecapacidad del sistema para absorber, realizar un estudio geo mecánico del material depositado para alcanzar la máxima altura posible, etc.

Para que la lixiviación tenga éxito se tienen que cumplir requerimientos, el primero de ellos es la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que la solución lixivante pase por todo el material procurando que el contacto de que el agente lixivante y el mineral sea el óptimo, para esto se deben considerar algunos factores los cuales son: volumen del material y distribución de tamaños, área expuesta, porosidad, entre otros.

Existen dos tipos de pilas dependiendo de su utilización:

- Pilas dinámicas: también llamadas “on-off”, son las que el mineral ya lixiviado se remueve enviándose a botadores y la base de la pila

removida se puede reutilizar. Tienen la ventaja de elegir cualquier configuración que sea aceptable para la operación de los equipos de carga y descarga, generalmente prefiriéndose un rectángulo alargado.

- Pilas Permanentes: La característica de esta pila recae en que la nueva pila se carga sobre la anterior, aprovechando o no la impermeabilización existente. La configuración puede ser de cualquier geometría según la disponibilidad del espacio a ocupar, si no existen restricciones topográficas, usualmente, la configuración es rectangular.

Para el carguío de estas pilas se utilizan una variedad de sistemas que varían según las instalaciones de cada faena. Para las faenas pequeñas, desde los 300 a 2000 ton/día hasta las 5000 y 10000 ton/día, se usan camiones y apiladores de correa autopropulsados, evitándose así el uso de cargadores frontales que destruirían los glómeros de la pila; para faenas desde los 10000 ton/día hasta las 50000 ton/día se usan correas modulares articuladas que terminan en un apilador de correa; finalmente para faenas que van desde los 75000 a 150000 ton/día, como Radomiro Tomic, se prefieren complejos sistemas de apiladores sobre oruga alimentados con cintas transportadoras estacionarias y móviles, cuando se tiene que remover el material ya lixiviado normalmente se utilizan Rotoplas, en general se prefiere el sistema de canchas de lixiviación dinámicas para estas faenas ya que el excesivo tonelaje de mineral obligaría a un complicado movimiento permanente de las cintas transportadoras.

Una vez el material mineralizado fue apilado debe ser regado con una solución lixivante, el sistema de riego instalado permite distribuir las soluciones por medio de dos tipos de sistemas de riego, el primer tipo se trata de cañerías de irrigación por goteo para obtener una tasa de goteo determinada que se expresa en $(L/h) / m^2$, y el segundo tipo se trata de aspersores tipo wobblers o sprinklers en toda el área, estos aspersores pueden cubrir las áreas no irrigadas por el goteo.

Este sistema de riego tiene la función de permitir la circulación de las soluciones que se ocuparan en la lixiviación, cuando la solución lixivante llega a la superficie de la pila comienza un proceso de difusión y un ataque químico sobre la superficie del mineral. La rentabilidad y eficiencia económica del proceso se da en función del grado de disolución o del porcentaje de extracción, pero el factor más importante es el tiempo necesario para lograr una extracción aceptable. Al comienzo de la lixiviación se produce una extracción rápida pero conforme pasa el tiempo la extracción va decreciendo, esta disminución se puede deber a varias causas como disminución de la superficie expuesta, disminución de la concentración de reactivos, aumento de la concentración de minerales en la disolución y disminución del grado de lixiviación en partículas porosas al aumentar la distancia desde el punto de difusión.

Para seleccionar correctamente el agente lixiviante se debe tener en cuenta las características del mineral, reservas y el valor potencial del yacimiento, para realizar esto se realizan caracterizaciones mineralógicas para posteriormente realizar pruebas en el laboratorio, lo ideal es elegir solo un agente químico, económico y recuperable, y un ciclo de lixiviación los más corto posible para extraer el máximo de cobre y un mínimo de impurezas.

Existen 2 casos de lixiviantes: el lixiviente natural producido por las aguas lluvias que percolan en el yacimiento produciendo un lixiviente con contenidos variables de ácido, hierro e incluso cobre; son las aguas de desagüe de minas. El segundo caso es el lixiviente preparado, donde normalmente las soluciones no suelen ser muy concentradas, el ácido varía entre un 4% y un 10%, y el hierro alrededor de un 1%.

Entre los agentes lixiviantes en la minería del cobre se encuentran agentes lixiviantes ácidos y básicos. El agente lixiviente más usado para minerales oxidados es el ácido sulfúrico. La elección del agente químico de la lixiviación depende del costo, disponibilidad, etc., de tal forma que sea lo más económico y fácil de trabajar.

Tabla 1-2: Agentes de lixiviación más utilizados

Tipo de agente	Ejemplos
Ácido inorgánico	Ácido sulfúrico Ácido clorhídrico Ácido nítrico
Bases	Hidróxido de amonio
Agentes complejantes	Amoniac Sales de amonio Cianuros Carbonatos Cloruros

Fuente: (CODELCO, 2018)

Una vez comienza el riego, se tiene que recolectar las soluciones producidas de la lixiviación del cobre, para esto al costado de la pila se encuentran

canaletas de recolección las cuales están divididas en dos secciones para poder conducir por gravedad, separada e independientemente las soluciones ricas y pobres en mineral lixiviado. Estas soluciones son llevadas a piscinas desarenadoras para ser clasificadas y desde ahí fluyen a diferentes piletas según la calidad de la solución, existen 2 tipos de piscinas: la piscina de solución rica PLS y la piscina de solución intermedia ILS, la cual se utiliza para regar el aglomerado fresco y generar así PLS.

Ahora que ya sabemos todo lo descrito anteriormente, se hablará de una parte importante de este trabajo que servirá como base para el capítulo 3.

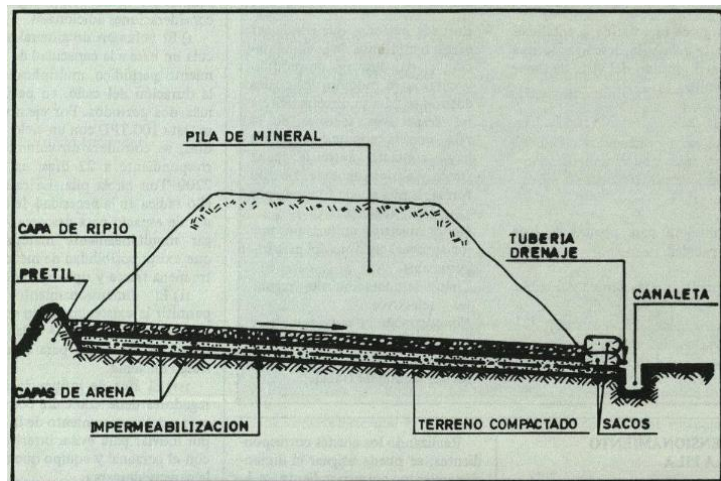
1.2.2.1 Partes de una pila de lixiviación

Para construir una pila de lixiviación se necesitan diversos elementos para que se logre lixiviar el material y posteriormente recuperar solución rica en cobre, estos elementos se describen a continuación:

- Substrato: Corresponde a un terreno con pendiente entre 3 a 4% en dirección hacia la canaleta.
- Finos de protección: Es una capa de áridos finos, que pueden ser arenas, relaves, etc., exentos de elementos perforantes ya que se debe acomodar suavemente la capa impermeable, los espesores varían de 10 a 20 cms por encima y por debajo de la capa impermeable.
- Base impermeable: Consiste generalmente en un material plástico inerte a la acción de los agentes químicos con los que se lixivia. Esta membrana impermeable puede ser de HDPE, LDPE, VLDPE o PVC donde el espesor varío de 0,1 mm a 1,5 mm.
- Tuberías de drenaje: Tuberías corrugadas y perforadas, se colocan espaciadas longitudinalmente, destinadas a permitir una rápida evacuación de la solución.
- Ripio de protección: Constituye la última base de protección, es una capa de 20 cm de material de apariencia diferente del mineral aglomerado, además reparte las presiones sobre la tubería de drenaje. La granulometría debe ser 100% - 3" y 100% + 1 ½".
- Canaleta de recolección: Lugar de recuperación de las soluciones de la pila, está integrada al revestimiento impermeable y presenta una

pendiente del orden del 0,5 a 1%. Están conectadas a tanques desarenadores para eliminar solidos de suspensión.

En la figura siguiente se presenta un corte transversal de una pila con lo anteriormente descrito.



Fuente: (Avendaño & Ramirez)

Figura 1-3: Partes de una pila de lixiviación

1.3 Variables de operación

Son varias las variables que influyen en el proceso de lixiviación, en esta investigación se categorizaran en dos tipos, variables generales, que, si bien son importantes para nuestro estudio, no son o es muy difícil su medición mediante sensores electrónicos como se verá en el capítulo 2. En cambio, la segunda categoría serán las variables que estableceremos como criticas ya que están si pueden ser medidas mediante sensores.

1.3.1 Variables generales

1.3.1.1 Mineralogía

La mineralogía del mineral a lixiviar es una variable importante que ayuda a definir el proceso y así determinar si será exitoso económicamente. La influencia de esto recae en que afecta en la cinética de disolución y en el consumo de ácido.

En cuanto a la disolución, se observan diferencias entre las distintas especies de minerales, en la tabla siguiente se observan las más importantes:

Tabla 1-3: Principales especies minerales de cobre de importancia económica

Zona Mineralizada	Especie Mineralógica	Composición más frecuente para esta especie	Cobre (%)
Zona Oxidada secundaria	Cobre Nativo	Cu^0	100
	Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	57,5
	Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	55,3
	Chalcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25,5
	Brochantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$	56,2
	Antlerita	$\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{Cu}(\text{OH})_2$	53,7
	Atacamita	$3\text{CuO} \cdot \text{CuCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	59,5
	Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	36,2
	Dioptasa	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$	40,3
	Neotocita	$(\text{Cu}_i - \text{Fe}_j - \text{Mn}_k)\text{SiO}_3$	Variable
	Cuprita	Cu_2O	88,8
	Tenorita	CuO	79,9
	Pitch / Limonita	$(\text{Fe}_i - \text{Cu}_j)\text{O}_2$	Variable
	Delafosita	FeCuO_2	42
	Copper Wad	CuMnO_2Fe	Variable
	Copper Pitch	$\text{CuMn}_8\text{FeSiO}_2$	variable
Zona de Enriquecimiento secundario	Calcosina	Cu_2S	79,9
	Digenita	Cu_9S_5	78,1
	Djurleita	$\text{Cu}_{1,95-x}\text{S}$	Variable
	Covelina	CuS	66,5
	Cobre nativo	Cu^0	100
Zona Primaria	Calcopirita	CuFeS_2	34,6
	Bornita	Cu_5FeS_4	63,3
	Enargita	Cu_3AsS_4	48,4
	Tenantita	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	51,6
	Tetrahedrita	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	45,8

En comparación con otros fenómenos fisicoquímicos, la energía de activación en la lixiviación no la proporciona la temperatura, en el caso de minerales oxidados la energía de activación se proporciona mediante la existencia y cantidad de iones de hidrogeno en la solución lixivante, y en el caso de minerales sulfurados se proporciona por la presencia y concentración de un aceptor de electrones como el oxígeno disuelto o Fe^{+3} . La cinética de lixiviación está relacionada con el número de electrones que se necesitan remover para hacer soluble las especies, esta información se presenta en la siguiente tabla donde las especies se ordenan en 5 categorías:

Tabla 1-4: Velocidades de disolución de las principales especies de cobre.

Cinética Relativa	Tiempo de referencia	Especies minerales de cobre en esta categoría
Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos a minutos, disolución es completa	Carbonatos (malaquita, azurita), sulfatos (chalcantita, brochantita y antlerita) y cloruros (atacamita)
Rápida (requiere mayor acidez)	Horas, disolución es completa	Óxidos cúpricos (tenorita) y silicatos (crisocola y dioptasa)
Moderada (requieren oxidante)	Días a semanas, disolución puede no ser completa	Cobre nativo, óxidos cuprosos (cuprita, delafosita) y alguno silicatos y óxidos complejos con manganeso (neotocita, copper wad y copper pitch)
Lenta (requieren oxidante)	Semanas a meses, disolución puede ser completa	Sulfuros simples (calcosina, digentita, djurleita, covelina)

Muy lenta (requieren oxidante)	Años, disolución es incompleta	Sulfuros complejos (bornita, calcopirita, enargita, tetrahedrita)
--------------------------------	--------------------------------	---

Fuente: (Domic, 2001)

Al momento de lixiviar los minerales, la cinética no depende solo por las condiciones del sistema ni tampoco por la mineralogía de las especies de cobre, la situación es más compleja principalmente por otras reacciones posibles que pueden ocurrir entre las soluciones lixiviantes y la ganga.

Al interior de las rocas podemos decir que existen “microambientes” en donde la solución lixiviante atraviesa una ganga porosa para alcanzar un grano mineralizado ocluido. La solución puede alterarse debido a las reacciones con el mineral, cabe la posibilidad que se detenga completamente el avance por razones físicas produciéndose un bloqueo irreversible.

Generalmente la ganga en los yacimientos de cobre está constituida por silicatos como el cuarzo; feldespatos como el feldespato potásico; carbonatos como la calcita; sulfatos como el yeso; y los óxidos e hidróxidos de fierro como la magnetita o hematita.

La experiencia señala que los yacimientos presentan una variedad de roca, cada una con distinto comportamiento respecto al consumo de ácido y cinética de disolución en función del pH. A pesar de lo mencionado, se establece como regla general que la gran mayoría de la ganga aumenta la velocidad de disolución al disminuir el pH, esto viene acompañado por el incremento de consumo de ácido.

1.3.1.2 Granulometría

Las velocidades de reacción del proceso son dependientes del área superficial, es por ello por lo que la cinética se ve afectada por la granulometría del mineral, un menor tamaño produce una disolución más rápida ya que tiene más superficie expuesta a la reacción, pero esto puede llevar a tener problemas con la permeabilidad de la pila.

Si disminuye la permeabilidad puede ocasionar problemas operacionales debido a inundaciones, estabilidad mecánica estática y sísmica, incluso que la solución no se infiltre en la pila. Desde el punto de vista metalúrgico no interesa cuantificar el material más fino que malla ASTM #100.

Otra posibilidad es que al penetrar las soluciones a partículas demasiado finas se produzca un “chancado químico”, generando partículas más finas afectando el drenaje, esto podría sumarse a otros efectos que afectan la granulometría como el chancado debido a la operación y carguío, y la migración de finos desde los sectores más altos a los más bajos.

1.3.1.3 Altura de la Pila

Este factor es relevante en cuanto al tiempo de lixiviación, cuando la altura es menor el tiempo se reduce, pero los costos de apilamiento e irrigación son mayores cuando se tienen lechos bajos. Se recomienda que, si el mineral tiene un alto consumo de ácido, sobre 25 Kg/ton, la altura debería ser inferior a 4 metros, así mismo si el mineral es un 18% bajo malla ASTM #100 tampoco deberían superarse los 4 metros. Para los minerales de mejor calidad la altura puede ser superior a los 6 metros. Entonces, la altura varía normalmente entre los 2,5 y 10 metros.

1.3.1.4 Tiempo de lixiviación

La importancia económica del proceso recae en el porcentaje de extracción, pero si el tiempo de lixiviación es alto conlleva a una mayor inversión. La cinética va a determinar el tiempo de residencia óptimo en la pila con el objeto de hacer la operación rentable económicamente. Los ciclos de lixiviación varían según la mineralogía, los óxidos se tardan alrededor de 30 a 60 días en una disolución óptima de cobre, en cambio, los sulfuros pueden requerir de 6 a 9 meses en el caso de los sulfuros secundarios y de hasta 10 años para los sulfuros primarios.

1.3.1.5 Concentración de ácido en la solución de riego

La acidez de la solución es una de las fuerzas más importantes en la lixiviación. El ácido, como se mencionó anteriormente, no solo reacciona con el cobre, sino que también con la ganga reactiva del mineral. Es por esto por lo que si se trabaja con una concentración de ácido inferior a la óptima la recuperación de cobre será deficiente, pero en el caso contrario, si se ocupa una concentración mayor a la óptima aumenta el consumo de ácido ya que se puede favorecer la disolución de impurezas provenientes de la ganga.

1.3.2 Variables criticas

1.3.2.1 Tasa de riego

La cinética de lixiviación también está condicionada por la tasa de riego necesaria para suministrar las soluciones, esta tasa necesariamente debe cumplir con el aporte de ácido necesario para obtener las disoluciones esperadas. En un mineral con alto contenido de finos la tasa de riego varía entre 6 (L/h) /m² y 10 (L/h)/m², en caso contrario con un alto contenido de gruesos las tasas pueden ser de hasta 40 (L/h)/m².

El flujo no necesariamente fluye por el mineral más grueso como se puede creer (Lopez, 2012), si la tasa de riego es mayor a la permeabilidad saturada de la parte más fina el flujo preferencial se ira por la parte más gruesa, en cambio si la tasa de riego es menor el flujo preferencial ira por la parte más fina.

1.3.2.2 pH y Potencial eléctrico

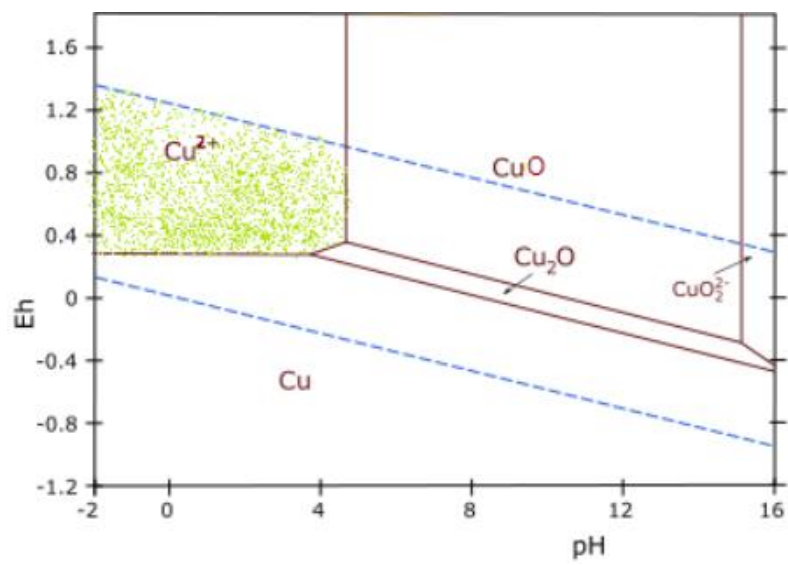
El pH es un valor que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa, esto se determina por los iones de hidronio en la solución que alteran la constante de equilibrio, el pH tiene un rango que va de 1 a 14, siendo 1 lo más ácido y 14 lo más alcalino.

El potencial eléctrico es un campo eléctrico característico de las interfases solido-liquido, dentro de estas interfases hay un elemento que se reduce y otro que se oxida. El elemento que gana electrones posee una capacidad oxidante mayor, esta capacidad es la que se conoce como potencial de oxidación o Eh la cual se mide en V.

El diagrama de Pourbaix es la representación del pH y el potencial de oxidación para un metal. Esta representación gráfica tiene en cuenta equilibrios químicos y electroquímicos definiendo la estabilidad del electrolito, el metal y sus compuestos relacionados como óxidos, hidróxidos, etc. Estos diagramas se construyen a partir de cálculos basados en la ecuación de Nerst y en las constantes de equilibrio.

Gracias al diagrama de Pourbaix se conocen las condiciones relacionadas al cobre para obtener el ion Cu²⁺ en la lixiviación. En la siguiente figura se aprecia el campo de estabilidad del ion y desde donde se puede ver que para obtenerlo el pH tiene que ser menor a 4 y el Eh mayor a 0.4 V.

Figura 1-4: Diagrama Eh-pH para el sistema Cu a 25 [°C] y 1 [atm]



Fuente: (Repetto, 2018)

2. CAPÍTULO: MEDICIONES Y MÉTODOS DE CONTROL

El objetivo de controlar el proceso es maximizar los beneficios sin tener un gasto excesivo por el sobreconsumo de ácido para lixiviar lo que significaría un impacto económico en el proceso, para que esto no pase se tiene que controlar la calidad del proceso.

Dentro del control de calidad existen tres métodos de control los cuales son: el método de control preliminar, el cual es realizado antes que inicie el proceso; el segundo método de control es el concurrente en el cual durante el desarrollo del proceso se miden y verifican los parámetros establecidos para la corrección de estos en el caso de que estén desviados; y por último el método de control por retroalimentación que se centra en datos obtenidos de controles anteriores para corregir los desvíos que pueden llegar a surgir.

En nuestro caso, se ocupará el método de control concurrente ya que a medida que el proceso se lleve a cabo se irán midiendo y verificando los valores de los parámetros para que el producto, que en nuestro caso es el PLS, tenga la mayor concentración posible.

Como se explicó en el capítulo anterior, las variables establecidas como críticas son las que se medirán para así controlar el proceso de lixiviación en sus parámetros óptimos de operación. Para esto, a continuación, se hablarán de las formas de medir estas variables, de las empresas que ofrecen estos servicios y de las características de los aparatos de medición.

2.1 pH y Potencial eléctrico

Para medir el pH se ocupan elementos llamados medidores de pH, hoy en día se puede encontrar una gran variedad en el mercado que van desde dispositivos de mano muy baratos hasta dispositivos complejos para laboratorios.

Los medidores más comunes incorporan un sensor de vidrio y un tubo de referencia. La sonda de pH mide la actividad de los iones de hidrogeno mediante la generación de una pequeña cantidad de tensión en el sensor y tubo de referencia, al generar este voltaje el medidor lo mide y entrega un valor de pH y lo muestra en la pantalla.

Algunos medidores de pH digitales vienen con una función que compensa automáticamente la temperatura mediante un termómetro incorporado. Estos medidores de pH tienen que ser calibrados constantemente, para esto se comparan con un punto de referencia en el laboratorio con certificación estándar, conocido como solución calibradora. (Tribuladores SLU, n.d.)

Para medir el potencial eléctrico se ocupa un medidor de ORP, el cual mide la energía química mediante un electrodo, transformándola y entregando un valor de energía eléctrica que se expresa en mV.

Estas mediciones se pueden realizar por separadas o existen aparatos que te pueden entregar los 2 valores en simultáneos, a continuación, veremos algunos de los distintitos tipos de instrumentos que hay en el mercado para controlar estas variables.

2.1.1 Electrodos METTLER TOLEDO

Mettler Toledo es una empresa internacional que ofrece servicios e instrumentos de precisión para diversas aplicaciones de investigación y desarrollo. Prestan servicios a clientes de todo el mundo y su oficina más cercana a nuestro país se encuentra en Brasil.

Esta empresa ofrece los siguientes sensores para la medición de pH y potencial eléctrico.

2.1.1.1 pH Sensor InPro3100/120/PT1000

Este es un electrodo de pH con sensor de temperatura, esta es la versión de 120 mm para instalaciones de longitudes cortas. El sensor de pH InPro 3100 ofrece una medición estable y sin riesgo de atasco del diafragma.

Este electrodo relleno de un electrolito de gel proporciona mediciones de pH eficaces y exactas con pocos requisitos de mantenimiento. Este sensor solo permite la medición de pH, por lo que habría que tener otro medidor de potencial eléctrico.

Existen de distintos diámetros teniendo todas las mismas especificaciones que a continuación se mostraran para este sensor.

Tabla 2-1: Especificaciones – pH Sensor InPro3100/120/PT1000

ISM (digital) o Analógico	Analógico
Tecnología de detección de pH	Membrana de vidrio altamente resistente a los álcalis para condiciones difíciles (HA)
Intervalo pH	0 – 14
Sistema de referencia	Electrolito de gel, diafragma cerámico, cartucho argenthal y trampa ion plata.
Temperatura de funcionamiento	0 °C – 140 °C
Conector de cable	VP
Conexión de proceso	Rosca Pg 13,5
Longitud del sensor	120 mm
Presión de funcionamiento	0 – 6 barg a 140 °C
Parámetro de medición	pH
Material del eje	Vidrio

(Mettler Toledo, n.d.)



(Mettler Toledo, n.d.)

Figura 2-1: pH Sensor InPro3100/120/PT1000

2.1.1.2 Electrodo pH InPro3100i/SG/325

El InPro 3100i es un electrodo digital ISM que puede medir pH y ORP (Redox), es de la misma familia que el electrodo visto anteriormente por lo que la descripción es la misma con la salvedad que este sensor puede medir el potencial eléctrico a la vez que mide pH siendo una mejor opción.

Tabla 2-2: Especificaciones – Electrodo pH InPro3100i/SG/325

ISM (digital) o Analógico	ISM (digital)
Tecnología de detección de pH	Membrana de vidrio altamente resistente a los álcalis para condiciones difíciles (HA)
Intervalo pH	0 – 14
Sistema de referencia	Electrolito de gel, diafragma cerámico, cartucho argenthal y trampa ion plata.
Temperatura de funcionamiento	0 °C – 140 °C
Conecto de cable	K8S
Conexión de proceso	Rosca Pg 13,5
Longitud del sensor	325 mm
Presión de funcionamiento	0 – 6 barg a 140 °C
Parámetro de medición	pH; ORP/Redox
Material del eje	Vidrio
Solución a tierra/metal Redox	Platino

(Mettler Toledo, n.d.)



(Mettler Toledo, n.d.)

Figura 2-2: Electrodo pH InPro3100i/SG/325

2.1.2 Electrodos HACH

HACH es una empresa internacional dedicada principalmente al análisis de aguas para así garantizar su calidad, en base a uno de sus productos son los medidores de pH y potencial eléctrico que se pueden adquirir en Chile mediante una página web.

2.1.2.1 Electrodo de pH Intellical PHC101

El electrodo Intellical PHC101 es un electrodo de pH combinado digital equipada con un sensor de temperatura. El PHC101 requiere poco mantenimiento gracias a una única unión de referencia abierta rellena de gel y no rellenable.

Esta robusta versión PHC101 está construida con un cuerpo de acero inoxidable a fin de garantizar que el electrodo tenga peso suficiente para facilitar su manejo desde el exterior; el componente de detección de pH está protegido por una cubierta.

Los electrodos digitales Intellical alertan al usuario en caso de que sea necesario realizar una nueva calibración. A su vez, pueden desplazarse entre los medidores sin tener que realizar una nueva calibración ni volver a introducir los parámetros de medición.

Tabla 2-3: Especificaciones electrodo de pH Intellical PHC101

Elemento de referencia	Ag/AgCl (una sola unión)
Exactitud	± 0,02 de pH
Longitud	250 mm
Material sensor	Zeonor/Acero inoxidable
Parámetro	pH
Rango de medición	2 – 14 pH
Tipo de sensor	pH de vidrio
Unión	Diafragma abierto

(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)



(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)

Figura 2-3: Electrodo de pH Intellical PHC101

2.1.2.2 Electrodo de ORP/RedOx Intellical MTC101

Como el electrodo anterior solo mide pH se complementa con el siguiente electrodo, es un electrodo de potencial de oxidorreducción (ORP/Redox) combinado digital con referencia de gel-electrolito no rellenable y sensor de temperatura incorporado. El MTC101 requiere poco mantenimiento gracias a una única unión de referencia abierta rellena de gel y no rellenable.

Los electrodos digitales Intellical bloquean el resultado cuando la medición es estable, eliminando las conjeturas que debe hacer cuando tiene un número en movimiento. Además, la gran unión de referencia abierta del electrodo ofrece una superficie máxima entre la muestra y el electrolito de referencia para la rápida estabilidad de la medición.

Tabla 2-4: Especificaciones electrodo de ORP/RedOx Intellical MTC101

Elemento de referencia	Ag/AgCl (una sola unión)
Exactitud	± 0,02 mV
Longitud	200 mm
Material sensor	Epoxi
Parámetro	ORP
Rango de medición	± 1200 mV
Tipo de sensor	Disco de platino
Unión	Diafragma abierto

(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)



(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)

Figura 2-4: Electrodo de ORP/RedOx Intellical MTC101

2.1.2.3 Medidor de pH/ORP/mV portátil HQ11D

Los electrodos anteriormente mencionados se complementan con el medidor portátil HQ11D, diseñado para aplicaciones de pH, el medidor de pH portátil HQ11D de Hach es un medidor digital portátil avanzado que no deja lugar a suposiciones a la hora de medir las muestras.

El medidor de pH digital HQD de Hach combina fiabilidad, flexibilidad y facilidad de uso. Los medidores portátiles HQD se conectan a una amplia gama de electrodos de pH inteligentes Intellical que abarcan diferentes tipos de muestras y entornos operativos para llevar a cabo análisis de calidad del agua, del medio ambiente y de procesos de tratamientos.

La sonda Intellical reconoce automáticamente el parámetro de análisis, almacena el historial de calibración y la configuración del método para así minimizar errores y reducir el tiempo de configuración.



(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)

Figura 2-5: Medidor portátil HQ11D

2.1.3 Electrodo PEAK INSTRUMENTS

PEAK Instruments es una empresa de alta tecnología integrada con I + D, producción, ventas y servicio de espectrofotómetros, medidor de pH, medidor de conductividad, medidor de oxígeno disuelto, medidor de concentración de iones, electrodo, colorímetro y medidor de turbidez, que tienen amplias aplicaciones en las siguientes áreas: metalurgia, farmacia, alimentación, salud, etc.

Tiene participación en más de 45 países incluidos Chile, Argentina, EE. UU., entre otros.

2.1.3.1 pH metro serie T-710

Este pH-metro tiene una pantalla en color de 7 pulgadas con alta resolución (1024 * 600) y sensibilidad, que puede mostrar más parámetros, más intuitiva y sencilla de leer datos. Sistema operativo en inglés, diseño humanizado con brillo de pantalla ajustable. El idioma del sistema se puede personalizar de acuerdo con los requisitos específicos.

Cumple con las normas GLP, con calibración automática, compensación automática de temperatura, almacenamiento de datos, exportación de datos USB, reloj, impresión inalámbrica, configuración de funciones, autodiagnóstico y otras funciones inteligentes.

La memoria integrada puede almacenar 1000 conjuntos de datos de prueba que pueden guardarse y transferirse a una unidad flash USB y abrirse con Excel, muy fácil y conveniente para editar. Reconocimiento automático de las soluciones buffer de pH estándar.

Con módulo Bluetooth estándar y compatibilidad con la impresión inalámbrica Bluetooth para facilitar las operaciones a los usuarios. Transmisión de datos opcional a PC y teléfono celular a través de Bluetooth inalámbrico. Evaluación inteligente del estado del electrodo para garantizar un uso preciso para los operadores.

Tabla 2-5: Especificaciones de modelos del pH metro T-710

Modelo		T-710L	T-710P	T-710H
Descripción		pH Metro de uso general de laboratorio, apto para medición de soluciones iónicas moderadas, como agua de superficie, de lagos o de desecho industrial. Puede ser utilizado en la mayoría de las áreas relacionadas con análisis de calidad de agua	Mide valores de pH de agua de alta pureza en industrias de potencia, petroquímica y otras.	pH Metro de alta precisión, apto para soluciones de iónicas débiles, líquidos turbios y soluciones coloidales. Puede ser utilizado en mediciones de pH de alta precisión, como investigación científica, control de calidad, biotecnología, titulación ácido-base.
pH	Rango de medición	-2,00 – 19,99 pH	-2,00 – 19,99 pH	-2,000 – 19,999 pH
	Resolución	0,1/0,01 pH	0,1/0,01 pH	0,1/0,01/0,001 pH
	Precisión	± 0,02 pH	± 0,02 pH	± 0,01 pH

mV	Rango de medición	-1999,9 mV – 0 – 1999,9 mV
	Resolución	0,1 mV
Calibración		Automática

(CROMTEK, n.d.)



(CROMTEK, n.d.)

Figura 2-6: pH metro T-710

2.1.4 Electrodo HANNA INSTRUMENTS

Hanna Instruments es una empresa que diseña, fabrica y distribuye productos científicos utilizados en el análisis de una multitud de industrias, incluyendo las de Laboratorio, Alimentos y Bebidas, Hidroponía, Acuicultura y Aguas Residuales.

Durante las últimas cuatro décadas, Hanna ha establecido una infraestructura mundial que consta de 4 instalaciones de fabricación, 3 centros de investigación y desarrollo y 47 oficinas dedicadas a ventas y soporte técnico en diferentes países en los cuales uno de ellos es Chile.

2.1.4.1 Medidor Edge dedicado a pH y ORP.

El medidor Edge presenta diagnósticos avanzados del electrodo de pH para garantizar mediciones sin preocupaciones. Los diagnósticos incluyen la función CAL Check exclusiva de Hanna que alerta a los usuarios sobre posibles problemas durante la calibración. El Sensor Check informa sobre la integridad del vidrio y de la unión y se habilita cuando se usan electrodos de pH opcionales con un matching pin.

Tabla 2-6: Especificaciones medidor Edge.

Rango de pH	-2,000 a 16,000 pH (Modo estándar), -2,00 a 16,00 pH (Modo Básico)
Resolución de pH	0,001 pH, 0,01 pH
Precisión de pH	± 0,01 pH, ± 0,002 pH
Rango ORP	± 2000,0 mV
Resolución ORP	0,1 mV
Exactitud ORP	± 0,2 mV; ± 1 mV
Rango mV	± 1000,0 pH en mV
Resolución mV	0,1 mV
Exactitud mV	± 0,2 mV
Electrodo de pH	Electrodo HI11310

(HANNA INSTRUMENTS, n.d.)



(HANNA INSTRUMENTS, n.d.)

Figura 2-7: Medidor Edge

2.1.5 Método de selección

Para seleccionar el medidor de pH adecuado se considerarán los siguientes parámetros: Facilidad de envío, especificaciones del equipo, facilidad de uso y precio.

Para cada uno de estos parámetros los puntajes serán en un rango de 1 a 4 siendo 4 el puntaje más alto cuando el envío es cercano cuando el equipo, tiene mejores especificaciones, cuando la facilidad de uso es mejor y cuando es más barato.

Tabla 2-7: Matriz de selección de equipo

Equipos	Envío	Especificaciones	Facilidad	Precio	Total
pH InPro 3100	1	3	1	2	7
pH InPro 3100i	1	3	3	2	9
Intellical PHC101	4	2	2	3	11
T-710	4	4	4	1	13
Medidor Edge	4	4	4	4	16

Por lo tanto, según la tabla anterior, el mejor equipo para la selección es el medidor Edge.

2.2 **Tasa de riego**

Para poder controlar la tasa de riego se puede medir el caudal que fluye por la tubería, ya que, por la ecuación de tasa de riego al tener el área como variable fija, nos queda que controlando el caudal se controlará la tasa de riego.

Ecuación 2-1: Tasa de riego

$$T_r \left[\frac{L}{H \times m^2} \right] = \frac{Caudal \left[\frac{L}{H} \right]}{Area \left[m^2 \right]}$$

2.2.1 Caudalímetro de hélice McPropeller

Es el caudalímetro de hélice más vendido en EE. UU, permite una medición de flujos de agua versátil y económica, especialmente indicado para flujos de agua sucia y otras aplicaciones con grandes volúmenes de agua.

Este caudalímetro facilita el mantenimiento en campo y no requiere ni alimentación externa ni baterías. Contiene un indicador de capacidad de flujo instantáneo, controla los sólidos de suspensión en agua sin obstrucciones.

Tabla 2-8: Especificaciones caudalímetro de hélice McPropeller

Calibración	Propela precalibrada de polímero resistente a la corrosión
Exactitud	± 2%
Material carcasa	Cuerpo de acero al carbono con revestimiento epoxi; inoxidable
Opciones	Propela: resistente a altas temperaturas; resistente a materiales ácidos y cáusticos Registro: Fluido directo/inverso; rueda indicadora manual para la prueba
Perdida de cabezal	Perdida de carga permanente muy baja
Repetibilidad	± 0,25%
Requerimientos (diámetro)	Necesita 5 a 10 diámetros aguas arriba y 1 a 2 diámetros aguas abajo
Tamaño lineal	50.8 mm – 2438.4 mm

(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)



(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)

Figura 2-8: Caudalímetro de hélice McPropeller

2.2.2 Caudalímetro electromagnético FPI Mag

Este caudalímetro combina la precisión y una fácil instalación para aplicaciones industriales. Debido a el diseño de multielectrodo y a su funcionamiento se obtiene una precisión semejante a caudalímetros electromagnéticos más potentes.

Los sensores de flujo están disponibles con alimentación por medio de batería o de energía solar lo que permite que se instale en remoto sin acceso a una toma de alimentación.

El caudalímetro está disponible con medición de flujo directo o medición de flujo bidireccional para tuberías con tamaños que van de 4 a 138 pulgadas.

Tabla 2-9: Especificaciones caudalímetro electromagnético FPI Mag

Exactitud	$\pm 0,5\%$ 0,3 m/s – 10 m/s $\pm 1\%$ 0,1 m/s – 0,3 m/s
Material carcasa	Cuerpo de acero inoxidable, hardware de inserción y electrodos del sensor certificados, revestimiento epoxi.
Rango de medición	0,1 m/s – 10 m/s

Repetibilidad	0,3% de la lectura
Tamaño lineal	100 mm a 3500 mm

(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)



(TERMODINAMICA LTDA, n.d.)

Figura 2-9: Caudalímetro electromagnético FPI Mag

2.2.3 Caudalímetro Ultrasonido

Este caudalímetro está diseñado para mantener el monitor montado a muro, mientras que dos sensores, conectados por cables al monitor, miden el flujo en cañerías con un diámetro de 15 a 6000 mm. Los sensores se adhieren a la tubería por imanes si la cañería es metálica o bien por abrazaderas.

Opera en flujos con un rango de 0,3 m/s a 32 m/s con una alta exactitud es sus mediciones. Cuenta con una salida análoga de 4-20 mA o 0-20 mA y comunicación Modbus RTU y Modbus ASCII + TDS7, características que le permiten integrarse fácilmente con la mayoría de los sistemas de comunicación industrial.

Tabla 2-10: Especificaciones caudalímetro ultrasonido

Diámetro de medición	Cañerías desde 15 mm a 6000 mm
Velocidad flujo	0,3 – 32 m/s
Exactitud	± 1%
Repetitividad	0,2 %
Salida	4-20 mA o 0-20 mA
Entradas análogas	3 entradas de 4/0-20 mA, 2 PT100 para medir energía calórica del flujo mediante medición de flujo de entrada y salida
Comunicación	Modbus RTU y Modbus ASCII + TDS7
Memoria	Tarjeta SD 2GB, datos en formato txt, no requiere software.
Temperatura de trabajo	-30 – 80 °C
Alimentación	220 VAC
Incluye	Sensor ultrasonido con cable de 3m DN50-DN1000; 2 abrazaderas.

(Veto, n.d.)



(Veto, n.d.)

Figura 2-10: Caudalímetro Ultrasonido

2.2.4 Bajada de suero

Una opción muy económica es ocupar bajadas de suero para controlar la tasa de riego, esto porque al ser una pila que tendrá pequeñas dimensiones y se ocupará en el laboratorio, la tasa de riego será muy baja por lo que esta es una buena opción para abaratar costos y poder regular de mejor manera la tasa de riego.

Este aparato tiene la capacidad de administrar soluciones a más de 75 ml por hora o 0,075 litros por hora, además es un macrogotero que cumple con la norma estándar de que 1 ml equivalen a 20 gotas.



(Flexingmed, n.d.)

Figura 2-11: Bajada de suero

2.2.5 Método de selección

Para seleccionar el método adecuado se considerarán los siguientes parámetros: Facilidad de envío, especificaciones y facilidad de implementación y precio.

Para cada uno de estos parámetros los puntajes serán en un rango de 1 a 4 siendo 4 el puntaje más alto cuando el envío es cercano cuando el equipo tiene mejores especificaciones, cuando la facilidad de implementación es mejor y cuando el precio es más barato.

Tabla 2-11: Matriz de selección para los caudalímetros.

Equipos	Envío	Especificaciones	Facilidad	Precio	Total
Caudalímetro de hélice	4	2	2	2	10
Caudalímetro electromagnético	4	2	2	2	10
Caudalímetro ultrasonido	4	4	3	1	12
Bajada de suero	4	1	4	4	13

Por lo tanto, según la tabla anterior, el mejor equipo para la selección es la bajada de suero.

3. CAPÍTULO: SISTEMA DE CONTROL PARA PILA DE LIXIVIACIÓN

Para poder establecer el sistema de control, es necesario indicar que actualmente el laboratorio de la universidad no cuenta con una pila de lixiviación, para esto se creara una pila de lixiviación de una menor escala en donde sus dimensiones y partes se especificaran a continuación.

3.1 Pila de lixiviación del laboratorio

Debido a que las dimensiones del laboratorio no permiten gran espacio para la pila y, además, el mineral en la universidad no es abundante para crear una gran pila, es que se dimensionara una pila de 3 litros.

3.1.1 Dimensiones de la pila de lixiviación

Para efectos del cálculo se considerará que la pila tendrá una altura de 15 cm y que la forma de la pila será rectangular donde el largo será 3 veces más que el ancho.

Como el volumen establecido de la pila son 3 litros, sería equivalente decir que el volumen será $0,003 \text{ m}^3$ o 3000 cm^3 , siendo este último valor el que se ocupara para el cálculo de las dimensiones de la pila.

Ecuación 3-1: Ecuación volumétrica para una pila rectangular

$$V = H \times A \times L$$

Donde: V es el volumen en cm^3

H es la altura en cm

A es el ancho en cm

L es el largo en cm

Como anteriormente se dijo que el largo seria 3 veces mayor al ancho, la ecuación quedaría de la siguiente manera.

$$V = H \times 3 A^2$$

$$A = \sqrt{\frac{V}{3 \times H}} = \sqrt{\frac{3000 [cm^3]}{3 \times 15 cm}} = 8,165 cm \approx 8,2 cm$$

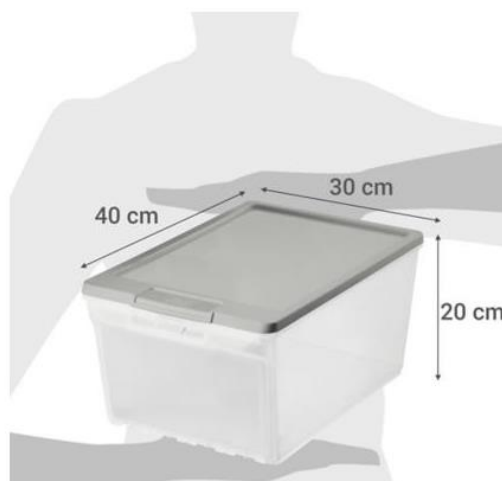
$$L = 3 \times A = 3 \times 8,165 = 24,495 cm \approx 24,5 cm$$

Por consiguiente, las dimensiones de la pila serian de ancho 8,2 cm, de largo 24,5 cm y de altura de 15 cm. Dando como resultado una pila de volumen final de 3013,5 cm³ o 3,0135 litros, con un área de riego de 200,9 cm².

3.1.2 Construcción de la pila

Lo primero que se necesita para la construcción de la pila es tener un contenedor en el cual sostenga las distintas partes que forman parte de esta.

Para esto, teniendo en consideración que el volumen de la pila será de 3,0135 litros, es que se seleccionó un contenedor de plástico transparente de 15 litros con el objetivo de que contenga todas las partes y además al ser transparente será visible todos los componentes de la construcción. Este contenedor tiene un valor en el mercado de \$5.290.



(SODIMAC, n.d.)

Figura 3-1: Caja contenedora de plástico

Luego, la primera capa que se necesita es una capa de áridos finos de protección donde se acomodará suavemente la capa impermeable, la capa de áridos tendrá 2 centímetros bajo y sobre la membrana impermeable.

Buscando en el mercado se seleccionó una arena fina la cual lo mínimo que venden son sacos de 25 kilos, rindiendo aproximadamente $0,25 \text{ m}^3$ teniendo un valor de \$1.190.



(SODIMAC, n.d.)

Figura 3-2: Saco de arena fina de 25 kilos

Entre esta capa de árido fino, ira una membrana impermeable de plástico inerte a la acción de los agentes químicos, en esta categoría podemos encontrar el HDPE, LDPE, VLDPE y PVC, de los cuales se seleccionó una membrana de HDPE de 1 metro x 1 metro con un valor en el mercado de \$15.742.



(Linio, n.d.)

Figura 3-3: Membrana de polietileno de alta densidad (HDPE)

Posteriormente, se coloca una tubería de drenaje la cual debe ser perforada y corrugada, esta tubería cumple 2 funciones, la primera es evitar la inundación de la pila permitiendo una rápida evacuación de la solución una vez llega al fondo de la pila, la otra función es airear a la pila en el caso de que el mineral necesite de oxígeno para la lixiviación. En el mercado se seleccionó una tubería de 10 cm de diámetro con un precio por metro lineal de \$4.600.



(SODIMAC, n.d.)

Figura 3-4: Tubería de drenaje

Luego de la tubería de drenaje, alrededor y sobre ella se coloca una capa de ripios de protección que constituye la última capa de protección del revestimiento en donde sobre esta se colocara el mineral a lixiviar, además reparte las presiones sobre la tubería de drenaje. Consiste en una capa de 15 cm y su granulometría debe ser 100% - 3" y 100% + 1 ½ ".

En el mercado se encontró y selecciono una gravilla de rio, la cual su cantidad mínima son sacos de 40 kilos con una granulometría que va desde los 3 a 6 cm, por lo que se tendría que tamizar para cumplir con el requerimiento dicho anteriormente, este saco tiene un valor de \$3.850.



(Mercado Libre, n.d.)

Figura 3-5: Gravilla de rio

Posteriormente, se necesita recolectar la solución lixiviada, para esto se ocupa una canaleta de recolección que está integrada al revestimiento impermeable y esta debe tener una pendiente de 0,5 a 1%.

En el mercado se seleccionó una canaleta para lluvia de PVC, la cual solo la venden de 4 metros en un valor de \$6.010.



(SODIMAC, n.d.)

Figura 3-6: Canaleta de recolección

Como el volumen de la pila es de $3013,5 \text{ cm}^3$, y asumiendo que el mineral a tratar tendrá una densidad aparente de $2,5 \text{ gramos por cm}^3$, es que se necesitaran 7,5 kilos aproximadamente de mineral donde el valor por kilo es de aproximadamente de \$1000 pesos, por lo que el valor final será de \$7.500.

También se necesitará una cuña o unos trocitos de madera de 5 cm de altura para darle a la pila una pendiente de 5 grados.

Por consiguiente, para armar una pila de lixiviación en el laboratorio en base a lo expuesto anteriormente se necesitaría una inversión de \$44.182.

3.2 Sistema de control

Como ya se dimensiono la pila para su construcción, ahora se mostrará cómo se implementará el sistema de control para las variables críticas mencionadas anteriormente.

3.2.1 Sistema de control para medir el pH y potencial eléctrico

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó el medidor Edge de la empresa Hanna Instruments que tiene un valor de \$420.990, donde trae todo lo necesario para medir, sostener y calibrar el electrodo con distintas soluciones buffer.

El valor de la medición de pH y potencial se ira mostrando en la pantalla medidor, debido a esto y a que las variables no tienen cambios bruscos y repentinos, es que se controlará manualmente estos valores, modificándolos en el caso de que no estén en el rango deseado, por ende, el sistema de control será manual.

3.2.2 Sistema de control para medir tasa de riego

Al igual que el control para el pH, la tasa de riego se controlará manualmente con la bajada de suero ya que tiene un sistema que regula el paso de las gotas y dependiendo de la tasa de riego se calcularan las gotas por minuto que necesitara el riego.

La pila tendrá 2 bajadas de suero para el riego, las cuales se le administrará la solución por gravedad. El valor total para las bajadas de suero es de \$960.

Estas bajadas irán conectadas a una caja plástica la cual deberá tener un mínimo de 12,6 litros para suministrar el líquido necesario, esto debido a que como la bajada de suero puede administrar 75 ml por hora y los estudiantes tendrán que ir a preparar la solución acida 2 vez a la semana da como resultado que se necesitarán la cantidad de litros mencionada.

Esta caja plástica será de las mismas características en donde se construirá la pila por lo que será una caja plástica de 15 litros con un precio de \$5.290. Por lo tanto, el sistema de control de tasa de riego tendrá un total de \$6.250.

3.3 Inversión total

Como se busca crear 15 pilas de lixiviación por año, se podría multiplicar los valores mencionados anteriormente, de la creación de cada pila y de su sistema de control, pero esto no sería el valor real ya que en el proceso de construcción sobrarían materiales y el medidor de pH para el sistema de control se podría ocupar en cada una de las pilas.

Para esto se presenta en la tabla 3-1, un flujo de caja a tres años con solo egresos de dinero lo que nos dirá cuanto es lo necesario para invertir y realizar el proyecto.

En el primer año, se necesitará una inversión de \$809.684 lo que equivale a 1 saco de arena fina, dos metros cuadrados de membrana, seis metros de tubería de drenaje, ocho sacos del ripio de protección, ocho metros de canaleta, ciento doce kilos aproximadamente de mineral, treinta cajas de plásticos, el sensor de pH y treinta bajadas de suero.

Pero en cambio, para el segundo y tercer año hay gastos que no se tendrán que realizar, por lo que cada año deberá tener una inversión de \$208.394 ya que el sensor de pH, las bajadas de suero y las cajas plásticas se puede volver a utilizar y la arena comprada el primer año alcanza hasta el tercer año.

Por ende, si el proyecto dura solo un año, cada pila de lixiviación tendrá un valor de \$53.979 para la realización de 15 pilas. El segundo año la sumatoria de las pilas realizadas será 30 por lo que el valor de cada pila será de \$33.936. Por último, en el tercer año la sumatoria será de 45 pilas donde cada una tendrá un valor de \$27.255.

Tabla 3-1: Inversión total necesaria para cada año

ITEM	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3
Arena Fina	\$1.190 (0,04 UF)	\$ -	\$ -
Membrana	\$ 31.484 (1,05 UF)	\$ 31.484 (1,05 UF)	\$ 31.484 (1,05 UF)
Tubería drenaje	\$ 27.600 (0,92 UF)	\$ 27.600 (0,92 UF)	\$ 27.600 (0,92 UF)
Ripio de protección	\$ 30.800 (1,03 UF)	\$ 30.800 (1,03 UF)	\$ 30.800 (1,03 UF)
Canaleta	\$ 12.020 (0,40 UF)	\$ 6.010 (0,20 UF)	\$ 6.010 (0,20 UF)
Mineral	\$ 112.500 (3,75 UF)	\$ 112.500 (3,75 UF)	\$ 112.500 (3,75 UF)
Caja de plástico	\$ 158.700 (5,30 UF)	\$ -	\$ -
Sensor pH	\$ 420.990 (14,05 UF)	\$ -	\$ -
Bajada de suero	\$ 14.400 (0,48 UF)	\$ -	\$ -
Total	\$ 809.684 (27,02 UF)	\$ 208.394 (6,95 UF)	\$ 208.394 (6,95 UF)
Por pila	\$ 53.979 (1,80 UF)	\$ 33.936 (1,13 UF)	\$ 27.255 (0,91 UF)

3.4 **Vistas de todo el sistema**

A continuación, se presentaras las vistas frontal, lateral y superior a escala de cómo debería quedar la pila de lixiviación con los métodos de control.

Para efectos prácticos estas vistas fueron dibujadas sin la pendiente de 5 grados que requiere la pila.

3.4.1 **Vista frontal y lateral**

En estas vistas, ver figura 3-7 y 3-8, se puede apreciar las distintas partes en donde se coloca la pila a lixiviar, en color beige tenemos la arena, en color negro tenemos la membrana de polietileno, en color rojo tenemos la tubería de drenaje, en color plomo tenemos la capa protectora de ripio, en naranja la

pila a lixiviar y en verde las bajadas de suero que suministraran la solución lixiviante.

También en las vistas se pueden ver sin ningún color definido la caja donde se tendrá la solución lixiviante y de color blanco se tiene la canaleta de recolección.

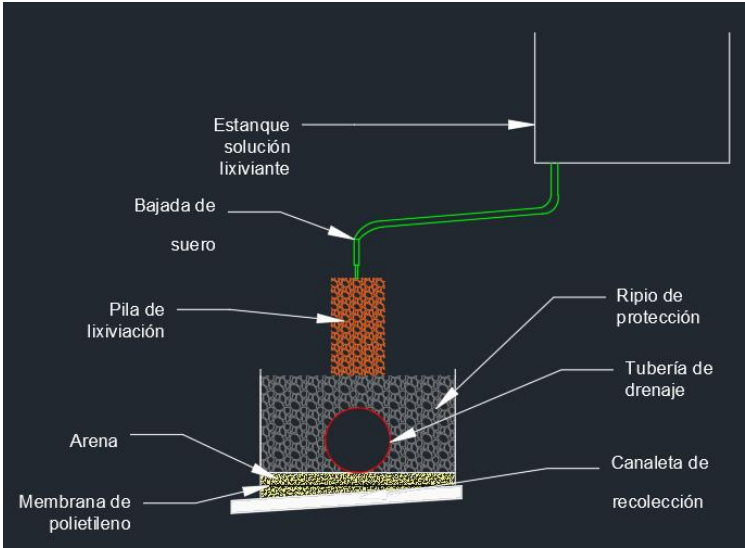


Figura 3-7: Vista frontal del sistema de control

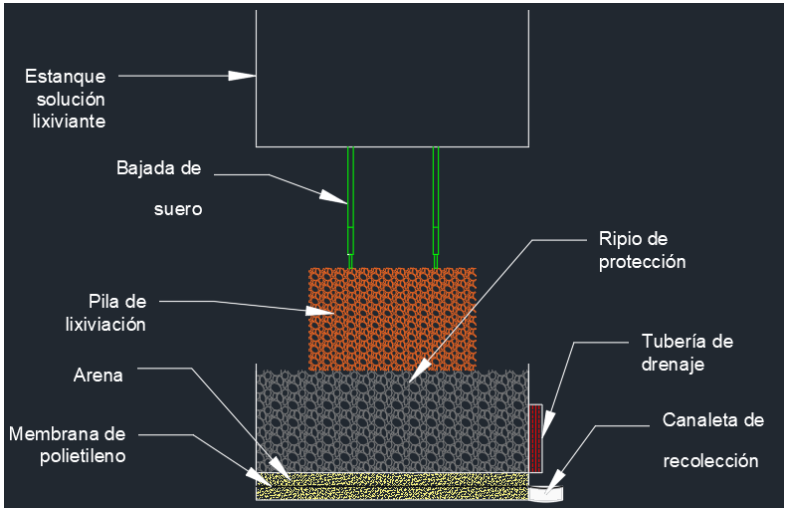


Figura 3-8: Vista lateral sistema de control

3.4.2 Vista Superior

A diferencia de las vistas anteriores, ver figura 3-9, en esta no se puede apreciar las capas inferiores a la capa de ripios de protección. La canaleta, la tubería, la pila, las bajadas de suero y la caja donde estará la solución lixivante si se pueden apreciar.

Por otra parte, en esta vista se ve un triángulo de color magenta en donde tendrá que ir electrodo para medir el pH y potencial eléctrico de la pila de lixiviación.

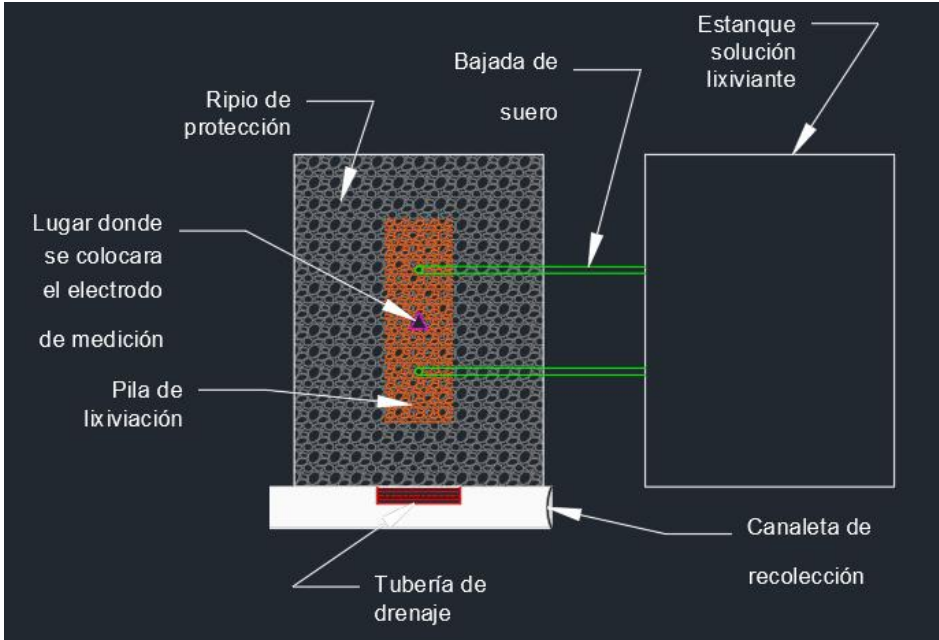


Figura 3-9: Vista superior del sistema de control

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el primer capítulo se puede concluir que la lixiviación es una parte fundamental de la vía hidrometalúrgica que repercute no solo en la recuperación de cobre, sino también en el costo total que tendrá el proceso.

La lixiviación en pilas cada día es más difícil ya que los óxidos de cobre cada vez disminuyen más por lo que sus leyes también están disminuyendo lo que está provocando que la cantidad de cátodos de cobre producidos al año baje haciendo el proceso menos beneficioso.

En la gran minería, a diferencia del pasado, se están implementando sistemas de control que optimicen la recuperación. Para esto es fundamental conocer las características de la lixiviación y las variables que afectan al proceso.

Como se vio en el capítulo, las variables que pueden ser controladas en el laboratorio son la tasa de riego, el pH y potencial eléctrico, lo que permitirá controlar el proceso para obtener una óptima recuperación sin tener un exceso de riego, aunque todas las variables expuestas son fundamentales para este objetivo.

En el segundo capítulo, lo primero que se busco fue diferenciar distintos métodos de medición y control del pH y potencial eléctrico, en los cuales dependiendo de las características, implementación y precio se eligió un electrodo que permite medir las dos variables en un solo equipo, el cual es el medidor EDGE .

Luego, se buscó la forma de controlar la tasa de riego mediante la medición del caudal que fluye por la tubería que suministra la solución acida, si bien hay opciones bastante buenas como el caudalímetro de ultrasonido, estos aparatos electrónicos son muy caros por lo que se buscó una forma más barata de controlar el caudal, encontrando así las bajadas de suero que son muy económicas y permiten controlar el caudal mediante las gotas por minuto que caen por efecto de la gravedad.

En el tercer y último capítulo se mostró como se construirá la pila de lixiviación con todas las partes que necesita y las dimensiones que debe tener cada elemento. Es relativamente barato construir las pilas, que costaran el primer año \$374.294, tomando en cuenta que lo más caro será la inversión que se necesita para el medidor de pH que costara \$420.990, siendo las primeras 15 pilas en las cuales más se gastará ya que diversos materiales sobran debido a que en el mercado se venden en un formato mayor al que se requiere o se puede reutilizar para los años posteriores.

Posteriormente, se establecieron los sistemas de control que para ambas variables críticas será de control manual, lo que quiere decir que se registraran los datos y las variables tendrán que ser reguladas por la persona encargada de la pila, ya sea aumentando

o disminuyendo la acidez de la solución lixivante para el pH y potencial eléctrico, o haciendo el goteo más rápido o lento para el control de tasa de riego.

Por último, se tiene que la inversión para el primer año de \$809.684 o 27,02 UF es elevada netamente por el medidor de pH y potencial eléctrico, pero si se requieren construir más pilas en el laboratorio el costo ira disminuyendo ya que el medidor de pH servirá para cada una de las pilas creadas y abran materiales que se pueden reutilizar. Se presentaron las vistas a escala de cómo debería verse todo el sistema, lo único que no se dimensiono fue la base que tendrá que soportar la caja que contendrá la solución lixivante, esto debido a que dependerá de la ubicación que tendrá en el laboratorio lo cual imposibilita dimensionarla ahora.

Como conclusión en general, es factible técnicamente implementar el sistema de control para la pila de lixiviación del laboratorio ya que como se mostró, los materiales y los equipos seleccionados tienen la capacidad técnica y la factibilidad de envío para realizar el proyecto, pero económicamente no es factible, ya que la inversión total para la construcción de 15 pilas es muy alta, aunque se vuelve más factible económicamente si se piensa que el proyecto durara 3 años o más. Si bien se buscó que todas las variables críticas fueran medidas mediante sensores electrónicos, en la práctica no se pudo medir electrónicamente la tasa de riego debido al alto costo que genera esto.

Como recomendación, para aun bajar más los costos se podrían ocupar papel pH para medirlo y que el proyecto pudiera ser viable, pero no se consideró porque se perdería el objetivo de controlar las variables con sensores electrónicos. Otra recomendación seria que la membrana de polietileno, la canaleta de recolección, la tubería de drenaje y el ripio de protección puedan volver a reutilizarse desde el segundo año, lo cual en este caso no se consideró porque habría que determinar si repercute o no en el proceso.

En lo personal aprendí mucho más sobre la lixiviación y sobre cómo controlar el proceso para optimizar la recuperación de cobre sin tener un gasto excesivo de ácido.

BIBLIOGRAFIA

Referencias

- Avendaño, C., & Ramirez, A. (s.f.). Aspectos constructivos de un sistema de lixiviación en pilas. *Boletín Minero*, págs. 2-9. Obtenido de <http://bosques.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/24763/Aspectos%20constructivos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Broggi, I. (2015). *Lixiviación Fundamentos y Aplicaciones*. Obtenido de <https://hydrometallurgyperu.wordpress.com/lixiviacion-en-pilas/>
- Cárdenas, F., Díaz, M., Guajardo, C., & Oliva, M. B. (s.f.). *Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas*. Obtenido de https://www.ucursos.cl/usuario/27d1b90415d4029652708fa347c18e40/mi_blog/r/1_LIXIVIACION_DE_MINERALES_MEDIANTE_PILAS_Y_BATEA1.pdf
- Cochilco. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiJq5vArsHwAhWPIbkGHeK4D9oQFjAJegQIDRAD&url=https%3A%2F%2Fwww.cochilco.cl%2FListado%2520Temtico%2Fsulfuros%2520primarios_desaf%25C3%25ADos%2520y%2520oportunidades.pdf&
- COCHILCO. (2019). *Mercado chileno del ácido sulfúrico al año 2018*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20chileno%20de1%20%C3%A1cido%20sulf%C3%BArico%20al%20a%C3%B1o%202028%20Vfinal.pdf>
- COCHILCO. (s.f.). *Anuario y estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016*. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/Lists/Anuario/Attachments/17/Anuario-%20avance7-10-7-17.pdf>
- CODELCO. (2018). *Codelco Educa*. Obtenido de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf
- CROMTEK. (s.f.). *CROMTEK*. Obtenido de <https://www.cromtek.cl/producto/ph-metro-serie-t-710-peak-instruments/>
- Domic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones*. Obtenido de <https://bibliotecadigital.usm.cl/info/hidrometalurgia-fundamentos-procesos-y-aplicaciones-00566008>
- Flexingmed. (s.f.). *Flexingmed*. Obtenido de <https://flexingmed.cl/web/producto/equipo-para-administrar-soluciones-healflex-bajada-suero-macrogoiteo-50-unidad/>
- Guiachetti, D. (2011). *Consumo de ácido sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre*. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104139>
- HANNA INSTRUMENTS. (s.f.). *Hanna Chile*. Obtenido de <https://hannachile.com/medidor-edge-dedicado-a-ph-orp-hi2002-02.html>
- Linio. (s.f.). *Linio*. Obtenido de https://www.linio.cl/p/1mx1m-hdpe-piscina-de-peces-revestimiento-estanque-membrana-ykorik?adjust_t=1zira0_f1h7ws&adjust_google_network=u&adjust_google_placement=&adjust_campaign=chl-semun-spla_CL_AW.Shopping.Hogar-IMP.Smart&adjust_adgroup=120215810818&utm
- Lopez, E. (2012). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD DE MATERIALES DEPOSITADOS EN PILAS DE LIXIVIACIÓN*. Obtenido de

http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-lopez_ea/pdfAmont/cf-lopez_ea.pdf

Mercado Libre. (s.f.). *Mercado Libre*. Obtenido de https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-607212169-gravilla-rodada-de-rio-saco-40k-_JM?matt_tool=84538317&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=11597133993&matt_ad_group_id=111416017605&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=4791

Mettler Toledo. (s.f.). *MT*. Obtenido de <https://www.mt.com/es/es/home/products/Process-Analytics/pH-probe/in-line-pH-probe/inpro3100-120-pt1000.html>

Repetto, C. (2018). *EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LIXIVIACIÓN FUTURA DE SULFUROS DIVISIÓN RADOMIRO TOMIC-CODELCO*. Obtenido de http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/3381/4/Tesis_Evaluacion_de_tecnologias_para_lixivacionImage.Marked.pdf

SODIMAC. (s.f.). *SODIMAC*. Obtenido de www.sodimac.cl

TERMODINAMICA LTDA. (s.f.). *Termodinamica*. Obtenido de <https://www.termodinamica.cl/electrodo-de-ph-intellical-phc101-para-aplicaciones-de-campo-bajo-mantenimiento-relleno-de-gel-cable-de-5-metros/product-details?id=53559069761>

Tribuladores SLU. (s.f.). *Medidor de pH*. Obtenido de <https://medidordeph.com/funcionamiento-cuidado-calibrado-medidor-de-ph>

Veto. (s.f.). *www.Veto.cl*. Obtenido de https://www.veto.cl/flujo metro-ultrasonido-montaje-a-muro-n0646058/p?idsku=731&gclid=CjwKCAjwlrqHBhByEiwAnLmYUIUdUYkcI2hQuGxM2Uruu85od2_ntcA-EhnBthhI3dWVNHtGHdo01hoCziEQAvD_BwE

Yalitech. (s.f.). *Yalitech*. Obtenido de <http://www.yalitech.cl/bomba-dosificadora-eone-mf>

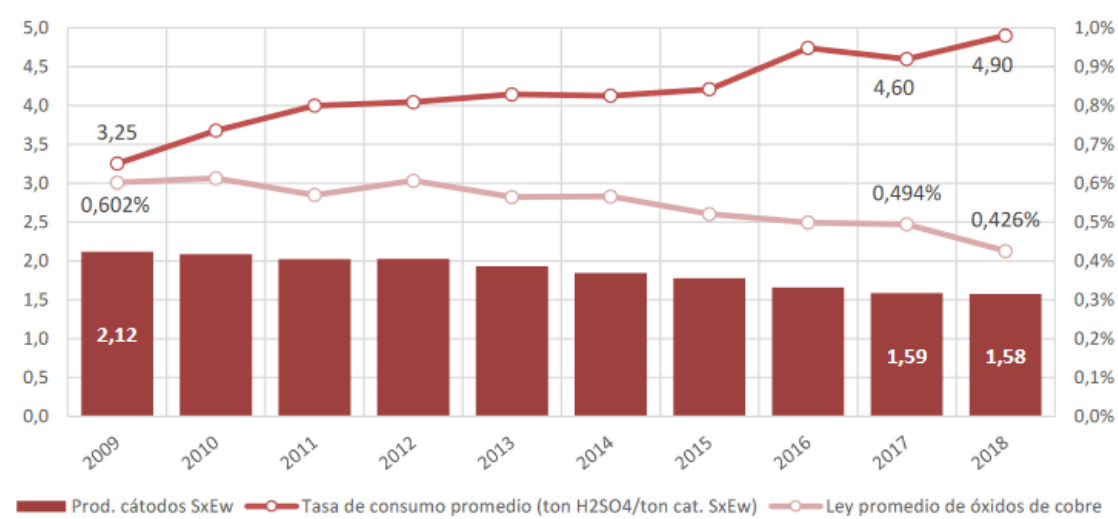
ANEXOS

ANEXO 1: Tabla de producción de cobre por productos.

II) POR PRODUCTOS / By Product Type										
PRODUCCIÓN DE MINA / Mine Production	5.557,0	5.327,6	5.394,4	5.418,9	5.262,8	5.433,9	5.776,0	5.761,1	5.772,1	5.552,6
PRODUCCIÓN DE FUNDICIÓN / Smelter Production	1.514,3	1.369,2	1.522,3	1.559,8	1.522,3	1.342,4	1.358,3	1.356,2	1.496,2	1.490,8
PRODUCCIÓN DE REFINADO / Refined Production	2.936,5	3.057,6	3.276,6	3.243,9	3.092,4	2.902,0	2.754,9	2.729,4	2.688,4	2.612,5
Cátodos SX-EW / SX-EW cathodes	1.832,1	1.971,0	2.117,5	2.088,5	2.024,8	2.028,8	1.932,9	1.844,0	1.778,4	1.660,3
Cátodos E.R. / ER cathodes	985,4	987,7	1.071,3	1.054,9	998,6	873,2	822,0	885,4	910,0	952,2
Refinado a fuego / Fire refined	1190	98,9	87,8	100,5	690	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

(COCHILCO)

ANEXO 2: Tabla de Producción cát. SxEw, tasa de consumo de ácido y ley de óxidos promedio, 2009 – 2018.



(COCHILCO, 2019)

ANEXO 3: Consumo aparente, producción, importaciones y exportaciones de ácido sulfúrico en Chile.

(Miles de TM) / (kMT)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
CONSUMO APARENTE / APPARENT CONSUMPTION ⁽¹⁾	5.935,9	7.172,9	6.935,4	7.768,6	8.373,7	8.438,4	8.196,6	7.864,8	7.841,5	7.363,0
PRODUCCIÓN TOTAL / TOTAL PRODUCTION ⁽²⁾	4.775,0	4.858,4	5.076,6	5.138,3	5.272,3	5.242,0	5.414,6	5.635,2	5.715,2	5.708,0
EMBARQUES DE IMPORTACIÓN / IMPORTS	1.285,1	2.398,5	1.872,3	2.643,7	3.164,0	3.211,5	2.834,3	2.246,9	2.180,7	1.727,2
EMBARQUES DE EXPORTACIÓN / EXPORTS	124,2	83,9	13,5	13,4	62,6	15,0	52,3	17,3	54,4	72,2

⁽¹⁾ Consumo aparente= Producción + Importaciones - Exportaciones / Apparent Consumption= Production + Imports - Exports
⁽²⁾ Cifras estimadas / Estimated

(COCHILCO)