

# LIXIVIACIÓN

*"El riego"*

Después del Chancado el cobre oxidado pasa por la etapa de Lixiviación que, básicamente, consiste en recuperar los metales presentes en el mineral mediante la aplicación de agua y ácido sulfúrico.

## Índice temático

Consideraciones necesarias para la Lixiviación .....	3
Etapas de la Lixiviación .....	4
Construcción de las pilas y apilamiento .....	4
Tipos de pilas según su utilización .....	5
Pilas dinámicas .....	5
Pilas permanentes .....	5
Sistema de carguío .....	5
Sistema de riego y recolección de soluciones .....	6
Recolección de soluciones .....	7
Membranas impermeables .....	7
Tipos de soluciones .....	8
Lixiviación de minerales de cobre .....	9
Selección de agentes lixiviantes .....	9
Lixivante natural .....	10
Lixivante preparado .....	10
Aplicación de la solución lixivante .....	11
Extracción por solventes (SX) .....	12
Objetivos del proceso de extracción por solventes.....	12
Etapas y mecanismos de la extracción por solventes.....	13
Procedimiento básico.....	13
Etapa de extracción o carga del reactivo .....	14
Etapa de reextracción o descarga del reactivo .....	15
Ejemplos típicos de SX.....	15
Reactivos extractantes usados en Sx para recuperación de cobre .....	15
Reactivos extractantes usados comercialmente.....	15
Propiedades de los agentes extractantes.....	16
Selección de los agentes extractantes.....	17
Clasificación de los agentes extractantes.....	18
Extractantes tipo quelantes .....	18
Reactivos del tipo ácido orgánico .....	20
Reactivos del tipo sustitución ligante .....	20
Reactivos del tipo extracción neutra o solvente .....	21
Reactivos orgánicos extractantes con formación de par iónico .....	21
Perdidas de extractante.....	22
Diluyentes y modificadores .....	23
Elección del diluyente .....	24
Reactivos modificadores.....	26
Solución acuosa.....	26
Equipamiento básico de extracción por solvente.....	26
Parámetros de la operación .....	27

Para realizar el proceso de Lixiviación se requiere de un patio o superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Cuando el patio es recuperado para reutilizarlo con nuevo material se trata de Lixiviación en depósitos. Si el patio no es recuperado y el mineral agotado queda en la pila como vertedero que se restaura, se trata de Lixiviación en pilas.

Una vez preparado el mineral, **se coloca en montones de sección trapezoidal y altura calculada (pilas) para proceder a su riego con una solución preparada.** Tras percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (sal o metal).

## CONDICIONES NECESARIAS PARA LA LIXIVIACIÓN

Para la lixiviación en pilas se requiere de ciertos elementos, condiciones y consideraciones tales como:

- Disponer de amplias superficies de terreno, relativamente llanas, con menos de 10% de pendiente.
- Calcular los flujos de aporte y evaporación para mantener un balance equilibrado de líquidos efluyentes.
- Disponer de represas de líquidos intermedios y finales.
- Considerar un margen de sobrecapacidad del sistema para absorber situaciones de exceso por tormentas lluvias en el área en explotación o explotada.
- Capacidad y flexibilidad para admitir grandes variaciones de leyes de mineral y tiempos de lixiviación.
- Utilizar láminas impermeables sencillas para evitar pérdidas por infiltración y la contaminación del subsuelo.
- Realizar un estudio geomecánico del material depositado para alcanzar la máxima altura posible y evitar el derrumbe de la pila.
- Preparar el material para llevarlo al tamaño adecuado, de manera de lograr una permeabilidad mínima suficiente, que libere el mineral en la superficie y percole adecuadamente.
- Organizar un conjunto de pilas de manera de ordenar el flujo de líquidos en forma seriada para lograr un enriquecimiento progresivo de la solución al pasar de una pila a otra.



## ETAPAS DE LA LIXIVIACIÓN

Para que la Lixiviación tenga éxito se tienen que cumplir varios requerimientos, siendo el primero asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo.

Esto depende de los siguientes factores, los que deben ser considerados en todas las etapas del proceso:

1. La localización de los minerales a disolver.
2. Volumen del material y distribución de tamaños.
3. Área expuesta.
4. Superficie específica.
5. Tamaño de partículas.
6. Porosidad.
7. Presión capilar.
8. Rugosidad o aspereza de las superficies.

## CONSTRUCCIÓN DE LAS PILAS Y APILAMIENTO

El mineral aglomerado con cierta cantidad de ácido y de agua (en kg/t) según su mineralogía y su ganga, se acomoda en las pilas, que formarán los módulos de riego, con superficie y altura determinadas, ángulo de reposo del mineral ya establecido, y con pendiente en dos sentidos:

- Inclinación lateral, para el drenaje
- Inclinación en sentido longitudinal, para la evacuación de las soluciones.

A este material mineralizado apilado y preparado, se le determina la densidad aparente que varía según su porcentaje de finos.

El apilamiento se puede realizar mediante distintos métodos, entre ellos, un sistema de correas, o bien, a través de apiladores móviles.

Las pilas se cargan habitualmente entre 3 y 8 metros, sobre un sustrato impermeable, normalmente protegido con una membrana de plástico que puede ser de tipo polietileno de alta densidad (HDPE), de baja densidad (LDPE), de muy baja densidad (VLDPE) o de cloruro de polivinilo (PVC), que puede tener desde 0,1 mm a 1,5 mm de espesor según las exigencias de cada aplicación.

Para ayudar a la recolección de las soluciones, se usan cañerías de drenaje perforadas y canaletas abiertas.



## TIPOS DE PILAS SEGÚN SU UTILIZACIÓN

### PILAS DINÁMICAS

Denominadas también de tipo "on-off", en las que el mineral se remueve y se envía a botaderos después de la lixiviación, y la base de la pila se puede reutilizar. Para las pilas dinámicas, se puede elegir cualquier configuración que sea aceptable para la operación de los equipos de carga y descarga, pero generalmente, se prefiere un rectángulo alargado. En el caso particular de las operaciones mayores, que presentan cierta rigidez con los equipos de transferencia de minerales, se prefiere una configuración rectangular doble (dos rectángulos paralelos y adyacentes) con semicírculos en los extremos, donde se forma la pista de giro de los equipos de carga y de descarga.

### PILAS PERMANENTES

En las que las nuevas pilas se cargan sobre las anteriores, aprovechando o no la impermeabilización existente.

La configuración de una pila existente puede tener cualquier geometría según las disponibilidades de espacio de cada lugar, pero cuando no hay restricciones topográficas, normalmente se usa una configuración rectangular, en que una nueva capa sólo se podrá colocar cuando haya concluido la lixiviación de la capa inferior que se debe cubrir.

## SISTEMA DE CARGUÍO

Para el carguío del material se utiliza una variedad de sistemas según el tamaño de las instalaciones de cada faena.

En el caso de faenas pequeñas que van desde 300 a 2.000 ton/día (como por ejemplo, Dos Amigos y Punta del Cobre) hasta 5.000 y 10.000 ton/día (como Quebrada - Damiana en Salvador y Lince, en Michilla) se usan sistemas de camiones y apiladores de correa autopropulsados, evitando el uso de cargadores frontales, ya que destruyen los aglomerados. Este sistema de carguío se puede aplicar a pilas dinámicas y permanentes.

En faenas mayores, que van desde 10.000 hasta 50.000 ton/día (Mantoverde, Cerro Colorado y Quebrada Blanca) se usan correas modulares articuladas (grasshoppers) que terminan en un apilador de correa o stacker. En este caso la operación puede ser realizada con pilas dinámicas o permanentes, sin restricción.

En faenas aún mayores, desde 75.000 a 150.000 ton/día (El Abra y Radomiro Tomic) se prefieren complejos sistemas apiladores sobre orugas alimentados con correas transportadoras estacionarias y móviles. Cuando se requiere mover el material ya lixiviado desde las pilas, por ser un sistema de pilas dinámicas, normalmente se utilizan recolectores tipo pala de rueda con capachos, conocidos como "rotopala" o "bucketwheel".

En estos casos de faenas mayores, se ha preferido en general el sistema de canchas de lixiviación dinámicas por el excesivo tonelaje de mineral, puesto que obligaría a un complicado movimiento permanente de avance de las correas alimentadoras, si se quisiera operar en pilas permanentes con avance continuo.

Pero en Zaldívar y en el proyecto de rípios aglomerados de Chuquicamata, estos equipos han operado con un apila de tipo permanente y, por lo tanto, no han requerido instalar el sistema recolector de la rotopala.

## SISTEMA DE RIEGO Y RECOLECCIÓN DE SOLUCIONES

El material mineralizado y apilado debe ser regado con una solución lixivante, para lo cual se tiende la malla de riego, que cubre toda el área.

El sistema de riego instalado permite distribuir las soluciones ya sea por medio de un sistema de goteros, que hasta pueden estar instalados bajo la superficie de las pilas cuando las condiciones son extremas (Quebrada Blanca a 4.400 msnm y temperaturas muy bajas) o por medio de aspersores tipo *wobblers* o *sprinklers*, dependiendo de la evaporación y de la disponibilidad de agua de cada operación.

Los sistemas de riego pueden ser de dos tipos:

- Cañerías de irrigación por goteo dispuestas en malla para obtener una tasa de goteo determinada, la que se expresa en  $\frac{l}{h/m^2}$
- Aspersores tipo *wobblers* en toda el área, y también para cubrir las áreas no irrigadas por el goteo.

El sistema de riego implementado en la pila tiene la función de permitir la circulación de tres tipos de soluciones: las soluciones de refinó, intermedias y/o el agua.

Una vez que la solución lixivante llega a la superficie de la pila y del mineral se produce una serie de etapas secuenciales. Fundamentalmente, existe un proceso de difusión (transporte) y un ataque químico sobre la superficie del mineral.

### EN LA SUPERFICIE DEL MINERAL TIENEN LUGAR LAS SIGUIENTES ETAPAS:

1. Difusión de los reactivos (agente lixivante, agente lixivante o reductor, iones H+ o OH- en la superficie del mineral).
2. Adsorción de los reactivos sobre la superficie del mineral.
3. Reacción química entre los minerales y los reactivos.
4. Desorción de los productos de la reacción de la superficie del mineral.
5. Difusión de los productos solubles en la solución.

La rentabilidad y eficiencia económica del proceso de lixiviación se da en función del grado de disolución o del porcentaje de extracción.

Sin embargo, el factor de más importancia es el tiempo necesario para lograr una extracción aceptable, es decir, la velocidad a la cual ocurre la disolución del mineral.

Al inicio del proceso, se produce una rápida extracción de mineral, posteriormente esta decrece al mínimo. Esta disminución puede deberse a varias causas como:

- Disminución de la superficie expuesta al ataque químico, lo que a su vez puede explicarse por el menor número de partículas a disolver o porque en ella se forman compuestos insolubles.

- Disminución de la concentración de reactivos.
- Aumento de la concentración de minerales en la disolución, lo que puede llegar a la saturación.
- Disminución del grado de lixiviación en partículas porosas al aumentar la distancia desde el punto de difusión inicial.

## RECOLECCIÓN DE SOLUCIONES

Al costado de cada pila se encuentran las canaletas de recolección de las soluciones. Estas canaletas están divididas en dos secciones para poder conducir por gravedad, separada e independientemente las soluciones ricas y pobres en mineral lixiviado.

Las soluciones recogidas son llevadas primero a piscinas desarenadoras, para ser clarificadas y desde allí fluyen a diferentes piletas según la calidad de la solución:

- **Piscina de solución rica (PLS)**, que tiene una dimensión tal que permite conocer el tiempo de retención de la solución.
- **Piscina de solución intermedia (ILS)**, que se utiliza para regar el aglomerado fresco y generar así PLS, según corresponda.

### MEMBRANAS IMPERMEABLES

En la base de las pilas se instalan membranas impermeables (geomembranas de origen sintético) fabricadas de un material variante del polietileno, que permite interceptar las soluciones que escurren desde lo alto de la pila y conducir las a las canaletas de recolección. Sobre las membranas se instalan cañerías perforadas de drenaje y una cubierta de grava drenante.

El control de la permeabilidad de la pila es fundamental para evitar las fugas. Además de las membranas o láminas de impermeabilización de polietileno, estas pueden ser fabricadas de los materiales arcillosos compactados que se encuentran en el propio terreno o a partir del suelo del patio el que se debe mejorar con aditivos químicos o minerales.

El diseño de la alternativa más conveniente de membrana o sistema de sellado es un desafío importante de la ingeniería y no debe hacerse solo por criterios económicos o de permeabilidad, sino por otros factores como durabilidad, picado, resistencia a la corrosión y otras condiciones ambientales que deben requerir experiencia y conocimiento previo.

Se pueden disponer de membranas o sellados simples, dobles o triples, de acuerdo con el número de capas impermeables o membranas de igual o diferente tipo que se hayan utilizado.

A continuación se entrega una tabla de factores de selección del tipo de láminas.

Tipo de láminas	Ventajas	Factores de selección
Geomembranas	P.V.C. Polietileno de alta densidad (HDPE) Polietileno clorosulfurado (Butilo) Monómero dietilen-propileno (EPDM) Membrana industrial Chevron (CIM) Resina sintética (Hypalon) Asfalto u hormigón asfáltico	Tipo material (espesor, resistencia, duración) Material de apoyo y cobertura Método de colocación y unión
Suelo natural o mejorado	Suelo natural del sitio Suelo natural de otro lugar Mezclas de suelo naturales Mezclas con bentonitas Mezclas con aditivos minerales	Disponibilidad de materiales Composición del suelo - Permeabilidad - Tamaño de granos - Plasticidad Factibilidad de trabajo - Estabilidad química Construcción - Espesor de la lámina - Preparación /mezclado - Compactación (reducir huecos, humedad óptima y espesor) Protección

## TIPOS DE SOLUCIONES

En el caso del cobre, los procesos hidrometalúrgicos de lixiviación producen, en general, dos tipos de soluciones:

- **Soluciones fuertes** con contenidos de cobre en soluciones entre los rangos de 30 – 50 g/L que son aptas para entrar directamente al proceso posterior de electroobtención.
- **Soluciones débiles** cuyo contenido de cobre en solución es menor a 10 g/L. Estas soluciones deben pasar por una etapa de concentración vía Extracción por Solventes-Electroobtención o simplemente ser tratadas por cementación.



## LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE COBRE

Los minerales de cobre en sus diferentes menas, se encuentran en la naturaleza asociados entre sí y con otras especies mineralógicas, más o menos diseminadas dentro de una roca matriz con la ganga correspondiente. Para el desarrollo de un proyecto de lixiviación es necesario un conocimiento de las características del yacimiento y de la mena, y los factores que influyen en la lixiviación.

En particular respecto a las características del yacimiento es importante considerar:

- Su composición mineralógica, por las interferencias que puedan producir en la lixiviación las diferentes especies conteniendo o no, cobre.
- Diseminación de las especies: frecuencia y tamaños de los granos.
- Carácter de la ganga, ya que ciertos minerales pueden estar dentro de una ganga carbonatada y consumir ácido haciendo el proyecto inviable económicamente.
- Características físicas de la mena (cantidad de finos o lamas), así como sus propiedades de porosidad y permeabilidad, que son fundamentales en una lixiviación estática.
- Comportamiento de la roca en el chancado, en cuanto a crear o aumentar la fracturación, exponiendo una mayor superficie al ataque químico.

## SELECCIÓN DE AGENTES LIXIVIANTES

Teniendo en cuenta las características del mineral, así como las reservas y el valor potencial del yacimiento, se selecciona el o los agentes lixiviantes más idóneos. Para ello se realizan diferentes caracterizaciones mineralógicas previas que permiten determinar los valores iniciales para realizar posteriormente las pruebas de laboratorio de lixiviación en columnas unitarias.

El ideal sería elegir un solo agente químico, que sea económico y recuperable, y un ciclo de lixiviación lo más corto posible (ojalá uno solo), para extraer un máximo de cobre y un mínimo de impurezas, lo cual es difícil en la mayoría de los casos.

En la elección del proceso es fundamental conocer la cinética de la reacción química que influye, mediante las diversas fases de investigación en laboratorio. Para ello se hacen análisis preliminares en botellas rotatorias y en columnas o vasijas, según si el mineral es apto a la lixiviación estática o dinámica.

Por último, al seleccionar previamente el agente lixiviante se debe considerar el proceso posterior de recuperación del cobre a partir de la solución madre. Así, por ejemplo, si el lixiviante es el sulfato férrico, deben tenerse en cuenta los efectos perjudiciales del aumento de iones férricos en la solución, para un posterior proceso de cementación (alto consumo de chatarra) o electrodeposición (mala eficiencia de corriente en electrólisis) o extracción por disolventes (purificación de hierro).

En la lixiviación de minerales de cobre, los reactivos normales suelen ser ácido sulfúrico para minerales oxidados y sulfato férrico acidificado en medio oxidante, para minerales sulfurados.

Se distinguen dos casos:

### LIXIVIANTE NATURAL

Producido por las aguas de lluvia que percolan en el yacimiento, atacando las superficies expuestas y produciendo un lixivante con contenidos variables de ácido, hierro e incluso cobre, según la estación del año y zonas de producción. Son las aguas de desagüe de minas.

Puede ocurrir que, mezclando aguas de distintas procedencias con sulfato férrico suficiente, se controla tan solo el pH bajo (añadiendo ácido sulfúrico), para regular la acidez e impedir la precipitación del hierro trivalente a hidróxido, que origina bastantes dificultades en la lixiviación. En caso de escasez de agua, se recircula parte de la solución estéril o se aportan aguas más frescas de otras procedencias.

### LIXIVIANTE PREPARADO

Se emplea el hierro trivalente en forma de sal ácida (sulfato férrico), cuya concentración en  $Fe^{3+}$  y ácido se ajusta según la investigación y experiencia práctica. Normalmente, las soluciones empleadas no suelen ser muy concentradas. El ácido varía entre 4% y 10 % y el hierro, alrededor del 1%. En algunos casos hay una regeneración del lixivante en el propio proceso.

Las soluciones estériles se recirculan o rechazan, con o sin depuración. La recirculación conlleva un aumento de compuestos tales como hierro, sulfatos, arsénico, cloro, ácidos, etc. Este aumento, sobre todo en sustancias nocivas como el As, Cl, ácidos, etc., puede ser perjudicial al proceso en sí o en estados posteriores, por lo que debe efectuarse una depuración o sangrías, periódicamente.

Entre los agentes lixiviantes en la minería del cobre se cuentan agentes lixiviantes ácidos y básicos. El agente lixivante más usado para minerales oxidados es el ácido sulfúrico, por lo que las soluciones que entran a electroobtención son de  $CuSO_4 H_2SO_4$  más impurezas, de modo que fundamentalmente se tienen iones de  $Cu^{+2}$ ,  $H^+$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $SO_3^{+2}$ .

La elección del agente químico de lixiviación va a depender de su costo, disponibilidad, estabilidad química, selectividad y grado de generación de soluciones ricas en mineral, de tal forma que sea lo más económico y fácil de trabajar.

## AGENTES DE LIXIVIACIÓN MÁS UTILIZADOS

Tipo de agente	Ejemplos
Ácidos inorgánicos	Ácido sulfúrico Ácido clorhídrico Ácido nítrico
Bases	Hidróxido de amonio
Agentes complejantes	Amoníaco Sales de amonio Cianuros Carbonatos Cloruros

En general, los minerales de cobre requieren una oxidación previa para la posterior disolución del metal. En el caso de los carbonatos y óxidos de cobre solo se requerirá un disolvente que es normalmente ácido sulfúrico, y en el caso de los sulfuros, un oxidante, cuya fuerza de oxidación dependerá del tipo de sulfuro.

Al considerar el agente lixivante, que suele constituir un costo importante del proceso, hay que tener en cuenta su disponibilidad (transporte), precio en planta, consumo y posibilidad de recuperación. Igualmente las características corrosivas, por su influencia en los materiales de la planta industrial. Sin embargo, el aspecto más importante es que el agente lixivante tiene que ser efectivo y lo más selectivo posible, para la disolución del cobre del mineral a tratar. Las diferencias de las características de las menas son tan amplias, incluso dentro de una misma zona, que los principios químicos establecidos solo pueden servir de guía para la selección del lixivante.

**Al momento de elegir el agente lixivante es importante tener en cuenta la composición mineralógica del material, tipo de ganga, tamaños de granos y diseminación, contenido de azufre, presencia de carbonato, cloruros u otros constituyentes. Por lo que es necesaria la investigación y la experiencia operativa, para seleccionar el lixivante y obtener los datos necesarios para predecir el comportamiento de la lixiviación.**

## APLICACIÓN DE LA SOLUCIÓN LIXIVIANTE

La lixiviación propiamente tal se inicia con el riego por aspersión o goteo. Los distintos sistemas de irrigación, de aplicación de la solución, velocidades y efectos de la operación de lixiviación en vertederos, se pueden aplicar al sistema de lixiviación en pilas, donde existe un mayor control de la operación, con lo que se obtienen mejores resultados.

Para el logro de un resultado exitoso, es fundamental cuidar la distribución de la solución lixivante a la mayor área que sea posible, mediante un sistema de aspersión, y con la velocidad de aplicación conveniente según la adaptación (permeabilidad) de la pila.

Si la solución lixivante se entrega de manera de aumentar la cantidad de líquido disponible en torno ellas, se trata de un sistema de riego no inundado o trickle-leaching, en el que al excederse los límites de líquido correspondiente al estado capilar, se produce una suspensión sólido/líquido. En ese momento ya no hay fuerzas para mantener las partículas en su sitio, los finos se desplazan, ocupando espacios entre las partículas mayores y, si hay arcillas, ambos factores cumplen un rol sellante, lo que conduce a un lecho inundado. Debe evitarse esta situación, ya que para una buena operación es esencial mantener una adecuada permeabilidad.

## EXTRACCIÓN POR SOLVENTES (SX)

La extracción por solventes (SX), es uno de los procesos más efectivos y económicos para purificar, concentrar y separar los metales valiosos que se encuentran en las soluciones enriquecidas, provenientes de procesos de lixiviación. Este proceso encuentra su principal aplicación en la producción de cobre, específicamente en la separación selectiva de metales, que luego se recuperan mediante el proceso de electroobtención, a través de soluciones de sulfato de cobre. También se utiliza para la recuperación de uranio, vanadio, molibdeno, zirconio, tungsteno, renio, elementos de tierras raras, metales preciosos, cadmio, germanio, berilio y boro, entre otros.

Básicamente, la extracción por solventes es una operación de transferencia de masas en un sistema de dos fases líquidas. Se llama también **intercambio iónico líquido** y se fundamenta en el principio por el cual un **soluto o ion metálico** puede distribuirse en cierta proporción entre dos solventes **inmiscibles**, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico como benceno, kerosene, cloroformo o cualquier solvente inmiscible al agua.

Lo anterior es posible debido a que ciertos reactivos químicos orgánicos, tienen un alto grado de afinidad selectiva con determinados iones metálicos, formando compuestos organometálicos y a su vez, no tienen casi ninguna afinidad con iones contaminantes tales como iones de hierro, calcio, magnesio, aluminio, etc. Por esta razón, la principal aplicación de la extracción por solventes es la separación selectiva de metales. La posterior obtención de dichos metales se realiza mediante un proceso de electro obtención aplicada a soluciones de sulfato de cobre.

### OBJETIVOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

El proceso de extracción por solventes (SX), se incorpora como parte de un sistema integral de recuperación de hidrometalurgia. En la mayoría de los casos, al integrar el proceso de SX en un círculo metalúrgico se busca cumplir los siguientes objetivos:

- **La separación y purificación de uno o más metales de interés de las soluciones que los contienen**, las que suelen tener impurezas. La separación consiste en extraer el o los metales deseados desde soluciones o a la inversa, extraer las impurezas de la solución, dejando el o los metales deseados en ella.
- **Concentración de los metales disueltos para disminuir los volúmenes a procesar y así reducir los costos del proceso siguiente** (EW para el caso del cobre).
- **Transferencia de los metales disueltos desde una solución acuosa compleja a otra solución acuosa diferente**, que simplifique el proceso siguiente.

La incorporación de la extracción por solventes dentro de la metalurgia es de gran interés para el desarrollo de las siguientes operaciones específicas:

- La recuperación selectiva de un solo metal desde una solución de lixiviación, liberándolo de sus impurezas y concentrándolo de manera que facilite su posterior recuperación. Por ejemplo, en la lixiviación del cobre, la extracción por solventes se realiza en las soluciones de lixivitaciones diluidas e impuras, con el fin de traspasar el cobre a una solución de electrolito puro y concentrado, que permita realizar la electroobtención.

- La separación conjunta de varios metales desde una solución, ya que ciertos elementos químicos como el Cu/Ni/Co, o del V/U/Ti, presentan una similitud de propiedades químicas. Mediante la extracción por solventes se separan conjuntamente para su posterior separación diferencial.
- La purificación de soluciones: la extracción por solventes permite extraer las impurezas dañinas o contaminantes de una solución para dejarla limpia como solución de partida. Por ejemplo, este método se aplica en la purificación de los descartes de electrolitos de refinería de cobre, al eliminar el Fe, As y otras impurezas, lo que limpia la solución y la devuelve al círculo principal.

Dado que en la lixiviación ocurre la disolución de otros componentes minerales que se encuentran en la pila, es indispensable realizar la purificación de las soluciones como una etapa previa a la electroobtención del metal.

## ETAPAS Y MECANISMOS DE LA EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

La extracción por solventes consiste en un proceso de purificación y concentración de soluciones basada en la separación del elemento de interés - como el cobre - desde las soluciones de lixiviación. Para ello se utiliza un medio extractante líquido de alta selectividad al elemento a separar, pero inmiscible en dicha solución.

En el proceso global de la extracción por solventes se distinguen tres momentos fundamentales, que consisten en:

- El líquido extractante se agrega a la solución primaria y se conecta con el ion metálico, que queda formando parte del extractante.
- Enseguida, este complejo extractante - ion metálico - es separado de la solución y llevado a una solución secundaria en el ion metálico.
- En esta solución secundaria se produce la re-extracción o descarga, es decir, el elemento de interés es nuevamente devuelto a una solución acuosa, pero exenta de impurezas, óptima para el proceso siguiente de electroobtención.

En general, en el proceso de extracción por solventes se reconocen dos etapas fundamentales: la etapa de "extracción" propiamente tal y la de "re-extracción o *stripping*", también llamada "descarga".

### PROCEDIMIENTO BÁSICO

Los sistemas de extracción por solventes tienen tres componentes básicos, que son un soluto a extraer, un solvente acuoso y un extractante orgánico. El proceso de extracción por solventes se basa en la reacción reversible de intercambio iónico que tiene lugar entre dos fases inmiscibles, la fase orgánica que corresponde al reactivo extractante disuelto en un diluyente orgánico, y la fase acuosa que corresponde a la solución.

Se pone en contacto la solución de lixiviación o fase acuosa con el reactivo orgánico o fase orgánica, y se mezcla fuertemente por agitación.

El reactivo orgánico contiene una molécula extractante, el que tiene una alta afinidad por el ion metálico que se quiere recuperar. Este ion de interés es transferido desde la fase acuosa o solución de lixiviación a la orgánica, a través de la interfase de los dos líquidos no inmiscibles. La mezcla resultante por la agitación se deja decantar para que se separe en dos capas o fases. La fase superior corresponde a la capa orgánica, que se mantiene allí debido a su menor peso específico. En esta fase orgánica, que se conoce como fase cargada o fase extracto, se encuentra retenido el ion metálico de interés formando un complejo orgánico-metálico.

La capa acuosa inferior, denominada fase acuosa o de refino, es una solución estéril respecto de iones metálicos y tiene un peso específico mayor al de la fase orgánica.

**Al mezclarse las fases acuosa y orgánica, el equilibrio se irá dando paulatinamente, debido a que la transferencia de masa dentro de un reactor depende de los siguientes factores:**

- Tiempo de residencia.
- Área de interfases acuosa/orgánica.
- Potencial químico en la interfase.

El equilibrio de la reacción es el factor más importante en el proceso de intercambio y esto depende del tamaño de los equipos utilizados, la energía consumida en la agitación y otros factores que afecten en la totalidad de los costos del proceso.

Las dos etapas en que se puede subdividir el proceso, extracción y reextracción, pueden ser consideradas una como la inversa de la otra.

### ETAPA DE EXTRACCIÓN O CARGA DEL REACTIVO

La solución impura proveniente de la lixiviación en fase acuosa, rica en iones de cobre y con una acidez baja (pH entre 1,4 y 1,9), se introduce en mezcladores especiales donde se contacta con la fase orgánica de muy bajo contenido de cobre, llamado "orgánico descargado".

Como ambas fases son inmiscibles, para realizar la extracción y mezcla, es necesario aplicar una acción mecánica de elementos externos que proporcionan la energía necesaria para este propósito. Al mezclarse ambas fases ocurre una transferencia de la especie metálica disuelta en la fase acuosa, la que se desplaza químicamente con el reactivo extractante en la fase orgánica hasta alcanzar el respectivo equilibrio químico. Así, se genera una fase orgánica cargada con la especie metálica de interés y una solución acuosa descargada o refino.

**ETAPA DE  
REEXTRACCIÓN  
O DESCARGA  
DEL REACTIVO**

La etapa de reextracción del reactivo consiste en la recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las capacidades extractivas de la fase orgánica, lo que permite ser reutilizada en otra extracción.

En síntesis, de la etapa de reextracción se obtiene una solución de orgánico descargado sin cobre, que es recirculado a la etapa de extracción, y una solución rica en iones de cobre de baja acidez, la que es enviada a la siguiente etapa, la electroobtención.

**EJEMPLOS  
TÍPICOS DE SX**

En la hidrometalurgia del cobre, las configuraciones más usadas en la extracción por solventes son etapas en serie de extracción, lavado y descarga, como por ejemplo: dos de extracción, una de lavado y dos de descarga; dos de extracción, una de lavado y una de descarga.

En algunos casos se agrega una o más etapas de extracción en paralelo y, en otras, la etapa de lavado no se utiliza.

**REACTIVOS  
EXTRACTANTES  
USADOS  
EN SX PARA  
RECUPERACIÓN  
DE COBRE**

El principal constituyente del solvente o fase orgánica es el reactivo orgánico o extractante, aquel que tiene la capacidad de formar complejos orgánicos con el elemento que se desea extraer. En un principio, estos agentes extractantes estaban limitados para funcionar de acuerdo con un rango de pH y concentración de cobre en las soluciones que se trataban, pero en la actualidad se utilizan en un rango más amplio de soluciones provenientes de lixiviación.

Existe una amplia gama de propiedades que son usadas como patrón para seleccionar un extractante en particular. En necesario considerar que es poco probable que exista un reactivo que reúna todas las propiedades que se desean, ya que a menudo éstas se encuentran en contrastes unas de otras.

**REACTIVOS  
EXTRACTANTES  
USADOS  
COMERCIALMENTE**

En la siguiente tabla se presenta un listado en que se muestra el nombre y la respectiva descripción química de algunos reactivos extractantes, usados en diversas aplicaciones industriales para recuperación de metales por SX.

### Nombre comercial y descripción química de algunos extractantes de SX usados en la industria para recuperación de metales.

Alamine	Tricaprilamina
Cyanex 272	Ácido di-2,4,4 — trimetil — Pentil fosfínico
Cianex 301	Ácido bis/2,4,4 — trimetil — gentil fosfino ditioico
Cianex 302	Ácido bis (2,4,4 — Trimetil — pentil) Monotiososfinico
DBBP	di — butil — butil fosfato
D2EHPA	Ácido di — 2 — etil — hexil fosfórico
EHEHPA	Ácido di — 2 — etil — hexil fosfónico — mono-2 etil- hexil — éster
HDDNS	Ácido di — dodecil naftalensulfónico
Hostarex Dk - 16	C16H22O2
Kelex 100	7 — (5,5,7,7 tetrametil — 1 octan — 3 — il)-8 hidroxiquinolina
Lix 54	Fenil — alquil β — diketona
Lix 70	Oxima de 2 — hidroxil — 3 cloro — 5 — nonil benzofenona
MIBK	Metil — iso — butil — quejona
NPPA	Ácido nonil fenil fosfórico
SME 529	Oxima de 2 — hidroxil — 5 — nonil acetofenona
TBP	Tri — butil fosfato
TNOA	Tri — n — Octilamina
Topo	Óxido de tri — n — Octilfosfina

En general, existe una amplia gama de propiedades que son usadas como patrón para la selección de un extractante en particular. Es necesario considerar que es poco probable que exista un reactivo que reúna todas las propiedades que se desean, ya que a menudo éstas se encuentran en contrastes unas de otras.

## PROPIEDADES DE LOS AGENTES EXTRACTANTES

Las principales características que deben poseer los reactantes que se utilizan con agentes extractantes son:

### SELECTIVIDAD

Es la habilidad del extractante para extraer una sustancia de interés desde una solución acuosa. Un extractante de una alta selectividad o factor de separación, es capaz de reaccionar tan solo con aquellos iones metálicos de interés, dejando de reaccionar con todos los demás. Por ejemplo, si se desea separar una sustancia A de una B, la selectividad (A) por A se mide por la razón de los coeficientes de extracción de A y B. Cuando mayor sea A, mayor es la separación de Ay B.

### COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN

Corresponde a la razón entre la concentración de cobre presente en el orgánico y la concentración del acuoso. Este coeficiente debe ser lo más alto posible para extraer un máximo y minimizar la cantidad de solvente.

**CAPACIDAD DE CARGA**

Corresponde a la máxima concentración del ión metálico de interés presente en la fase orgánica, a un pH y a una concentración de extractantes dada. Se requiere una gran capacidad de carga.

**INSOLUBILIDAD**

Es de gran importancia, ya que si existe un alto grado de mutua insolubilidad entre el extractante y la fase acuosa, sería más fácil la recuperación del extractante y disminuirían las pérdidas de orgánico en el refinado y electrolito.

**RECUPERABILIDAD**

Siempre es necesario recuperar la mayor cantidad posible de extractantes para un posterior uso, favoreciendo así una reducción en los costos.

**DENSIDAD**

Se requiere que exista una diferencia de densidad entre las fases líquidas en contacto. Cuanto mayor sea esta diferencia, mejor es la separación de las fases.

**VISCOSIDAD**

Esta característica debiera ser lo más baja posible, ya que esto favorece la transferencia de masas, la separación de fases y por consiguiente, la extracción.

**TENSIÓN SUPERFICIAL**

Cuanto mayor sea la tensión superficial, más rápido ocurrirá la coalescencia de las emulsiones, aumentando la separación de las fases.

**SEGURIDAD**

Que no sea tóxico ni inflamable.

**ESTABILIDAD QUÍMICA**

Debe ser estable y químicamente inerte frente a los demás componentes del sistema.

## SELECCIÓN DE LOS AGENTES EXTRACTANTES

La solución proveniente de la etapa de lixiviación, muchas veces se caracteriza por su baja concentración de cobre y bajo pH.

El extractante a usar debería cumplir con la condición de ser selectivo por el cobre y de ser capaz de actuar en las condiciones que impone la solución a tratar. Además, debería poseer otras características principalmente de carácter económico.

Para que un reactivo pueda ser económicamente aceptable en hidrometalurgia, debe lograr combinar la mayoría de las características ideales para un reactivo orgánico, las cuales se expresan a continuación:

- Extraer el o los metales deseados con la máxima selectividad posible desde la solución que los contiene.
- Ser descargable hacia una solución desde donde pueda ocurrir, en forma sencilla, la recuperación del metal.

- Ser de fácil regeneración en sus características físico-químicas, para una expedita recirculación a la etapa de extracción.
- Ser lo más inmiscible posible en las soluciones acuosas que contiene el o los metales de interés.
- Ser estable a las condiciones del circuito de manera que pueda ser reciclado muchas veces. Para ello debe ser químicamente estable frente al ataque de ambientes ácidos o alcalinos.
- Ser no inflamable, no tóxico, no volátil, no cancerígeno, no contaminante.
- Ser soluble en diluyentes orgánicos económicos, o ser capaz de funcionar él mismo, además, como diluyente.
- Cumplir con una capacidad de carga aceptable para lograr una transferencia neta eficaz del metal extraído.
- Cargar y descargar el metal con facilidad, lo bastante rápido como para que los tiempos de mezclado resulten en equipo razonablemente económicos.
- Ser de fácil separación de la fase acuosa, es decir, que su inmiscibilidad sea efectiva y que la separación se logre eficientemente en tiempos razonablemente breves.
- No debe promover emulsiones estables.
- No debe transferir especies nocivas desde la descarga a la extracción y viceversa.
- Debe tener un costo económicamente aceptable.

## CLASIFICACIÓN DE AGENTES EXTRACTANTES

Existen variados tipos de extractantes orgánicos selectivos, que se emplean para la recuperación de metales, los que se caracterizan según el mecanismo de extracción, la estructura y la especie metálica extraída.

De acuerdo al tipo de reacción de extracción que realicen, los agentes extractantes se clasifican en tipo quelantes, ácido orgánico, sustitución del ligante, extracción neutra o solvatante y con formación de par iónico.

### EXTRACTANTES TIPO QUELANTES

Los modernos reactivos extractantes de cobre son predominantemente hidroxioximas, las que funcionan como agentes quelantes de los cationes de cobre de la solución, formando un compuesto de cobre orgánico soluble en parafina. Tienen una amplia utilización en la extracción de cobre desde soluciones de lixiviación con ácido sulfúrico.

Este tipo de extractantes realiza una quelación, es decir forman estructura de anillos que envuelven a la molécula de extractante como una ligazón selectiva para el ión metálico, dejando los restantes cationes en solución. Por tanto, los extractantes tipo quelantes son capaces de formar un compuesto orgánico con el metal de interés.

Corresponden a esta clase los siguientes reactivos: LIX, ZENECA, ACORGA M5640, SME de Shell Chemicals y MOC, en el último tiempo.

De la reacción de extracción-reextracción con este tipo de extractantes, puede deducirse que se produce un intercambio de iones en los que la molécula extractora orgánica entrega dos protones a cambio de un catión de cobre. Así, la reacción de extracción genera ácido, por lo que el refino queda lo suficientemente ácido para ser devuelto a la etapa de lixiviación.

Los modernos reactivos extractantes de cobre son predominantemente hidroxioximas, las que funcionan como agentes quelantes de los cationes de cobre de la solución, formando un compuesto de cobre orgánico soluble en parafina. Tienen una amplia utilización en la extracción de cobre desde soluciones de lixiviación con ácido sulfúrico.

Este tipo de extractantes realiza una quelación, es decir forman estructura de anillos que envuelven a la molécula de extractante como una ligazón selectiva para el ión metálico, dejando los restantes cationes en solución. Por tanto, los extractantes tipo quelantes son capaces de formar un compuesto orgánico con el metal de interés.

Corresponden a esta clase los siguientes reactivos: LIX, ZENECA, ACORGA M5640, SME de Shell Chemicals y MOC, en el último tiempo.

De la reacción de extracción-reextracción con este tipo de extractantes, puede deducirse que se produce un intercambio de iones en los que la molécula extractora orgánica entrega dos protones a cambio de un catión de cobre. Así, la reacción de extracción genera ácido, por lo que el refino queda lo suficientemente ácido para ser devuelto a la etapa de lixiviación.

#### Lista de los reactivos actualmente en uso industrial

Reactivo	Producto comercial	Extractante	Modificador
Acorga	P5100 PT5050 M5640	Aldoxima	Nonil Fenol Tridecanol Ester
Lix	Lix84 984 622 860	Ketoxima Mezcla Aldoxima Aldoxima	No No Tridecanol No
Moc	45 55	Ketoxima Aldoxima	No No

#### Las principales características de los reactivos extractantes tipo quelante, y que los distinguen de otras clases de extractantes, pueden resumirse en que:

- Operan sobre la base del intercambio de un ión hidrógeno cíclico.
- Operan bien tanto con soluciones ácidas como con soluciones amoniacaes.
- Por su mayor complejidad desde el punto de vista químico, son más selectivos que los extractantes de tipo iones pareados o que los de tipo ácido orgánico.
- Debido a la estructura más compleja del compuesto formado, son de una cinética más lenta que la de los extractantes de tipo iones pareados y que la de los de tipo ácido orgánico.
- Tienen buenas características operacionales respecto a la separación de fases.
- En su fabricación suelen ser más difíciles de preparar.

**REACTIVOS DEL TIPO ÁCIDO ORGÁNICO**

La química de estos extractantes tiene algunas características que los asemejan a los quelantes y algunas que los asemejan a los extractantes por solvatación. La reacción de intercambio del catión depende fuertemente del pH inicial y, además, éste irá variando durante el proceso de intercambio por la liberación de dos protones en la reacción, similar a lo que ocurre con los quelantes, por lo que se les aplica también los conceptos de pH50.

Los reactivos que pertenecen a esta categoría son los ácidos órgano-fosfóricos, los ácidos fosfónicos y fosfínicos, sus respectivos derivados mono- y di-tio-, los ácidos organosulfónicos y los ácidos carboxílicos. Conviene tener presente que la química de la extracción usando los tio-derivados puede ser muy complicada por la superposición de reacciones de óxido reducción.

Los ácidos orgánicos también pueden funcionar en combinación y sinergia con otros extractantes quelantes y/o neutros, para alterar tanto las cinéticas de extracción como los rangos de pH, en el cual el metal puede ser extraído.

**Las características generales de los extractantes tipo ácido orgánico son:**

- Muestran menos selectividad que los extractantes quelantes.
- Pueden promover emulsiones estables con soluciones alcalinas.
- Operan sobre la base de un ión hidrógeno cíclico, similar a los reactivos quelantes.
- Poseen cinéticas de extracción normalmente muy rápidas.
- En general como clase, no son muy difíciles de producir y, por lo tanto, están disponibles en cantidades comerciales a un costo razonable.

**REACTIVOS DEL TIPO SUSTITUCIÓN LIGANTE**

Estos reactivos tienen uno o más pares de electrones que pueden formar un enlace simple con el ión metálico, desplazando a otras especies ("ligante") que pueden estar enlazadas formando un complejo con el metal.

**Este tipo de reactivos participa en reacciones que presentan las siguientes características:**

- La extracción del metal normalmente no es sensible al pH, ya que el intercambio es sólo de electrones.
- En ocasiones se pueden lograr en forma notable, altas selectividades.
- Las cinéticas de las reacciones pueden ser rápidas o lentas, dependiendo del metal y del tipo de ligante que se deba desplazar.
- Estos reactivos pueden ser relativamente económicos, o muy caros, dependiendo de la complejidad de la molécula orgánica que se use.

### REACTIVOS DEL TIPO EXTRACCIÓN NEUTRA O SOLVATANTE

Este tipo de reactivo orgánico extractante se coordina con ciertos complejos metálicos reemplazando sus áreas de hidratación. El complejo organometálico resultante, al haber perdido sus sales de hidratación, se vuelve insoluble en agua y así puede pasar fácilmente a la fase orgánica.

Los reactivos solvatantes se clasifican de acuerdo a su grado de habilidad para donar electrones a un metal y pasar a formar un complejo organometálico. Los reactivos más útiles de esta clase son los organofosforosos, aunque también se han reportado extensos trabajos con las cetonas y los éteres.

#### En general, la extracción con reactivos del tipo solvatante está limitada por:

- La habilidad de las especies metálicas para formar complejos neutros con aniones.
- La co-extracción de ácido a altas concentraciones de ácido.
- La solubilidad del complejo organometálico en el portador orgánico.

#### Las principales características de los reactivos de tipo extracción neutra, o solvatante, son las siguientes:

- Normalmente muestran cinéticas de reacción bastante rápidas.
- Extraen complejos metálicos de carácter neutro.
- En general, no son selectivos.
- En combinación con otros reactivos orgánicos, los reactivos de tipo solvatante modificadores de fase.
- Debido al enlace débil que caracteriza este mecanismo de extracción, en la generalidad de los casos, la descarga del reactivo se ejecuta con facilidad mediante el uso de agua.

### REACTIVOS ORGÁNICOS EXTRACTANTES CON FORMACIÓN DE PAR IÓNICO

Estos reactivos actúan basados en el principio de asociación iónica, en la cual una gran molécula orgánica, de carga positiva, provoca la extracción de un complejo metálico aniónico hacia la fase orgánica, con la correspondiente expulsión de un anión inorgánico pequeño hacia la fase acuosa.

Ejemplos de este tipo de reactivo son los extractantes en base a aminas. Entre éstas se puede destacar, por un lado el comportamiento de las aminas primarias, secundarias y terciarias y, por el otro, el de las aminas cuaternarias.

Dado que las aminas pueden formar sales con una amplia variedad de ácidos, las posibilidades para la elección de reactivos para el intercambio iónico líquido es muy extensa, por ejemplo, para una misma amina existe la sal de cloruro, la sal de bisulfato, etc.

Los reactivos para extracción del tipo amina pueden descargarse mediante una amplia variedad de soluciones formadas con sales inorgánicas. El tipo de agente de descarga que se use depende del proceso de recuperación global del metal que se estará diseñando, pero en general, son los agentes alcalinos de descarga los que revierten en una mejor forma la reacción de protonación de la amina, entregando la mejor descarga en el menor número de etapas.

Existen dos variables del sistema metálico acuoso, diferentes del pH, que afectan la extracción del metal mediante un reactivo de extracción del tipo amina. Estas son, por un lado, el estado de oxidación del metal y, por otro, la concentración de los aniones comunes.

Algunas de las características propias de los reactivos de atracción tipo aminas, que los distinguen de los otros tipos de extractantes, son:

**Generalmente, requieren del uso de modificadores de fase, normalmente alcoholes de cadena larga y/o el uso de diluyentes aromáticos, con el objeto de prevenir la formación y precipitación de complejos orgánicos del tipo amino metálicos insolubles.**

- Las cinéticas de extracción y de descarga son usualmente muy rápidas.
- Las aminas cuaternarias y terciarias son más selectivas que las secundarias o primarias, pero son menos selectivas que los quelatos.
- Hay una amplia variedad de aminas que están disponibles y/o que se pueden sintetizar con facilidad.
- Las aminas extraen complejos metálicos anióticos.
- La extracción con aminas generalmente ocurre a partir de soluciones ácidas, hasta casi neutras, con el mejor rango de pH disponible, dependiendo del sistema específico.

## PÉRDIDAS DE EXTRACTANTE

Las pérdidas de extractantes tienen gran importancia en la viabilidad económica de una planta. Éstas ocurren principalmente por evaporación o por solubilidad, o por entrapamiento durante el procesamiento en las plantas.

Así como la solubilidad es sensible al pH, las pérdidas también son dependientes de la acidez, y más aún teniendo fases acuosas alcalinas.



## Valores de las pérdidas de algunos reactivos

Metal extraído	Extractante	pH de extracción	Pérdidas (ppm)
Cu	Kelex 100	1 - 2	10
Cu	Lix 64 N	1,5 - 2	4 - 15
Co	D2 EHPA	7,7	100
Co	D2 EHPA	5,5 - 6,5	30
Ni	Ácido Nafténico	4,0	90
Ni	Ácido Nafténico	6,5	900
Ni	V 911	7,0	900 - 300
HF	MIBK	1,5 M NCI	20.000
Tierras raras	D2 EHPA	2,0	7
U	Amina Ternaria	1,5 - 2,0	4 - 15
U	TDP	2,0	25 - 40

## DILUYENTES Y MODIFICADORES

Los diluyentes y modificadores corresponden a otros componentes de la fase orgánica que tienen funciones específicas en la optimización del proceso de extracción.

### Diluyentes

En un circuito de extracción por solvente (SX) la fase orgánica normalmente está conformada por uno, dos o tres componentes: el extractante, el diluyente y algún modificador.

Por lo general, el diluyente es el componente de la fase orgánica que está presente en mayor proporción dentro de ella.

En la mayoría de los casos, los reactivos requieren ser diluidos antes de poder usarlos, (existen algunas excepciones, particularmente con los solvatantes) donde el reactivo extractante también puede funcionar como diluyente.

Los diluyentes se utilizan principalmente para disminuir la viscosidad de la fase orgánica, permitiendo que fluya fácilmente. A su vez, ello facilita el contacto entre las dos fases y reduce la excesiva concentración del extractante orgánico activo.

**Al igual que en el caso de los agentes extractantes, el diluyente debe cumplir ciertos requisitos. Entre los más importantes se señalan los siguientes:**

- Ser capaz de disolver el extractante y de mantenerlo en solución.
- Tener baja viscosidad y densidad.
- Tener estabilidad química.
- Presentar baja solubilidad en la fase acuosa.
- Poseer un alto punto de inflamación, baja toxicidad y baja tasa de evaporación.

## CARACTERÍSTICAS

El diluyente se usa, por un lado, para reducir la viscosidad de la fase orgánica, y también, para adecuar la concentración del extractante con el contenido de metal de la solución de lixiviación.

Las propiedades más importantes de un diluyente son:

- Solubilizar al extractante y al complejo organometálico formado por la reacción del metal con el extractante.
- Ser capaz de disolver el reactivo de extracción, tanto libre como en forma de complejo metálico.
- Tener baja viscosidad y una densidad adecuada para favorecer la separación de fases y reducir los arrastres de una fase a otra.
- Tener baja solubilidad en la fase acuosa, para evitar o disminuir al máximo las pérdidas por disolución en la fase acuosa, o ser insoluble en la fase acuosa.
- Tener una pureza adecuada y estar libre de componentes extraños, con el objeto de minimizar la formación de borras.
- Mezclarse bien en el tonel reactivo de extracción, para disminuir su viscosidad y facilitar el contacto entre fases, permitiendo una buena separación en el decantador.
- Ser químicamente estable bajo todas las condiciones de operación del circuito.
- Tener un alto punto de inflamación de 25 °C o más, por encima de la temperatura más alta prevista para la operación del circuito SX.
- Tener bajas pérdidas por evaporación y baja tensión de vapor.
- Baja toxicidad.
- No interferir perjudicialmente en la química de las reacciones de extracción y descarga del metal.
- Tener un costo reducido para favorecer la economía del proceso.
- Estar disponible con facilidad, en grandes cantidades y a bajo costo.

## ELECCIÓN DEL DILUYENTE

Dado que el diluyente es un componente importante y mayoritario de la fase orgánica, todo operador de planta SX debe realizar las máximas pruebas de control de calidad a cualquier nuevo embarque de diluyente que llegue a su circuito SX. Las pruebas de control de calidad deben reflejar adecuadamente todas las propiedades críticas, o que sean consideradas más importantes, para el éxito de la operación.

El mejor diluyente para un determinado sistema de SX puede no ser el más recomendable para otro sistema de SX diferente. Cada operador de planta debe preocuparse de solicitar la asesoría de especialistas para estudiar varios diluyentes antes de determinar el más adecuado para sus propias condiciones de operación y localización de la planta.

Normalmente, el diluyente se puede comportar como un compuesto químicamente inerte, pero existen ocasiones, como en algunos casos de su uso en el proceso de SX para cobre y uranio, en que el diluyente también influye en el comportamiento del reactivo y puede ser un participante esencial en el éxito o eventuales dificultades operacionales del proceso.

En las ocasiones en que el diluyente interactúa con el reactivo en la fase orgánica, puede favorecer la polimerización del reactivo y restar así parte de los componentes activos dentro de la fase orgánica. Otros diluyentes producen el efecto contrario, lo que en los casos de extracción por intercambio catiónico, se puede detectar midiendo la constante dieléctrica del diluyente, siendo el menor valor resultante el que da las mejores extracciones.

### Los diluyentes para SX más usados a escala industrial son (o han sido):

- Benceno (no se usa actualmente por ser cancerígeno).
- Hexano.
- Keroseno.
- Cloroformo.
- Tetracloruro de carbono.

En el caso del proceso SX para cobre y uranio, los diluyentes más habituales para son los kerosenos obtenidos mediante destilación. Las exigencias para su elección son las siguientes:

Propiedad	Rango exigido
punto inicial de evaporación	entre 200 y 220 °C
rango de destilación	240 y 260 °C
punto de inflamación	mayor que 75 °C
contenido de compuestos aromáticos	entre 0,5 y 25%

En el mercado hay disponibles diluyentes de estas características, procedentes de distintas refinerías. Los principales proveedores de kerosene, para uso en SX, han sido tradicionalmente EXXON, con sus diversos productos de la línea Esquiad 100, 110, 103; Phillips Petroleum, con sus productos de la línea Orfom SX; MacGee, Kermac 470 y 470B; Shell, con su línea Sheesol; ENAP,

Hay ocasiones en que se seleccionan diluyentes que tienen un contenido de aromático de 95% o mayor. Los diluyentes aromáticos tienden a ser más caros, por lo que su empleo está reservado para situaciones en donde alguna de sus propiedades es muy necesaria, y tan especial que pueda ser más importante que el costo.

## REACTIVOS MODIFICADORES

Corresponden a cualquier producto orgánico que al ser añadido y disuelto en la fase orgánica altera el comportamiento de un determinado reactivo de SX. Los modificadores tienen como función optimizar la separación de las fases, mejorar la coalescencia, aumentar la solubilidad de complejo metálico y evitar la formación de una tercera fase.

### Los modificadores son capaces de:

- Actuar sobre la separación de fases, para facilitar la coalescencia y disminuir los arrastres.
- Participar en el control de la generación de crudo y/o terceras fases, lo que favorece la solubilidad del complejo orgánico-metálico en la fase orgánica cargada.
- Estabilizar la molécula del reactivo, lo que permite su utilización indefinida al reducir su degradación. Por ejemplo, en el proceso SX del cobre se añaden como modificadores al reactivo principal, que es una oxima, alcoholes de cadena larga, fenoles y ésteres.

## SOLUCIÓN ACUOSA

La solución acuosa normalmente es rica en lixiviación y corresponde a la fase portadora del metal o de los metales que interesa procesar por extracción; se denomina PLS (pregnant liquor solution). Luego de ser procesada por extracción SX, cambia de denominación a solución pobre o refinado, RF de refinante y suele ser enviada de regreso a la lixiviación.

Existen cuatro características o propiedades del PLS, las que pueden ser controladas o modificadas de manera de lograr una más eficiente separación o purificación del metal mediante SX:

- Acidez libre.
- Potencial de óxido-reducción expresado por el nivel de Eh.
- Concentración de aniones que forman complejos como cloruro, sulfato y cianuro.
- Temperatura, la que influye directamente en el equilibrio de la extracción, las cinéticas de transferencia del metal, la solubilidad de las especies extraídas, la separación de fases y en las pérdidas por atropamiento y arrastre.

## EQUIPAMIENTO BÁSICO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

A partir de la solución de lixiviación que se han desarrollado a escala industrial, los procesos de extracción de cobre por solventes ponen en contacto la solución lixiviada con el disolvente sin carga, lo que se realiza en varias etapas (al menos dos), en que mezcladores y sedimentadores funcionan en contracorriente, dispuestos y arreglados de manera de asegurar que el disolvente orgánico entrante — sin carga— tenga un contacto final con la solución acuosa cargada, la que al salir quedará con muy baja concentración de cobre, el refino, el que retornará a la operación de lixiviación para uso posterior.

La transferencia de la fase orgánica recientemente cargada a la fase acuosa, se realiza contactando el orgánico con el electrolito agotado, o "electrolito pobre" fuertemente ácido, lo que se desarrolla en una serie de etapas (una, dos o hasta tres) en contracorriente, en mezcladores y sedimentadores. Después de la etapa final de agotamiento, la fase orgánica estéril vuelve a la sección de extracción. Después de mezclar el electrolito enriquecido con electrolito pobre, para obtener la concentración justa de cobre, es bombeado al circuito de separación por electrólisis, la electroobtención.

## El equipamiento básico de una planta de SX consiste en:

- Un "mezclador" relativamente profundo, que recibe por bombeo las fases acuosa y orgánica, para su mezcla y emulsión. Este mezclador cuenta con un impulsor que evita el arrastre de la fase orgánica en la fase acuosa, de acuerdo con una configuración y velocidad rotacional definida.
- Un "sedimentador" poco profundo y de gran área. Con este equipo se separan las dos fases, facilitado por un sistema de doble compuerta que va por todo su ancho.
- El aumento de la temperatura en la emulsión, hasta cerca de 25 °C, mejora la rapidez de la reacción y permite una mejor la separación de fases.
- Una manguera distribuidora que va entre el mezclador y el sedimentador, para asegurar un flujo laminar.
- Equipos mezcladores del tipo perfil bajo, ambos equipos en uno, formados por un cajón mezclador múltiple y un decantador al mismo nivel que el mezclador. En el mezclador se une la solución acuosa con el reactivo de extracción, gracias a un agitador que bombea y mueve la mezcla mediante una turbina.

## PARÁMETROS DE LA OPERACIÓN

Los principales parámetros para la operación en el proceso de extracción por solventes son los siguientes:

- Relaciones de flujo orgánico / flujo acuoso, O/A, medidos en las etapas de extracción y de descarga. Se debe recircular el electrolito necesario para alcanzar razón de O/A requerida en el mezclador.
- Tiempo de residencia en mezcladores, la que se expresa en minutos.
- Flujo total en cada equipo (m<sup>3</sup>/min.) y equivalencia de (m<sup>3</sup>/h) de flujo acuoso tratado.