

SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA

# Fortalecimiento de la pequeña minería aurífera en Chile

## Evaluación de tecnologías de lixiviación de oro

Centro de Estudios y Documentación Mineros – CEMS
Gerencia de Estudios
Sociedad Nacional de Minería F.G.- SONAMI

Septiembre 2026

*La propiedad intelectual de este documento corresponde a la Sociedad Nacional de Minería F.G. (SONAMI). Cualquier forma de explotación de este estudio, en especial su uso, reproducción, distribución, comunicación pública o transformación, solo puede ser realizada con la autorización de su titular. La Sociedad Nacional de Minería F.G. se reserva el ejercicio de las acciones legales correspondientes para el caso de incumplimiento de la Ley N° 17.336 de Propiedad Intelectual.*
*Este trabajo ha sido elaborado por el Centro de Estudios y Documentación Mineros de SONAMI (CEMS) con fines estrictamente académicos y analíticos. Su propósito es aportar una mirada general para el fortalecimiento de la pequeña minería aurífera en Chile, con el único objetivo de generar insumos para la reflexión y el debate sobre políticas públicas. Este documento no constituye, bajo ninguna circunstancia, una guía estratégica ni una evaluación de carácter comercial, financiero o de inversión. SONAMI enfatiza que las decisiones estratégicas, operacionales y de negocio son de exclusiva competencia de cada asociado. Por tanto, las conclusiones, resultados y propuestas aquí presentadas no deben ser interpretadas como recomendaciones, sugerencias ni directrices. Toda referencia a faenas o empresas es de carácter estrictamente referencial y no debe interpretarse como una manifestación de respaldo, alineamiento o compromiso de SONAMI ni de sus empresas asociadas.*

# Índice


1. Resumen Ejecutivo ..... 5
2. Introducción ..... 7
3. Objetivos ..... 10
   3.1. Objetivo General ..... 10
   3.2. Objetivos específicos ..... 10
4. El oro en la pequeña minería chilena ..... 10
5. Contexto histórico de la cianuración ..... 14
6. Lixiviación del oro ..... 15
   6.1. Minerales de oro lixiviables ..... 18
   6.2. Evaluación de agentes lixiviantes ..... 20
   6.3. Métodos de lixiviación ..... 21
   6.4. Consideraciones asociadas al manejo del cianuro ..... 23
7. Recuperación del oro ..... 25
   7.1. Desprendimiento de hidrógeno y aumento de la alcalinidad de la solución ..... 28
8. Cianuración: una alternativa viable para la pequeña minería ..... 28
   8.1. Caso de Ecuador ..... 28
   8.2. Caso de Burkina Faso ..... 30
   8.3. Caso de Tanzania ..... 32
9. Principales normas asociadas al uso del cianuro en la industria minera ..... 34
   9.1. Normas relacionadas con el manejo y almacenamiento de Sustancias y Residuos Peligrosos ..... 35
      9.1.1. Normas Generales ..... 35
      9.1.2. Algunas normas especiales sobre manejo y almacenamiento de residuos y sustancias peligrosas ..... 36
   9.2. Algunas normas en materia de Seguridad y Salud de los Trabajadores ..... 38
      9.2.1. Normas Generales ..... 38
      9.2.2. Norma Especial ..... 39
   9.3. Norma especial relacionadas con Infraestructura Minera ..... 39
   9.4. Normas de Emisión ..... 40
   9.5. Normas internacionales aplicables en materia de cianuro y residuos peligrosos ..... 41
10. Remediación de residuos sólidos ..... 42

10.1. Métodos biológicos ..... 42
10.2. Métodos químicos ..... 43
11. Conclusiones ..... 45
12. Referencias ..... 47

# Índice de Figuras

Figura 1 Producción total de oro en PM Chilena y valor comercial a nivel mundial. Fuente: SONAMI en base a información de Cochilco 2026. ..... 9
Figura 2 Producción anual de productores de oro por tipo de producto para la PM. Fuente: (Cochilco, 2025 ) ..... 13
Figura 3 Ejemplo indicador universal de pH ..... 16
Figura 4 Distribución de cianuro según pH de la solución. Fuente: Elaboración propia en base a simulación en programa PHREEQC. ..... 17
Figura 5 Diagrama de Pourbaix (potencial/pH), Fuente: (Domic Mihovilovic, 2001). ..... 17
Figura 6 Representación esquemática de la cementación del oro. Fuente: Adaptación de Marsden (2006) ..... 26
Figura 7 Diagrama esquemático de las etapas principales del proceso Merril - Crowe. Fuente: (Parga, 1988) ..... 27
Figura 8 Trapiche utilizado en planta de procesamiento de oro. Fuente: SONAMI ..... 29
Figura 9 Molino chileno con canaletas cubiertas con alfombras de lana para concentrar oro y técnica de extracción de oro (Ecuador). Fuente: (Veiga. M, 2014) ..... 30
Figura 10 Ilustración de estanque ponedor para lixiviación de oro. Fuente: (Kohio, 2024). ..... 31
Figura 11 Torno de extracción manual. Fuente: (WGC, 2025). ..... 32

# Índice de Tablas

Tabla 1 Catastro parcial de PM del oro por región e infraestructura de procesamiento ENAMI. Fuente: (SONAMI, 2025) ..... 12
Tabla 2 Clasificación de minerales de oro. Fuente: (Richmond K. Asamoah, 2019) ..... 19
Tabla 3 Rendimiento integral de lixiviantes de oro alternativos. Fuente: (Liu, 2022). ..... 21
Tabla 4 Cuadro comparativo métodos de lixiviación con cianuro. Fuente: Marsden (2006) ..... 22
Tabla 5 Cuadro comparativo: propiedades físicas, efectos en la salud y ambiente de las principales formas de cianuro. Fuente: (Instituto Internacional de Gestión del Cianuro, 2002). 24

# 1. Resumen Ejecutivo

La Pequeña Minería (PM) aurífera chilena cumple un rol relevante en la economía local y en la generación de empleo en zonas rurales, particularmente en territorios donde existen limitadas alternativas productivas. No obstante, el sector enfrenta una serie de desafíos estructurales que afectan su competitividad y sostenibilidad, entre los que destacan las bajas recuperaciones metalúrgicas, la escasa incorporación de tecnologías de mayor valor agregado y la persistencia de métodos de procesamiento con bajo rendimiento. A este escenario se suma la necesidad de transitar hacia procesos más seguros y eficientes, en línea con los compromisos internacionales asumidos por Chile en materia de eliminación progresiva del uso de mercurio en la minería aurífera de pequeña escala.

La producción de oro se comercializa principalmente a través de los poderes de compra de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) y compradores privados. Otra parte se procesa en plantas propias para obtener concentrados de oro, y una fracción menor se trata en plantas artesanales que utilizan mercurio para producir oro metálico.

La metalurgia de este mineral en el sector ha experimentado pocos cambios significativos a lo largo del tiempo. Las mejoras observadas corresponden principalmente a la modernización de equipos más que a la incorporación de nuevas tecnologías. Aunque recientemente se han introducido procesos que prescinden del uso de mercurio, como los centrífugos, su adopción masiva dependerá de que demuestren resultados satisfactorios para los productores.

Uno de los principales desafíos de este sector de la minería es generar productos con mayor valor agregado. Para ello, resulta fundamental conocer las características del mineral extraído y seleccionar el proceso metalúrgico más adecuado, con el fin de maximizar la recuperación de oro. Ello permite aprovechar mejor los recursos del yacimiento, reducir pérdidas de mineral, aumentar la eficiencia productiva y asegurar la rentabilidad económica de su operación.

En este contexto, la cianuración del oro se presenta como un proceso metalúrgico ampliamente conocido y utilizado a nivel mundial, capaz de alcanzar altas recuperaciones incluso en minerales de baja ley. **El estudio aborda los fundamentos fisicoquímicos de su lixiviación con cianuro, los principales tipos de minerales auríferos susceptibles de ser tratados mediante este método y los distintos esquemas de recuperación de metal, incluyendo procesos de precipitación**. Asimismo, se analizan los factores operacionales que influyen en la eficiencia del proceso, tales como la granulometría, el pH, la concentración de cianuro y la disponibilidad de oxígeno.

A su vez, el estudio considera las condiciones que deben acompañar una eventual implementación de plantas de cianuración en pequeña escala, con énfasis en el diseño adecuado de las instalaciones, la aplicación de prácticas operacionales controladas, el monitoreo del proceso y la capacitación de los trabajadores. El uso de cianuro se aborda como una tecnología que requiere estándares específicos de manejo y control, orientados a resguardar la seguridad de las personas y el entorno. Bajo esas condiciones, el desarrollo de plantas de cianuración de pequeña escala se plantea como una alternativa concreta para mejorar el desempeño productivo del sector.

El estudio incorpora una revisión de experiencias internacionales en países como **Ecuador, Burkina Faso y Tanzania**, donde la implementación de plantas de cianuración adaptadas a contextos a baja escala ha permitido recuperar valor desde minerales de baja ley y relaves, mejorar la eficiencia del proceso productivo y reducir el uso de tecnologías obsoletas. Estos casos evidencian que este proceso metalúrgico puede implementarse bajo distintos modelos organizativos, ajustándose a las capacidades técnicas y económicas de los productores.

Como parte del análisis, se revisarán las principales normas asociadas al uso del cianuro en la industria minera en Chile, en materias de seguridad y salud ocupacional, protección ambiental, gestión de residuos y cierre de faenas mineras. Su revisión permite identificar las condiciones bajo las cuales la cianuración puede desarrollarse de manera segura y responsable, sin constituir un impedimento para la adopción de la tecnología, sino más bien un conjunto de referencias que orientan su correcta implementación y operación.

En conjunto, el estudio plantea que la incorporación de las plantas de cianuración representa una oportunidad para **fortalecer a la pequeña minería aurífera chilena**, incrementar las recuperaciones de oro y avanzar hacia un modelo productivo eficiente y moderno. La adopción

de esta tecnología, acompañada de capacitación, asistencia técnica y una gestión responsable del proceso, permitiría mejorar la sostenibilidad operativa del sector y su proyección en el mediano y largo plazo, contribuyendo el desarrollo económico local.

# 2. Introducción

Históricamente, Chile ha sido considerado un país minero. En el pasado, su desarrollo estuvo fuertemente ligado a la explotación del salitre, mientras que en la actualidad destaca por ser el principal productor mundial de cobre, nitratos naturales, yodo y renio; asimismo, es el segundo productor de molibdeno y ocupa el tercer lugar en la producción de litio. Por su parte, la minería del oro ha mantenido una presencia constante a lo largo de ambos periodos, desarrollándose de forma paralela y complementaria a estas grandes industrias. Hoy en día, esta actividad es desarrollada por la pequeña, mediana y gran minería. Sin embargo, el presente trabajo se enfocará específicamente en la minería del oro ejecutada por los pequeños productores, quienes desempeñan un rol clave en el desarrollo económico de sus localidades. A pesar de su aporte, ellos enfrentan múltiples desafíos que disminuyen su competitividad, como el limitado acceso a tecnologías eficientes, seguras y accesibles para la recuperación del oro.

Tradicionalmente, la PM ha utilizado el proceso metalúrgico de amalgamación por mercurio para recuperar el oro contenido en los minerales. A nivel mundial se estima que se utilizan alrededor de 2.200 toneladas de mercurio por año, de las cuales el 38% es usado por la minería artesanal y la pequeña minería (ONU, 2019). El uso de este metal conlleva diversos problemas. Por ejemplo, la prolongada exposición puede provocar daños neurológicos, renales y respiratorios en las personas. Además, este elemento liberado al ambiente (aire, agua, suelo) puede transformarse en metilmercurio, el cual es altamente tóxico para los seres vivos. Por lo mismo, en 2013 Chile suscribe el Convenio de Minamata, el cual busca proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones de mercurio, y sus compuestos debido a su alta toxicidad. Este convenio fue ratificado el 2018 y entró en vigor ese mismo año

La minería artesanal en Chile lo ha empleado tradicionalmente para la recuperación de oro metálico desde minerales auríferos. Considerando los impactos negativos que este elemento químico puede generar en la salud de las personas y en el entorno ambiental, se han implementado de manera permanente actividades de capacitación y asistencia técnica,

enfocadas en fomentar buenas prácticas para su uso, manipulación, almacenamiento y gestión segura.

No obstante, lo anterior, el país se comprometió a reducir o eliminar progresivamente su utilización en dichas actividades, regular su importación, exportación y almacenamiento del metal. Además, de implementar planes nacionales para el manejo seguro del mercurio, en un plazo de diez años, a partir de la entrada en vigor del convenio (Ministerio de Medio Ambiente, 2021).

El escenario geopolítico actual, marcado por la definición de minerales críticos por parte de los países productores de tecnología, la imposición de aranceles por parte del gobierno de Estados Unidos y la persistencia de diversos conflictos internacionales, han impulsado el valor del oro. En este contexto, distintos analistas estiman que el precio del metal siga en ascenso, dado su rol como activo de refugio económico.

En la Figura 1 se aprecia la producción de oro de la pequeña minería a nivel nacional. Además, se puede observar el precio histórico de este metal según la bolsa de metales de Londres. En dicha figura se observa la fuerte subida de valor en los últimos tres años, llegando a superar los 3.400 US$/oz troy en 2025. El alza en el precio incentiva a los actores mineros a la extracción de minerales auríferos y en particular a su procesamiento por parte de los pequeños mineros.

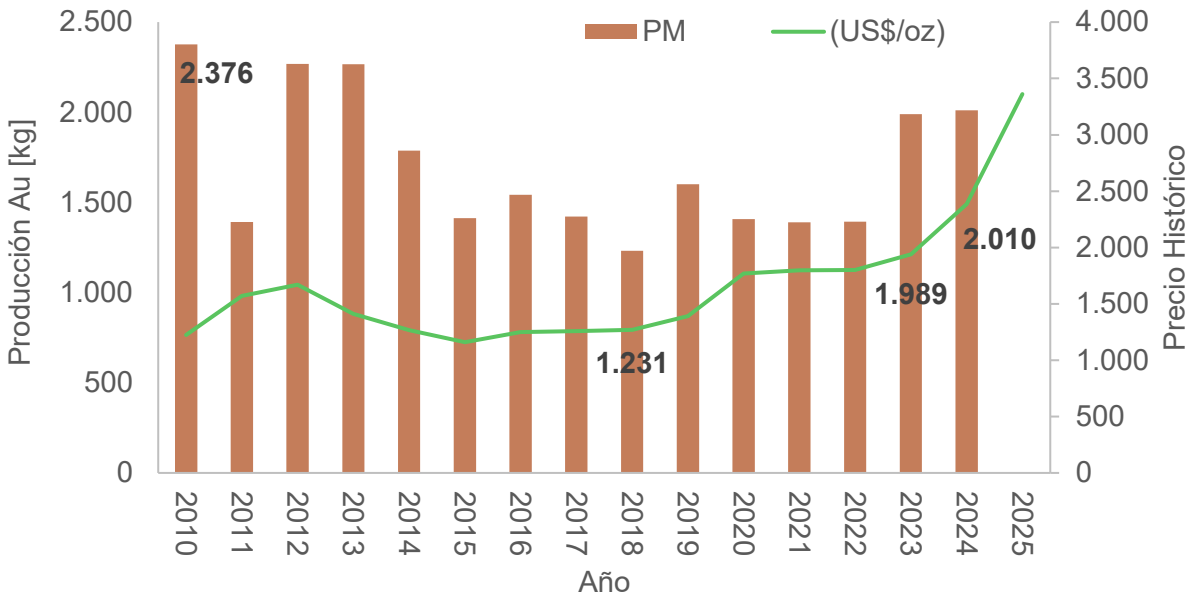


*Figura 1[1] Producción total de oro en PM Chilena y valor comercial a nivel mundial.*
*Fuente: SONAMI en base a información de Cochilco 2026.*

La bonanza de su precio ha permitido que minerales de baja ley adquieran valor económico, aun cuando no sean comercializados en los Poderes de Compra ya establecidos. En este contexto, la cianuración del oro surge como una alternativa tecnológica viable para el procesamiento de estos minerales, permitiendo alcanzar recuperaciones superiores al 85%.

Sin embargo, el principal desafío radica en hacer posible su implementación segura y eficiente en el sector. Para ello, es necesario fomentar su adopción mediante programas de capacitación, el establecimiento de protocolos de manejo del cianuro y la aplicación de buenas prácticas operacionales, entre otros aspectos. Estas medidas son fundamentales para garantizar altos estándares de seguridad, protección ambiental y eficiencia productiva.

Ante este desafío, el presente estudio tiene como objetivo **contextualizar la industria chilena de la producción de oro a baja escala, presentar una técnica alternativa al proceso tradicional para la obtención del oro** y, finalmente, ejemplificar con experiencia comparada sobre el uso de esta técnica hidrometalúrgica, con foco en la pequeña minería.

[1] En la Figura 1 los porcentajes corresponden a la producción de la PM en comparación al total de la producción nacional. Mientras que la línea verde corresponde al eje vertical secundario.

# 3. Objetivos

## 3.1. Objetivo General

Vincular la caracterización de la pequeña minería chilena del oro con el análisis de los fundamentos del proceso de cianuración y la experiencia comparada de otros países que han utilizado este proceso en sus operaciones de pequeña minería.

## 3.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar la pequeña minería chilena del oro en función de su producción, productos comercializados y acceso a infraestructura de beneficio disponible a través de ENAMI.

2. Analizar los fundamentos técnicos y químicos del proceso de cianuración, evaluando su eficiencia, condiciones operacionales y ventajas frente a métodos alternativos de lixiviación.

3. Examinar experiencias internacionales de implementación de cianuración en pequeña minería.

# 4. El oro en la pequeña minería chilena

Como se señaló en la introducción de este artículo, era habitual que los pequeños mineros procesaran los minerales auríferos mediante la amalgamación con mercurio. Sin embargo, tras la entrada en vigor del Convenio de Minamata, el procesamiento de estos minerales quedó prácticamente concentrado en manos de ENAMI. Por esta razón, resulta pertinente recordar el rol de fomento que la legislación chilena le asigna a esta empresa pública. En este sentido, el Decreto con Fuerza de Ley 153 (DFL) en su artículo 2° establece lo siguiente[2].

[2] Decreto con Fuerza de Ley N°153 del Ministerio de Hacienda, el cual crea la Empresa Nacional de Minería, Diario Oficial, 5 de abril de 1960.

> *"La Empresa tendrá por objeto fomentar la explotación y beneficio de toda clase de minerales existentes en el país, producirlos, concentrarlos, fundirlos, refinarlos e industrializarlos, comerciar con ellos o con artículos o mercaderías destinados a la industria minera, como igualmente, realizar y desarrollar actividades relacionadas con la minería y prestar servicios en favor de dicha industria".*

La minería artesanal y la pequeña minería en Chile acceden a los mercados internacionales principalmente a través de mecanismos de compra y procesamiento centralizados, los cuales permiten transformar su producción en productos intermedios exportables. Este esquema no solo facilita su inserción en circuitos comerciales globales, sino también impulsa la formalización y competitividad del sector. De manera individual, estas faenas enfrentarían mayores dificultades para participar en dichos mercados, por lo que la existencia de una estructura de apoyo resulta fundamental. En este ámbito, el rol de ENAMI es fundamental al comprar los minerales explotados por la PM, procesarlos y comercializarlos en los mercados internacionales, así también, se encuentran las alternativas de productores privados que entregan estos mismos servicios, lo que refuerza la vinculación entre estos actores.

El estudio "Distritos productivos para el desarrollo de la minería chilena" (SONAMI, 2025) analiza la distribución regional de las faenas activas de pequeña minería. Asimismo, señala que su presencia se concentra principalmente en zonas cercanas a la costa y a los centros de distribución, debido a la mayor disponibilidad de infraestructura habilitante, como rutas, suministro energético y plantas de procesamiento de ENAMI, lo que permite reducir los elevados costos que implicaría la instalación de infraestructura propia.

*Tabla 1 Catastro parcial de PM del oro por región e infraestructura de procesamiento ENAMI. Fuente: (SONAMI, 2025)*

| | | ENAMI | |
|---|---|---|---|
| **Región** | **N° aproximado faenas activas pequeña minería** | **Poder de compra** | **Planta** |
| **Atacama** | 125 | - Manuel A. Matta<br>- Vallenar | - Manuel A. Matta<br>- Vallenar |
| **Coquimbo** | 137 | - Guayacán/Coquimbo<br>- Delta<br>- Illapel | - Delta<br>- Illapel |
| **O'Higgins** | 95 | - Rancagua | - Rancagua |

En particular, en la región de O'Higgins se encuentra la histórica localidad minera de Chancón, reconocida por su tradicional dedicación a la explotación de oro. En esta zona se concentra el 95% de la actividad de pequeña minería de esta parte del país, posicionándola como el segundo mayor productor de oro en pequeña minería a nivel nacional, con una explotación aproximada de 7.000 toneladas mensuales de mineral. Actualmente, dichos minerales se comercializan con ENAMI a través de la antigua planta de "Los Robles" ubicada en la zona, construida en la década de 1980 y de propiedad privada. En la práctica, esta instalación solo se encarga de realizar muestreo y chancado del mineral aurífero; los procesos de lixiviación y refinación para obtener metal doré se efectúan en la planta de Minera Florida, ubicada en Alhué (Región Metropolitana), lo que implica un costo logístico adicional por concepto de transporte (SONAMI, 2024).

En la Figura 2 se observa la producción de oro proveniente de la PM, cuyos mineros se dedican exclusivamente a la explotación de este metal.

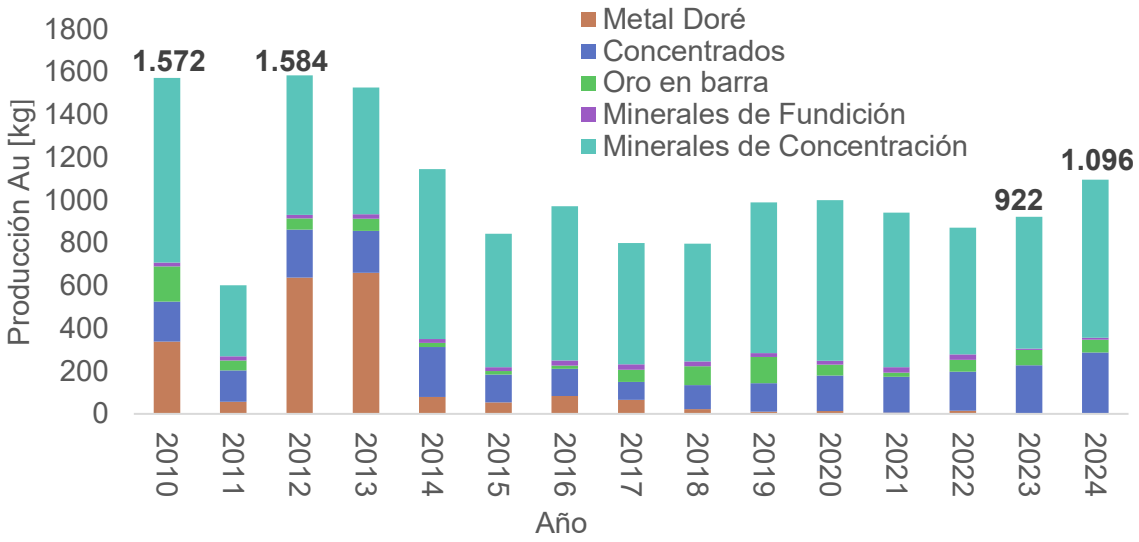


*Figura 2 Producción anual de productores de oro por tipo de producto para la PM.*
*Fuente: (Cochilco, 2025 )*

Durante el periodo de análisis la figura muestra tres etapas distintivas: (i) un periodo de altos niveles de producción de entre 2010 y 2013, con máximos cercanos a los 1600 kg, impulsados por la fuerte participación del metal doré (especialmente 2012 y 2013); (ii) una caída a partir de 2014, con disminución abrupta en la producción de metal doré y del total anual; y (iii) una fase de estabilización desde 2018 en torno a los 800 – 1000 kg/a, en la que el metal doré prácticamente desaparece. Los aportes de concentrados, oro en barra y minerales de fundición permanecen relativamente estables durante todo el periodo. El cambio en la composición del producto sugiere una transición operativa y/o comercial desde la producción de doré hacia el envío de minerales para concentración, acompañada de un nivel productivo global más bajo pero sostenido en los últimos años.

A partir de la adopción del Convenio de Minamata, el país se vio impulsado a reducir y, cuando sea factible, eliminar el uso de mercurio en la extracción y procesamiento de oro artesanal o en pequeña minería (Art. 7), (ONU, 2013), impulsando el abandono de prácticas de amalgamación y la adopción de tecnologías más limpias, pero también más costosas y de un requisito técnico superior. El efecto combinado de mayor fiscalización, mayores costos de cumplimiento y restricciones al uso de mercurio, entre otros, ha llevado a numerosos productores pequeños a limitar e incluso suspender la producción propia de metal doré y, en su lugar, canalizar sus minerales hacia ENAMI u otras plantas de terceros para su procesamiento. Estos puntos ayudan a entender la marcada disminución en la producción de metal doré reportado por este segmento en la Figura 2.

La implementación de plantas de cianuración en beneficio de la pequeña minería podría ofrecer una solución a esta situación al tener un impacto directo en la recuperación de la producción de oro. Este proceso metalúrgico permite recuperar una mayor proporción de metal, incluso en menas de baja ley, optimizando la eficiencia y reduciendo las pérdidas que ocurren con métodos como la amalgamación con mercurio. Con ello, los pequeños productores tendrían acceso a una tecnología que les permitiría incrementar su rendimiento y acceder a mercados internacionales con un producto de mayor calidad y trazabilidad.

# 5. Contexto histórico de la cianuración

El método para disolver oro metálico a través de la cianuración alcalina fue dado a conocer en el año 1783 por el científico Carl Wilhelm Scheele. Varios otros científicos estudiaron las reacciones involucradas. Entre ellos, Bagration en Rusia con publicaciones sobre el tema en 1844, Elsner en Alemania con publicaciones en 1846 y Faraday en Inglaterra, con publicaciones en 1857. Sin embargo, fue Elsner quien estableció por primera vez la necesidad de la presencia del oxígeno $(O_2)$ para que el cianuro disuelva el oro, formulando la siguiente reacción global:

$$4\,Au^{\circ} + 8\,KCN + O_2 + 2\,H_2O \rightleftharpoons 4\,KAu(CN)_2 + 4\,KOH \qquad (1)$$

En la ecuación 1 se puede apreciar que el oro metálico $(Au^{\circ})$ se disuelve dentro del agua $(H_2O)$. A su vez la estequiometría de la reacción indica que, para disolver 1 parte de oro, se requieren 2 partes de cianuro, ½ parte de agua y ¼ parte de oxígeno. Generando como producto un complejo aurocianuro $(Au(CN)_2^{-})$ e hidróxido $(OH^{-})$.

La aplicación de la cianuración alcalina al tratamiento de minerales fue propuesta mucho tiempo después por el químico-metalúrgico John Stewart MacArthur, a través de la patente de invención **“Proceso de Obtención de Oro y Plata desde Minerales”**, en el año 1887, como British Patent N° 14.174. En sus trabajos, MacArthur fue secundado por los hermanos Robert y William Forrest, médicos de Glasgow. Los ensayos y pruebas para respaldar el descubrimiento se realizaron en el sótano de la clínica donde ellos practicaban su profesión. Esta patente tuvo un éxito inmediato, producto del descubrimiento de yacimientos de oro en Nueva Zelanda y Sudáfrica en 1889 y 1890, respectivamente. El **“Proceso de Cianuración”**, como se conoció coloquialmente a la patente mencionada, permite recuperar el oro disuelto con cianuro a través de la precipitación

(cementación) con zinc, previa desaireación de las soluciones, proceso conocido como **"Merril-Crowe"** (Domic Mihovilovic, 2001).

# 6. Lixiviación del oro

Por más de 100 años se ha utilizado el cianuro como agente lixiviante para extraer el oro presente en los distintos minerales. Este agente es utilizado en alguna de sus formas más solubles, como cianuro de potasio (KCN) o cianuro de sodio (NaCN), facilitando su disolución en agua. A nivel industrial se prefiere usar el NaCN, ya que presenta un mayor contenido de $CN^-$ activo por unidad de peso (molar): 53% versus 40% en el caso del KCN. Dicho de otra manera, por cada kilogramo de reactivo, se tiene más cianuro disponible cuando se utiliza cianuro de sodio. La ecuación específica que representa la cianuración alcalina suele expresarse de la siguiente manera (Plessis. C.A, 2021):

$$4\,Au^0 + 8\,NaCN + O_2 + 2\,H_2O \rightarrow 4\,NaAu(CN)_2 + 4\,NaOH \qquad (2)$$

Se puede apreciar que las ecuaciones 1 y 2 son bastante similares, solo se diferencian en el reactivo utilizado y ambas requieren de oxígeno para completar la reacción. El oxígeno que está disuelto en el agua actúa como un agente que ayuda a completar la reacción (cátodo), y el oro metálico se comporta como la parte que se transforma (ánodo). Para que esta reacción ocurra, es necesaria una cantidad mínima de cianuro. En términos prácticos, se requieren 2 partes de cianuro para disolver 1 parte de oro.

El **pH** es un parámetro clave cuando se trabaja con cianuro, por lo que es importante recordar su significado. Corresponde a una medida que indica qué tan ácida o básica (alcalina) es una sustancia, especialmente en soluciones líquidas. Se mide en una escala que va de 0 a 14, si tiene valores menores a 7 se considera que la sustancia es ácida (como el jugo de limón o el vinagre), si es exactamente 7 se considera neutra (como el agua pura) y si toma valores mayores a 7 se considera una sustancia alcalina (como el detergente o el agua con cal). La importancia de este parámetro en minería radica en el hecho de que, según su valor, se determinará si un mineral puede disolverse o qué productos se formarán en una reacción. Controlar el pH es clave para que los procesos funcionen de manera correcta y no dañen a las personas ni al medio ambiente.

En particular, en el proceso de cianuración se evita trabajar a pH inferiores a 9,24, ya que bajo ese valor comienza la formación de ácido cianhídrico (HCN), lo que genera pérdidas de cianuro libre por volatilización (baja temperatura de ebullición) y representa un riesgo para la salud humana. En la práctica industrial, se opera a valores de pH superiores a 10, lo que se conoce como alcalinidad protectora, para minimizar este riesgo.

Y el monitoreo del pH en terreno puede realizarse mediante instrumentos de medición continua o a través de herramientas simples como el papel indicador universal de pH (Figura 3), el cual cambia de color según la acidez o alcalinidad de la solución. Este método permite una verificación rápida del rango operativo, siendo especialmente útil en operaciones de pequeña minería donde no siempre se dispone de instrumentación avanzada.

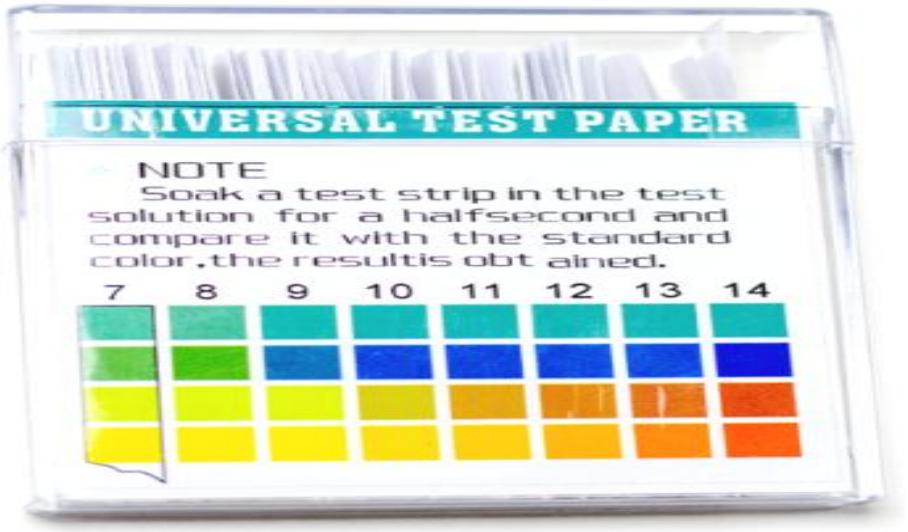


*Figura 3 Ejemplo indicador universal de pH*

En la Figura 4, se puede apreciar que cuando se trabaja a pH 9, alrededor del 60% del cianuro se encuentra en forma de HCN, es decir a la izquierda del gráfico aumenta la cantidad de ácido disponible. Mientras que si se trabaja a pH 10,5 cerca del 95% se encuentra en forma de cianuro libre (ion disuelto en agua, $CN^-$), a la derecha del gráfico disminuye drásticamente la formación del ácido. Por lo mismo, es usual que el pH operacional esté comprendido entre 10,5 y 11.

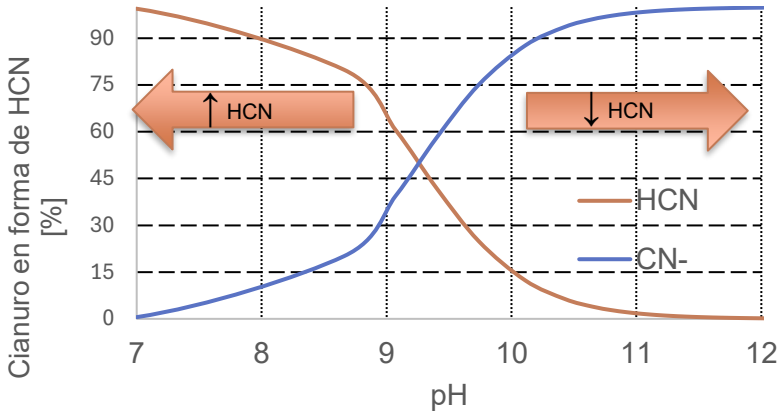


*Figura 4 Distribución de cianuro según pH de la solución.*
*Fuente: Elaboración propia en base a simulación en programa PHREEQC.*

La disolución del oro en cianuro es un proceso controlado por difusión, la máxima velocidad de disolución se alcanza cuando la relación $\frac{[CN^-]}{[pO_2]} = 6$. Bajo estas condiciones, se logran recuperaciones superiores al 85 % en minerales típicos (i.e. Pirita), utilizando concentraciones de NaCN entre 0,1 y 1,0 g/L, con un tiempo de reacción del orden de 24 horas en lixiviaciones agitadas.

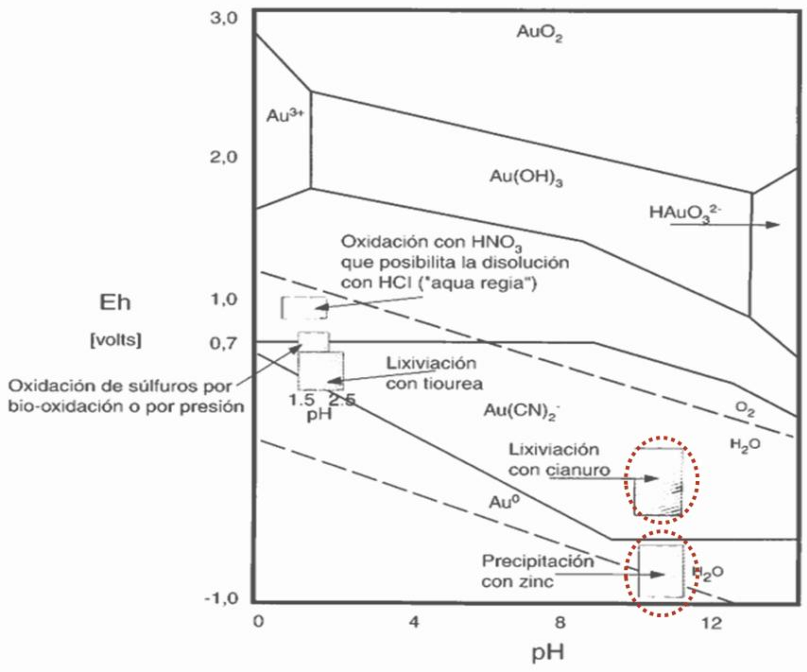


*Figura 5 Diagrama de Pourbaix (potencial/pH),*
*Fuente: (Domic Mihovilovic, 2001).*

La Figura 5 corresponde al diagrama de Pourbaix del oro. Estas gráficas muestra las regiones de estabilidad termodinámica de un metal y sus compuestos (iones, óxidos, hidróxidos) en función del potencial electroquímico o potencial redox (Eh, eje Y) y el pH (eje X) de la solución acuosa. En términos simples el Eh es una medida del poder oxidante o reductor del medio acuoso, es decir, la capacidad para aceptar o ceder electrones por parte de la solución. Las líneas sólidas de estas gráficas indican los equilibrios entre estas especies, definidas por ecuaciones como la de **Nernst**. Mientas que las líneas punteadas representan los límites de estabilidad del agua (oxidación a oxígeno y reducción a hidrógeno). El círculo punteado superior corresponde a la zona en donde se produce la lixiviación del oro con cianuro. Dicho de otra forma, dentro de ese rango de pH y Eh es donde se disuelve el oro metálico.

Una vez completado el proceso de cianuración el producto resultante es el complejo aurocianuro ($Au(CN)_2^-$), especie iónica que se encuentra dentro de la solución acuosa y que debe ser recuperada en una etapa posterior.

## 6.1. Minerales de oro lixiviables

En la sección anterior se describió la parte química del proceso de cianuración; sin embargo, este método de **lixiviación no es aplicable a todos los minerales de oro de manera directa**. Algunos de ellos, conocidos como **refractarios**, presentan características que impiden la disolución eficiente del oro mediante cianuro, debido a la presencia de compuestos como sulfuros de hierro o carbono orgánico. Estos minerales requieren **pretratamientos específicos**, como oxidación térmica, biooxidación o molienda ultrafina, que permiten liberar el oro y mejorar su recuperación en etapas posteriores de lixiviación. La identificación y clasificación de éstos es crucial para optimizar la eficiencia del proceso y reducir pérdidas de metal valioso. La Tabla 2 busca resumir estos aspectos, clasificando los minerales de oro, señalando la matriz de mineral en que puede estar ocluido el oro, los grados de liberación necesarios para la cianuración y las recuperaciones teóricas que se pueden obtener según sea el origen del mineral de oro.

*Tabla 2 Clasificación de minerales de oro.*
*Fuente: (Richmond K. Asamoah, 2019)*

| Clasificación de mineral | Oro asociado en minerales | Liberación de oro | Recuperación de oro con la cianuración |
|---|---|---|---|
| Placer | Platino, iridosmina, magnetita, pirita, ilmenita, circón, granates y barita. | Oro nativo completamente liberado: no requiere conminución. | 100 % |
| Liberado al moler | Cuarzo, pirita, arsenopirita, feldespato, mica, clorita y minerales carbonatados. | Oro no liberado: totalmente liberado después de la conminución | Superior al 90% |
| Oxidado | Hematita, magnetita, goethita, limonita, minerales arcillosos. | Ya sea liberado u ocluido por productos de alteración. | Variable – basado en la asociación |
| Refractario:<br>• Leve<br>• Medio<br>• Alto | Helururos, asociación compleja con pirita, arsenopirita, cuarzo, minerales de cobre, galena y materiales carbonáceos; El grado de refractariedad aumenta con la complejidad de la asociación oro-ganga y el efecto del mineral de ganga sobre la cianuración; oro submicroscópico en minerales de ganga, especialmente arsenopirita. | Oro no liberado. Liberado parcial o totalmente tras el pretratamiento del mineral. El éxito del pretratamiento determina la recuperación de oro. | • 80 % - 90 %<br>• 50 % - 80 %<br>• < 50 % |

En la minería chilena, muchos yacimientos auríferos presentan una asociación con minerales de cobre. Esta coexistencia plantea desafíos en la selección de los procesos de tratamiento. La cual depende en gran medida de la mineralogía del material. En el caso de los óxidos de cobre, es común realizar un pretratamiento con ácido sulfúrico para disolver y eliminar selectivamente el cobre antes de la cianuración, reduciendo así el consumo de cianuro. En cuanto a los sulfuros de cobre, excepto la covelina, que se disuelve directamente en ácido, requieren ser oxidados previamente o durante la lixiviación ácida para lograr su eliminación. En este contexto, la disolución oxidativa ha sido empleada para oxidar sulfuros de cobre mediante peróxido de hidrógeno $(H_2O_2)$, permitiendo a la vez la lixiviación de los óxidos resultantes con ácido sulfúrico.

Por su parte el mineral de cobre más abundante del mundo, la calcopirita $(CuFeS_2)$, es el más estable de los minerales cupríferos en soluciones de cianuro. Debido a esta estabilidad, se le reconoce dentro de los sulfuros como el principal responsable de las pérdidas de oro por **preg-robbing**[3], fenómeno asociado a la reducción y posterior precipitación del complejo aurocianuro en su superficie, lo que impide que el oro permanezca en solución y disminuye la eficiencia del proceso de cianuración (Larrabure. G, 2021).

[3] Preg-robbing: "robo" del oro ya disuelto, causado por la adsorción o precipitación del aurocianuro sobre minerales presentes en el mineral tratado.

## 6.2. Evaluación de agentes lixiviantes

Desde una perspectiva ambiental, si bien la cianuración ha sido objeto de críticas durante años por su nocividad, las tecnologías actuales de producción comercial permiten recuperar y tratar de forma eficiente los residuos peligrosos, así como mitigar sus efectos. En el ámbito económico, este proceso es ampliamente valorado por las plantas de oro debido al bajo costo de sus reactivos y equipos. Además, cuenta con una larga trayectoria y una tecnología probada, pese a que los gastos asociados a la gestión ambiental son relativamente altos (Liu, 2022). En términos de eficiencia, el complejo oro-cianuro presenta la constante de estabilidad más elevada entre todos los lixiviantes conocidos, es decir, una vez formado el complejo se mantiene dentro de la solución acuosa. Asimismo, la cianuración dispone de procesos de recuperación consolidados, como Carbón en Pulpa (CIP), Carbón en Lixiviación (CIL), Resina en Pulpa (RIP) y cementación con zinc, que permiten recuperar el oro de la solución de lixiviación con gran eficacia.

Los lixiviantes que contienen azufre, como el tiosulfato, la tiourea, el tiocianato y los polisulfuros, han sido estudiado como **alternativas prometedoras** al cianuro para la disolución de oro. Desde el punto de vista de la eficiencia, todos estos compuestos son capaces de disolver oro, destacando la tiourea por presentar cinéticas de disolución más rápidas. Sin embargo, su **estabilidad química es limitada**, y la formación de especies de azufre (como azufre elemental) puede inducir fenómenos de pasivación[4] sobre la superficie del oro, afectando negativamente la extracción.

A pesar de ello, estos lixiviantes han mostrado una mayor tolerancia frente a la presencia de minerales sulfurados en comparación con el cianuro. Pese a esas ventajas, su aplicación a escala industrial aún enfrenta desafíos, principalmente asociados con consumo de reactivos y costos operacionales. Desde una perspectiva ambiental, presentan menor toxicidad que el cianuro, pero de todas formas requieren de una etapa de limpieza antes de la descarga de aguas residuales. Además, su bajo estado de valencia implica una alta demanda química de oxígeno; por otra parte, su capacidad de reciclaje es limitada debido a su inestabilidad química. El resumen de las distintas consideraciones tomadas para la evaluar los agentes lixiviantes pueden ser observadas en la Tabla 3.

[4] Pasivación: formación capa de precipitado sobre la superficie del mineral, impidiendo la penetración del agente lixiviante.

*Tabla 3 Rendimiento integral de lixiviantes de oro alternativos.*
*Fuente: (Liu, 2022).*

| Lixiviantes | Efectividad | | | | Económica | | | | Sustentable | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cinética | Recuperación | Adaptabilidad | Estabilidad | Reactivo | Equipamiento | Control de Polución | Madurez de la Industria | Toxicidad | Reciclaje | Desintoxicación |
| Cianuro | | | | | | | | | | | |
| Tiosulfato | | | | | | | | | | | |
| Tiourea | | | | | | | | | | | |
| Tiocianato | | | | | | | | | | | |
| Polisulfuros | | | | | | | | | | | |




Se han realizado numerosos estudios sobre lixiviantes y procesos alternativos. A pesar de eso aún se requiere un mayor desarrollo para alcanzar a la cianuración. Los lixiviantes señalados que contienen azufre deben mejorar su estabilidad, reciclabilidad y profundizar las técnicas de remediación.

Si bien la cinética y la adaptabilidad de la cianuración son limitadas, los efectos negativos provocados por la ganga pueden mitigarse mediante un adecuado pretratamiento. Hasta la fecha, la cianuración ha ocupado un lugar destacado en la extracción de oro y seguirá evolucionando hacia una alta eficiencia y reciclabilidad. El tratamiento de relaves de cianuro y aguas residuales aún requiere mayor estudio.

## 6.3. Métodos de lixiviación

Existen diversos métodos de cianuración aplicables a los minerales de oro, entre los cuales destacan la lixiviación por agitación, la lixiviación en pilas, la lixiviación intensiva (reactor con temperatura y presión), la lixiviación en lechos inundados y la lixiviación in situ.

La elección entre estos métodos depende principalmente de la relación entre el tamaño de las partículas y la recuperación, los costos de capital y de operación, y la tasa de disolución en cada caso. A veces la recuperación de otros metales valiosos, consideraciones ambientales y la disponibilidad de financiamiento de capital pueden desempeñar un papel importante en esta selección. A continuación, se describen tres métodos de lixiviación (Marsden, 2006). En la Tabla 4 se busca resumir los distintos métodos de lixiviación.

- **Lixiviación por agitación**: Es el método más usado y eficiente, aplicado a una amplia variedad de minerales. Una vez molido finamente, se mezclan con solución de cianuro en tanques de acero agitados mecánicamente para mantener los sólidos en suspensión y maximizar el contacto. Se trabaja con pH entre 10–11 (usando cal o soda cáustica), oxígeno disuelto (aire o incluso oxígeno puro), y concentraciones de NaCN de 0,05–0,5 g/L. La recuperación suele ser alta (90%–97%) pero con costos de capital y operación elevados debido a molienda fina, energía y reactivos.
- **Lixiviación en pilas**: Método de bajo costo, ideal para minerales de baja ley. El mineral (ROM o chancado) se apila sobre membranas impermeabilizadas y se irriga con cianuro, que percola disolviendo el oro. Se utilizan sistemas de riego por goteo o aspersión. Las recuperaciones son de 50%–80%, con ciclos largos (meses–años). Es muy sensible a la permeabilidad (problemas con arcillas o finos), por lo que a veces se requiere aglomeración. Tiene la gran ventaja de procesar grandes volúmenes a bajo costo.
- **Lixiviación lecho inundado** (bateas): Consiste en depositar mineral chancado en cubas, estanques o tanques grandes (de madera, hormigón o acero), donde se inunda completamente con solución cianurada. Permite un contacto eficiente y evita problemas de canalización típicos de las pilas. Sin embargo, presenta altos costos de construcción y operación, con recuperaciones similares a la lixiviación en pilas.

*Tabla 4 Cuadro comparativo métodos de lixiviación con cianuro.*
*Fuente: Marsden (2006)*

| Método | Aplicación típica | Recuperación de oro | Tiempo de lixiviación | Costos relativos | Observaciones |
|---|---|---|---|---|---|
| **Agitación** | minerales de ley media-alta, molienda fina | 90% – 97% | Horas - días | Alto | mayor control del proceso, combina CIP/CIL |
| **Pilas** | minerales de baja ley, grandes volúmenes | 50 %– 80% | Meses - años | Bajo | método más usado a gran escala, sensible a arcillas |
| **Inundado (bateas)** | minerales chancados, granulometría gruesa | 60 – 85% | días - semanas | Alto | contacto eficiente, pero poco usado hoy en día |

## 6.4. Consideraciones asociadas al manejo del cianuro

El uso de cianuro en procesos metalúrgicos requiere condiciones estrictas de manejo, control operacional y seguridad. Sus posibles efectos sobre la salud humana dependen de factores como la forma química en que se presenta, la concentración, la vía de exposición y el tiempo de contacto. Por ello, su gestión exige medidas preventivas, capacitación, control operacional y protocolos de respuesta que permitan reducir los riesgos asociados a su manipulación y uso.

En situaciones de exposición no controlada, el cianuro puede ingresar al organismo por inhalación, ingestión o contacto con la piel, afectando procesos fisiológicos asociados al uso del oxígeno a nivel celular, según ha sido descrito por la literatura especializada (Ramírez, 2010). En este sentido, la seguridad del proceso depende de que su implementación se realice bajo estándares adecuados de diseño, operación, monitoreo y respuesta ante contingencias.

En el entorno natural, el comportamiento del cianuro depende de las condiciones fisicoquímicas del medio. Puede reaccionar formando complejos con metales, adsorberse en suelos, transformarse en otras especies químicas o volatilizarse. Sus efectos tienden a ser más relevantes en organismos acuáticos y aves, especialmente en peces e invertebrados, mientras que plantas y algas muestran mayor tolerancia relativa. Aunque el cianuro puede degradarse con relativa rapidez bajo determinadas condiciones ambientales, su presencia en concentraciones no controladas puede incidir en la composición de las comunidades biológicas.

Asimismo, el cianuro se mantiene como el agente lixiviante más utilizado en la extracción de oro, debido a su alta selectividad, eficiencia metalúrgica y menor costo relativo frente a otros reactivos alternativos. El desarrollo de tecnologías de recuperación, recirculación y destrucción de cianuro, como el proceso INCO[5], la oxidación natural y los sistemas de recirculación de soluciones, ha permitido reducir significativamente las concentraciones residuales en soluciones y relaves. Estas medidas han contribuido a disminuir los riesgos ambientales asociados al proceso y a sostener el uso del cianuro como una herramienta relevante en la industria aurífera, siempre bajo criterios de gestión segura del reactivo y conforme a la normativa aplicable, materia que se aborda con mayor detalle en la sección 9.

[5] Tecnología ampliamente utilizada para destruir cianuro residual en soluciones o relaves provenientes de la lixiviación de oro. Su objetivo principal es reducir la concentración de cianuro libre y complejo, minimizando el impacto ambiental de los efluentes antes de su disposición.

A continuación, la Tabla 5 presenta un cuadro comparativo de las tres formas más usuales en que puede encontrarse el cianuro, ya sea en estado sólido o líquido. En ella se resumen aspectos clave como estado físico, olor, puntos de fusión y ebullición, solubilidad en agua, usos industriales, vías de exposición, efectos potenciales en la salud humana, toxicidad para la fauna acuática y terrestre, así como su comportamiento y persistencia en el ambiente.

*Tabla 5 Cuadro comparativo: propiedades físicas, efectos en la salud y ambiente de las principales formas de cianuro. Fuente: (Instituto Internacional de Gestión del Cianuro, 2002).*

| Aspecto | NaCN (cianuro de sodio) | KCN (cianuro de potasio) | HCN (ácido cianhídrico) |
|---|---|---|---|
| **Estado físico a 25°C** | Sólido cristalino blanco | Sólido cristalino blanco | Líquido incoloro o gas volátil |
| **Olor** | Débil, almendras amargas (no todos lo detectan) | Similar al NaCN | Almendras amargas, característico |
| **Punto de fusión** | 563 °C | 634 °C | 25,7 °C |
| **Punto de Ebullición** | Se descompone (no hierve) | Se descompone (no hierve) | 26 °C (muy volátil, gas fácilmente) |
| **Solubilidad en agua** | Muy soluble (48g/100 mL a 25°C) | Muy soluble (71g/100 mL a 25°C) | Miscible en agua |
| **Uso Industrial** | Minería oro/plata | Menos usado en minería | No se usa directamente, riesgo si se libera de sales a pH bajo |
| **Toxicidad humana ($LD_{50}$[6] oral)** | ~ 6,4 mg/kg (ratas) | ~ 5mg/kg (ratas) | 1 – 3 mg/kg (humanos) |
| **Vía de entrada** | Polvo inhalado, ingestión, absorción dérmica | Similar a NaCN | Inhalación (principal), dérmica y oral |
| **Efectos en humanos** | Mareo, náusea, hipoxia celular, paro respiratorio | Síntomas similares al NaCN, toxicidad aguda alta | Extremadamente tóxico, 100 – 300 ppm inhalados → muerte en 10 – 60 min |
| **Umbral ocupacional (OSHA PEL[7])** | 5 $mg/m^3$ (como $CN^-$) | 5 $mg/m^3$ (como $CN^-$) | 10 ppm (11 $mg/m^3$) |
| **Comportamiento ambiental** | Reacciona formando complejos metálicos; degradación natural a tiocianato/cianato; no bioacumula | Comportamiento muy similar al NaCN | Muy reactivo, volatiliza y se degrada por fotólisis, hidrólisis y biodegradación |
| **Efectos agua y suelo** | Riesgo si soluciones llegan a cuerpos de agua; se degrada a | Similares al NaCN | HCN libre es la forma más tóxica para vida acuática, |

[6] $LD_{50}$: valor que indica la dosis de una sustancia química que causa la muerte del 50% de la población de animales de prueba.
[7] OSHA PEL: Occupational Safety and Health Administration – Permissible Exposure Limit, es el límite máximo de concentración de un contaminante químico al que un trabajador puede estar expuesto durante una jornada laboral estándar (generalmente 8 horas diarias, 40 horas semanales) sin que se espere que cause efectos adversos para la salud.

| Aspecto | NaCN (cianuro de sodio) | KCN (cianuro de potasio) | HCN (ácido cianhídrico) |
|---|---|---|---|
| | tiocianato; adsorción en arcillas y materia orgánica | | depende de pH y temperatura |
| **Toxicidad en peces e invertebrados** | Efectos desde 5–7 µg/L de $CN^-$ libre; mortalidad a 20–76 µg/L; >200 µg/L letal para peces | Igual que NaCN | Principal responsable de la toxicidad acuática (HCN disuelto) |
| **Toxicidad en aves** | Riesgo al beber agua con $CN^-$ WAD[8] (libera HCN en estómago); $LD_{50}$ 0,8–11 mg/kg | Igual que NaCN | HCN generado en estómago es la principal causa de muerte |
| **Toxicidad en mamíferos** | $LD_{50}$ oral 2–10 mg/kg (coyote, ratas); ganado sensible (bovinos > ovinos > caballos > cerdos) | Igual que NaCN | Altamente tóxico en inhalación y en plantas forrajeras cianogénicas |
| **Persistencia ambiental** | Baja, se degrada rápidamente (oxidación, biodegradación, volatilización) | Igual que NaCN | Muy baja, se volatiliza y degrada en horas-días; no se bioacumula |

# 7. Recuperación del oro

La precipitación de un metal o sus sales, desde una solución acuosa, por otro metal, se conoce como **"cementación"**, debido a que el metal precipitado usualmente se deposita o cementa sobre el metal añadido. El término técnico correcto es **reducción por contacto**, proceso que también es conocido como precipitación galvánica.

En estos casos es sumamente útil el concepto de **"**Escala de Nobleza**"**, el cual sirve para comparar la nobleza entre los metales y saber de antemano cual será más propenso a reducirse o precipitar. Un metal será más noble si al estar disuelto precipita en presencia de otro (es menos capaz de oxidarse). En otras palabras, el metal con el potencial más alto (tendencia a la oxidación) pasará a la solución y desplazará a otro metal que tenga un menor potencial positivo, siempre y cuando las soluciones sean diluidas.

[8] WAD: Weak Acid Dissociable; ácido débilmente disociable

El ejemplo más relevante es el de la cementación del complejo aniónico del aurocianuro, $Au(CN)_2^-$. La solución acuosa que contiene esta especie se mezcla con polvo metálico de zinc, generando una precipitación galvánica. En la Figura 5 se puede apreciar un círculo punteado que se encuentra por debajo de la zona de lixiviación. Aquel círculo es el área en donde se produce el proceso de cementación. Es decir, dentro de ese rango de pH y Eh es donde precipita el complejo aurocianuro. La ecuación que tradicionalmente se utiliza para representar la cementación del oro a partir del zinc metálico se presenta a continuación (Domic Mihovilovic, 2001), a su vez la Figura 6 representa gráficamente los aspectos de la cementación.

$$2\,Au(CN)_2^- + Zn^\circ + 2\,CN^- + H_2O \rightarrow 2\,Au^\circ + Zn(CN)_4^{2-} + {}^1/_2\,H_2 + OH^- + 2\,CN^- \qquad (3)$$

Como precaución siempre debe mantenerse alejado el ingreso de oxígeno al reactor de cementación para evitar reacciones competitivas que reduzcan la efectividad del agente precipitante. Al existir un excedente de $CN^-$ en solución, y presencia de oxígeno, estarían dadas las condiciones para una redisolución del oro recién precipitado (ecuaciones 1 y 2). Por esta razón se aplica vacío a las soluciones antes de agregar el zinc ($Zn^\circ$). El proceso se conoce como Merrill-Crowe y constituye una parte indispensable en la recuperación de oro por precipitación con zinc. El oro en equilibrio en las soluciones estériles puede alcanzar fácilmente valores tan bajos como 0,01 ppm (partes por millón), en otras palabras, prácticamente todo el oro es recuperado a través de este método.

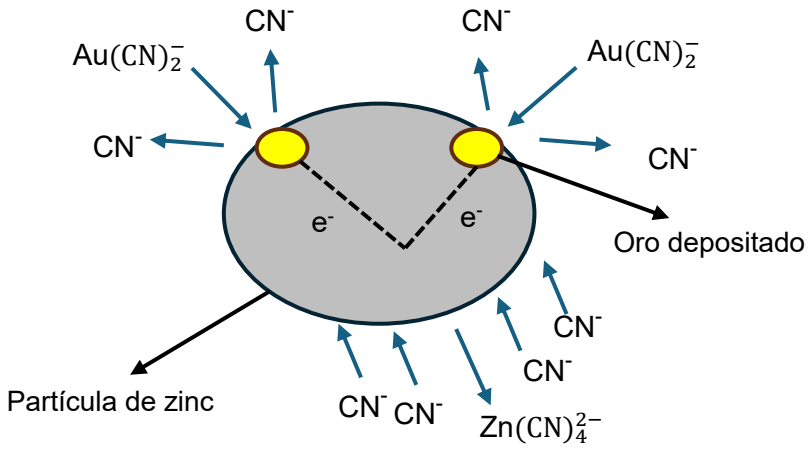


*Figura 6 Representación esquemática de la cementación del oro.*
*Fuente: Adaptación de Marsden (2006).*

El proceso Merrill – Crowe se esquematiza en el diagrama de flujos de la Figura 7. A continuación, se hace una descripción del proceso de cementación.

Previamente al proceso de cementación, las soluciones cianuradas que provienen de la lixiviación, ricas en oro y/o plata, son sometidas a una filtración para eliminar la turbidez o las partículas en suspensión que puedan contaminar el material precipitado. La etapa permite una clarificación de las soluciones cianuradas, evitando interferencias indeseadas en la precipitación del oro y la plata.

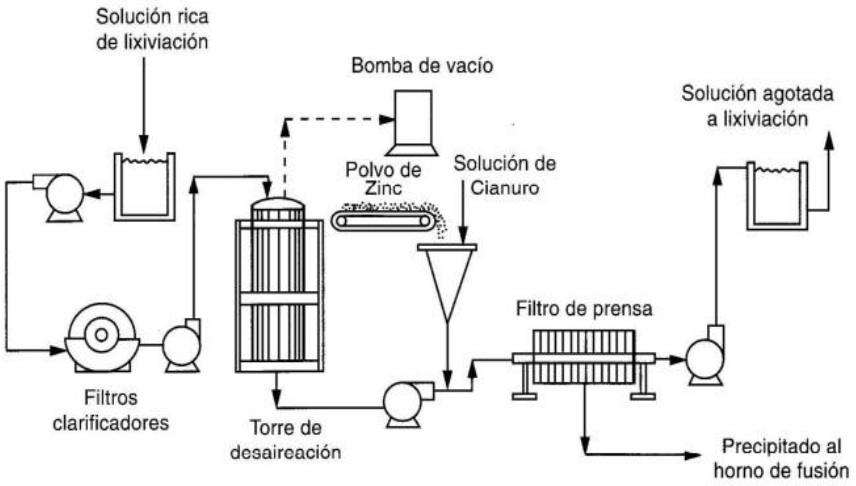


*Figura 7 Diagrama esquemático de las etapas principales del proceso Merril - Crowe.*

La solución clarificada es sometida a un tratamiento de desaireación al vacío para la remoción total del oxígeno disuelto. Esta unidad cuenta con un denso enrejado que obliga a la solución, al ingresar por la parte superior, a descender en forma de cascadas de películas delgadas, aumentando el área de contacto y favoreciendo una desaireación más eficiente y rápida.

Dado que la cementación es un proceso de reducción, la remoción de los agentes oxidantes, como el oxígeno disuelto, resulta fundamental para mejorar la eficiencia del proceso, ya que evita la redisolución del oro y la plata previamente cementados. Asimismo, en ausencia de oxígeno se previene la formación de precipitados indeseados como óxido de zinc hidratado de color blanco, incluso a bajas temperaturas. Una vez desaireada, la solución es conducida por una tubería cerrada, en la cual se dosifica el polvo de zinc sin contacto con la atmósfera. El uso de zinc en polvo, característico del proceso Merrill – Crowe, proporciona una elevada superficie específica, lo que favorece el contacto reactivo con los complejos metálicos disueltos y mejora considerablemente la cinética y eficiencia de la reacción de cementación.

## 7.1. Desprendimiento de hidrógeno y aumento de la alcalinidad de la solución

Debido a la característica física del precipitante, las microburbujas de $H_2$ (ecuación 3) que se forman en la solución se adhieren a las partículas de zinc, formando un par galvánico $H_2$/Zn, que favorece aún más la reacción. Como la reacción es muy rápida, estas soluciones se pueden conducir inmediatamente al filtro de prensa, donde queda retenido el precipitado de oro y plata, más alguna cantidad de zinc residual. Adicionalmente, las telas de los filtros finales suelen rellenarse con algo más de zinc, lo que contribuye a minimizar cualquier eventual pérdida de oro y plata al forzar que las soluciones tomen contacto con el precipitante cuando son filtradas, aún después del proceso de cementación propiamente tal. Las soluciones ahora empobrecidas de oro pueden retornar al proceso de lixiviación con un mayor pH, producto de la generación de iones de $OH^-$.

El análisis del precipitado retenido indica la presencia de un 60% – 90% de oro más plata y una cantidad de entre 5 y 10% de zinc. Posteriormente, el precipitado se funde directamente para obtener metal doré. En algunas operaciones mineras, el precipitado se lixivia con una solución de ácido sulfúrico para remover las impurezas solubles en ellas, luego se filtra para ser enviado a la etapa de fundición, obteniendo metal doré.

# 8. Cianuración: una alternativa viable para la pequeña minería

En las secciones anteriores se caracterizaron las condiciones actuales de la pequeña minería aurífera en Chile y se revisaron los fundamentos químicos como las condiciones operacionales típicas de la cianuración. A partir de ello, en la siguiente sección se expondrán tres casos de implementación de este proceso metalúrgico en la minería artesanal y pequeña minería internacional.

## 8.1. Caso de Ecuador

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) reportó en 2010 la existencia de 1.350 mineros artesanales formales en todo el país, dedicados mayoritariamente a la extracción de minerales de oro. Solo en la provincia de El Oro existen 541 minas artesanales y de pequeña escala. La

producción oficial de oro reportada por el país es de aproximadamente 10 t/año, no obstante, se estima que el total real debería rondar las 25 t/año, de las cuales entre el 75% - 80% provendría de la minería artesanal.

Portovelo, situado en la provincia del El Oro, es considerado como el principal centro minero del país. Esta zona cuenta con varias plantas de beneficio, las que son abastecidas en su mayoría por proveedores locales y del norte de Perú (Suyo). En cuanto al procesamiento de minerales, alrededor del 10% de las plantas son capaces de procesar menos de 10 t/día, el 60% procesa entre 10 – 50 t/día, el 25% procesa entre 50 – 100 t/día y solo el 5% procesa más de 100 t/día de mineral. Sumando un total aproximado de 3.000 t/día. Cabe destacar que la mayoría de estas plantas de procesamiento suelen tener sus propias operaciones mineras.

La gran mayoría de las plantas de procesamiento emplean trapiches (*Chilean Mill*) para molienda del mineral. Los molinos suelen constar con dos o tres ruedas de cemento pesadas con llantas de acero, accionadas por un motor eléctrico de 20 hp. Las ruedas giran sobre una placa de acero de 25 cm de ancho y dos pulgadas de espesor para triturar y moler el mineral hasta un tamaño inferior a 0,2 mm. El material molido se concentra en canaletas con alfombras de lana. Este diseño se ilustra en la Figura 8 y la Figura 9.



*Figura 8 Trapiche utilizado en planta de procesamiento de oro.*
*Fuente: SONAMI*

Como alternativa al uso de mercurio, un sector de la minería local ha implementado la cianuración directa de concentrados gravimétricos. Este proceso se lleva a cabo en tanques de agitación alquilados con una capacidad de 14 $m^3$, lo que representa un costo operativo estimado de 200 USD por lote (precio al 2010). El ciclo de lixiviación se extiende por cinco días y culmina con la recuperación del oro mediante el proceso **Merrill-Crowe** (precipitación con zinc) y su posterior fundición en hornos a gas (Veiga. M, 2014). El impacto de la implementación de este proceso es notable, ha permitido mitigar la liberación de aproximadamente 560 kg anuales de mercurio, cantidad que anteriormente se emitía de forma directa a la atmósfera durante el quemado de amalgamas sin sistemas de filtración.



*Figura 9 Molino chileno con canaletas cubiertas con alfombras de lana para concentrar oro y técnica de extracción de oro (Ecuador). Fuente: (Veiga. M, 2014)*

## 8.2. Caso de Burkina Faso

La minería artesanal de oro en Burkina Faso tiene raíces históricas, pero su auge moderno comenzó en la década de 1980, impulsado por la subida de precios del oro y sequías, que obligaron a muchas personas a buscar alternativas a la agricultura. Reformas legales en 1997 y 2003 fomentaron el crecimiento de empresas privadas (*comptoirs*), que dominaron la comercialización y el procesamiento del oro. La introducción de la cianuración en la década de 2010 transformó la minería artesanal, desplazando parcialmente al mercurio. A partir de 2015, la caída de precios del oro y el acceso más amplio a la cianuración debilitaron el poder de los *comptoirs*, favoreciendo el surgimiento de plantas rudimentarias de cianuración en la mayoría de los sitios ligados a la minería artesanal y pequeña minería. En general estas plantas fueron

instaladas por patrocinadores locales y mineros experimentados que reinvertían parte de sus ganancias de sus trabajos anteriores (Verbrugge, 2021).

Dichas plantas rudimentarias por lo general consisten en campos cercados, donde se excavan estanques en el suelo, generalmente dispuestos en pares alrededor de un depósito central llamado “piscina”, el cual es considerablemente más pequeño. El fondo y los laterales de los estanques se encuentran revestidos con lonas o geomembranas, cuya impermeabilidad suele ser limitada. Los estanques presentan una ligera pendiente, la cual permite que la solución de oro-cianuro fluya hacia el estanque a través de una pequeña tubería. En la Figura 10 se puede apreciar una representación esquemática de lo que sería un estanque para lixiviación cianurada de minerales de oro (coloquialmente este tipo de estanque son conocidos como “ponedoras”). Esta forma de procesar los minerales suele incluir varios estanques cuya propiedad pertenece a diferentes personas, lo que da lugar a una operación compartida.

La lixiviación comienza con el secado del concentrado proveniente de concentrador gravimétrico. Cada estanque es capaz de recibir entre 4.500 kg y 6.000 kg de concentrado, a los cuales se les agrega entre 1 y 1,5 kg de NaCN, mezclado con 400 a 600 L de agua por estanque. Tras 24 horas, la solución de oro-cianuro es conducida hacía tuberías de PVC en forma de U, el proceso puede ser repetido si el mineral a tratar tiene un alto contenido de oro. (Kohio, 2024)

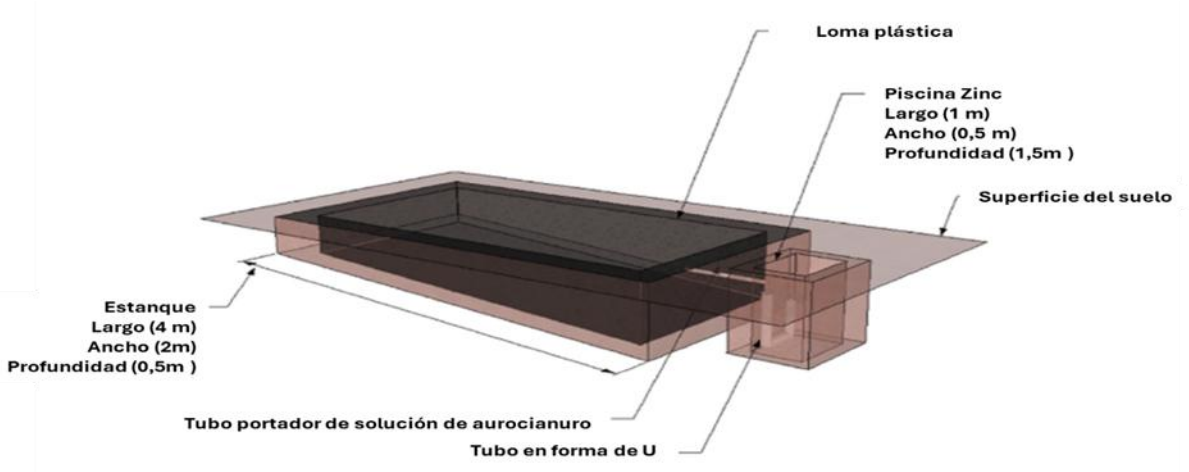


*Figura 10 Ilustración de estanque ponedor para lixiviación de oro. Fuente: (Kohio, 2024).*

Los mineros utilizan el método de cementación con zinc para recuperar el oro. Para ello llenan las tuberías con forma de U con virutas con zinc, por un periodo de tres días. Las virutas con el oro cementado son lavadas con una solución de ácido sulfúrico lo que permite liberar el oro y eliminar impurezas. Posteriormente, la solución se decanta y el precipitado resultante se somete

a calentamiento para obtener un polvo grisáceo rico en oro, el cual es enviado a fundición. La etapa fundición (o “cocina”, como le suelen llamar), se realiza al aire libre en estufas de carbón. Métodos alternativos de procesamiento posterior a la lixiviación, basados en carbón activado, han comenzado a aparecer recientemente (desde 2017–2018).

Si bien los impactos de la cianuración varían según los casos, surgen varios hallazgos transversales. Debido a las notables mejoras en las relaciones valor-volumen, la minería artesanal y pequeña minería ya no se limita a depósitos de fácil acceso y alta ley, sino que puede dirigirse a depósitos de oro más complejos y de menor ley. Además, la cianuración ha transformado relaves antes considerados sin valor en un recurso valioso. Tanto en Burkina Faso como en Ecuador, una amplia gama de actores se involucró en el comercio y procesamiento de relaves, lo que generó una cadena de valor que dinamiza la economía local.

## 8.3. Caso de Tanzania

Tanzania, es el cuarto mayor productor de oro de Africa, este metal constituye alrededor del 50% de las exportaciones del país y contribuye con alrededor de un 7% del PIB nacional. La minería artesanal y a pequeña escala emplea a más de un millón personas y es responsable de un 20 a 30% de la producción aurífera, la cual suele rondar entre las cinco y diez toneladas anuales.



*Figura 11 Torno de extracción manual. Fuente: (WGC, 2025).*

En este país, la creación de plantas de procesamiento para la minería artesanal y a pequeña escala ha representado un avance significativo para mejorar la gestión de la producción de oro. Estas plantas están operativas desde principios de la década de 2000, con iniciativas destacadas respaldadas por organizaciones como el Banco Mundial, que estableció varios Centros de Excelencia (CE) específicamente para el sector. Estos CE se centran en brindar asistencia técnica, capacitación y acceso a tecnologías de procesamiento eficientes.

A finales de 2024 comenzó a operar una planta de procesamiento libre de mercurio, legalmente registrada y con licencia de exportación. Para asegurar su viabilidad comercial, la planta consolidó una cadena de suministro de integración vertical, estableciendo acuerdos de riesgo compartido con minas ubicadas a menos de 5 km de distancia. Su modelo de abastecimiento opera bajo dos modalidades a cambio de servicios de desarrollo y operación: la apertura de nuevos pozos, donde la planta retiene el 80 % del mineral producido; y la modernización de pozos existentes, donde retiene entre el 54 % y el 64 % tras el pago de regalías.

A nivel operativo, la planta es capaz de procesar mineral a una tasa de 500 t/día manteniendo un factor de utilización de 89%. Todo el mineral entrante es monitoreado por el laboratorio certificado con el que cuenta la operación, registrando leyes de 3 g/t (en un rango de 1,5 a 20 g/t). Posteriormente el material es cargado por retroexcavadoras y transportado mediante camiones *dumper* hacia el alimentador. Este equipo regula el ingreso a las etapas de trituración primaria y secundaria, entre estas dos etapas se encuentra una criba vibratoria de doble piso. Posteriormente, el mineral fino es transportado a un molino de bolas y clasificado mediante ciclones. Finalmente, la pulpa resultante desciende por gravedad hacia tanques de lixiviación con cianuro y carbón activado (CIL/CIP), logrando una recuperación de un 90% para la recuperación del oro, el material descartado es enviado hacia la instalación de almacenamiento de relaves. Finalmente se obtiene un metal doré con una pureza que fluctúa entre el 85% y 95% (WGC, 2025).

Evidentemente, la realidad de la pequeña minería chilena difiere de los casos expuestos, principalmente debido a un marco normativo más exigente en materia de seguridad y medioambiente. De esta forma, la siguiente sección presenta una revisión de la legislación chilena que regula el uso del cianuro en la industria minera, abordando los distintos ámbitos que inciden en su manejo, almacenamiento, utilización y disposición final.

# 9. Principales normas asociadas al uso del cianuro en la industria minera

La regulación del uso de sustancias químicas en la industria minera se caracteriza por una compleja normativa que abarca desde disposiciones constitucionales y leyes de bases generales hasta reglamentos técnicos específicos. La existencia de estas múltiples normas implica que la gestión de insumos de esta naturaleza no se agota en un solo cuerpo legal, sino que se distribuye en rangos legales que van desde decretos supremos de seguridad minera y salud ambiental, hasta normas de emisión y transporte. En este escenario, el uso de cianuro se regula mediante una normativa especial que lo clasifica por su toxicidad y reactividad y que establece, además, protocolos estrictos que deben armonizarse con las disposiciones generales de residuos peligrosos para garantizar un control integral durante todo su ciclo de vida

La utilización del cianuro como agente de lixiviación en minerales de distinta naturaleza y especialmente en minerales auríferos, exige que todo el proceso se desarrolle dentro de su marco regulatorio, orientado a resguardar la salud de las personas, la protección del medio ambiente y la seguridad operativa. Al respecto, existe una dispersión normativa que regula el proceso de cianuración en diferentes aspectos, como el manejo de los residuos que se generan en su proceso, los que son considerados, además, residuos peligrosos. Cabe precisar que las preceptivas que mencionan al cianuro, no distinguen entre los diferentes estamentos mineros, pues su finalidad es resguardar que su utilización no genere riesgos para las personas ni para el medioambiente.

El objeto del presente instrumento **no pretende abordar la totalidad de la normativa aplicable al cianuro, sino más bien, dar una** guía **orientadora** de las normas más relevantes que inciden en el manejo y disposición de este en tanto sustancia y residuo peligroso, en materia de seguridad y salud de las personas, en normas de calidad y emisión, así como en la normativa internacional aplicable.

**De esta forma, la información de esta sección no debe ser interpretada como una recomendación o directriz para las empresas del sector. Por lo tanto, la aplicación de las normas contenidas en este documento, así como otras no consideradas en este, deben ser aplicadas, interpretadas y articuladas, atendiendo a la situación particular de las empresas mineras y productores mineros.**

## 9.1. Normas relacionadas con el manejo y almacenamiento de Sustancias y Residuos Peligrosos

El manejo de sustancias y residuos peligrosos asociados a procesos de cianuración en Chile se rige por un marco normativo compuesto por disposiciones ambientales y sanitarias de carácter general y especial, que establecen obligaciones de evaluación ambiental, autorización, control y gestión de residuos, incluyendo reglas específicas para aquellos calificados como peligrosos, como los que contienen cianuro, que tienen normas generales y especiales relacionadas con el manejo del cianuro en cuanto sustancia y residuo peligroso; las principales se detallan a continuación.

### 9.1.1. Normas Generales

#### *a.* Ley N°19.300 sobre "*Bases Generales del Medio Ambiente*"

En el contexto medioambiental, las operaciones de cianuración y sus procesos deben llevarse a cabo con apego a las disposiciones del marco general de protección ambiental establecido en la Ley N°19.300[9] sobre Bases Generales del Medio Ambiente. En relación con los generadores de residuos, establece la obligación de que sus proyectos sean sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, ya sea mediante una DIA (art. 10 letra i), o un EIA **(art.11 letra a).** El **art. 10 literal i**, se refiere a proyectos de desarrollo minero incluidos la disposición de residuos. Por su parte, el art 3 letra i.3 del Reglamento del SEA, detalla qué se entiende por proyectos de disposición de residuos y estériles.

#### b. DFL N°725/1968, que establece el Código Sanitario

El Código Sanitario en lo relativo a residuos establece una serie de facultades, entre ellas, el art.71, el cual señala que *"Corresponde al Servicio Nacional de Salud aprobar proyectos relativos a la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra pública o particular destinada a (…):*

*b) la evaluación, tratamiento y disposición final de desagües, aguas servidas de cualquier naturaleza y* ***residuos industriales o mineros****.*[10]

[9] Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, Diario Oficial, 9 de marzo de 1994.
[10] Decreto con Fuerza de Ley N°725 del Ministerio de Salud Pública, el cual aprueba el Código Sanitario, Diario Oficial, 31 de enero de 1968.

Por su parte, el art. 72 del mismo cuerpo normativo, señala que el *Servicio Nacional de Salud ejercerá la vigilancia sanitaria sobre (…) las plantas depuradoras de aguas servidas y de* ***residuos industriales o mineros*** *(…).*

**c. DFL N°1/1990, que "*Determina Materias que Requieren Autorización Sanitaria Expresa*"**

Establece un listado de seis actividades que requieren autorización sanitaria expresa, las que no podrán iniciar su funcionamiento mientras no la obtengan: dentro de ellas el N°22 señala el *funcionamiento de obras destinadas (…) a la evacuación, tratamiento o disposición final de desagües, aguas servidas de cualquier naturaleza y* ***residuos industriales o mineros****.*

**d. Ley N°20.920 que "*Establece el Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje*"**

Señala en su artículo 2°, literal i), que el generador de un residuo es responsable de éste, desde su generación hasta su valorización o eliminación en conformidad a la ley[11].

**e. Decreto N°1/2013, que *"Aprueba Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, RETC"* (modificado por el Decreto N°31/2018)**

Los establecimientos que generen anualmente más de 12 toneladas de residuos no sometidos a reglamentos específicos estarán obligados a declarar sus residuos generados en años anteriores de conformidad con lo establecido en el artículo 25[12] del citado decreto.

La obligación de reportar e informar a la autoridad respecto de residuos se realiza a través de la plataforma Ventanilla Única del RETC.

### 9.1.2. Algunas normas especiales sobre manejo y almacenamiento de residuos y sustancias peligrosas

Sin perjuicio de las normas generales existentes sobre la materia, en nuestro ordenamiento jurídico existen una serie de normas de carácter especial que establecen las obligaciones para

[11] Ley 20.920, "Establece el Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje", Diario Oficial, 1 de junio de 2016.
[12] Decreto N°1 del Ministerio del Medio Ambiente, el cual aprueba el Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes, RETC, Diario Oficial, 2 de mayo de 2013.

la industria minera, respecto al manejo y almacenamiento de residuos y sustancias peligrosas. Es imperativo destacar que el cumplimiento de estas disposiciones es obligatorio para todos los estamentos de la industria, siendo exigibles de manera transversal a la pequeña, mediana y gran minería, independientemente de su escala de operación o estructura organizativa. Entre tales normas, encontramos las siguientes:

### a. Decreto Supremo N°148/2004, que "*Aprueba Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos*"

En él se establecen las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reúso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

El art. 3° del citado decreto, define como residuo peligroso al "*residuo o mezcla de residuos que presentan riesgos para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente, ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar algunas de las características señaladas en el art 11*".

El art.11 por su parte, incluye la toxicidad aguda dentro de sus criterios para determinar la peligrosidad, bajo el cual se clasifican tanto los residuos que contienen cianuro como aquellos asociados a la presencia o generación de ácido cianhídrico (HCN).

Por otro lado, el art. 18 contiene el listado de Residuos Peligrosos, en la Lista I *"Categorías de residuos consistentes o resultantes de los siguientes procesos (…) I.7 Residuos que contengan* ***cianuros****, resultantes del tratamiento térmico y de las operaciones de temple"*[13].

- **Obligaciones del Generador de Residuos Peligrosos**

Adicionalmente, el art. 25 del decreto citado en el punto anterior, señala que toda instalación, establecimiento o actividad que anualmente de origen a más de 12 kilógramos de residuos tóxicos agudos o más de 12 toneladas de residuos peligrosos que presenten cualquier característica de peligrosidad, deberá presentar un Plan de Manejo de Residuos Peligrosos (RESPEL) ante la Autoridad Sanitaria. El plan deberá ser diseñado por un profesional e incluirá todos los procedimientos técnicos y administrativos necesarios para lograr que el manejo interno y la eliminación de residuos se haga con el menor riesgo posible. En este contexto, los residuos

[13] Decreto Supremo N°148 del Ministerio de Salud, que aprueba Reglamento Sanitario Sobre Manero de Residuos Peligrosos, Diario Oficial, 16 de junio de 2004.

generados a partir de los procesos en que se utiliza **cianuro** son categorizados como Residuos Peligrosos.

Incluso los generadores de residuos peligrosos que no estén obligados a sujetarse a un Plan de Manejo de RESPEL, deberán en todo caso cumplir con la obligación de realizar la eliminación de sus residuos peligrosos en instalaciones de eliminación que cuenten con la debida autorización sanitaria que comprenda tales residuos, de conformidad con lo dispuesto en el art. 27 del reglamento en comento.

**b. Decreto Supremo N°43/2015, que "*Aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas*"**

Dado que el **cianuro** es una sustancia peligrosa que se presenta en forma sólida, como soluciones de **cianuro de sodio o potasio**, o en forma gaseosa como **cianuro de hidrógeno**, de acuerdo con el decreto, que regula las condiciones de seguridad aplicables a las instalaciones de almacenamiento de sustancias peligrosas. Este material debe almacenarse separado de ácidos, oxidantes, combustibles, lubricantes, productos alimenticios y agua.

## 9.2. Algunas normas en materia de Seguridad y Salud de los Trabajadores

### 9.2.1. Normas Generales

**a. Decreto N°44/2024, que "*Aprueba Nuevo Reglamento sobre Gestión Preventiva de los Riesgos Laborales para un Entorno de Trabajo Seguro y Saludable*"**

El artículo 4 de este decreto, obliga al empleador a implementar medidas preventivas, planes de capacitación y matrices de identificación y evaluación de riesgos asociados a la manipulación de sustancias químicas. Asimismo, exige la implementación de programas de capacitación periódica, métodos de trabajo seguro y señalética. Además, el art. 5, establece la obligación de los trabajadores de participar en actividades preventivas de riesgos laborales, dar cumplimiento

a las instrucciones, reglamentos y demás medidas de seguridad y salud establecidas, entre otras obligaciones[14] .

### 9.2.2. Norma Especial

#### a. Decreto N°132/2004, que "*Aprueba Reglamento de Seguridad Minera*"

En su Título "VII Procesamiento de Sustancias Minerales", el artículo 323, establece que en las faenas mineras donde se utilice **cianuro**, se mantendrá un antídoto y las instrucciones para su uso, ubicados en un lugar accesible a todo trabajador y disponibles para su inmediata aplicación[15].

Para otorgar mayor seguridad en el uso del antídoto, se exige también la instalación de indicaciones claras en el lugar e inmediaciones, señalizando su ubicación y su objetivo. Adicionalmente, la citada disposición establece que el personal que trabaje expuesto a **soluciones de cianuro o posibles emanaciones de ellas -ácido cianhídrico (HCN)-** deberá contar con elementos de protección personal adecuados al peligro que entraña la operación y deberá ser instruido en las limitaciones de éstos.

## 9.3. Norma especial relacionadas con Infraestructura Minera

#### a. Ley N°20.551 que "*Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras*"

Su artículo 2° establece la obligación de asegurar la estabilidad física y química de los depósitos y obras mineras una vez finalizada su operación, buscando evitar reacciones que generen acidez o contaminación por contacto entre residuos y agua. La **estabilidad química** es definida en el artículo 3 literal h), en los siguientes términos: "*h) Estabilidad Química: Situación de control en agua, en aire y en suelo de las características químicas que presentan los materiales contenidos en las obras o depósitos de una faena minera, cuyo fin es evitar, prevenir o eliminar, si fuere necesario, la reacción química que causa acidez, evitando el contacto del agua con los residuos*

[14] Decreto Supremo N°44 del Ministerio del Trabajo y Previsión Social, que aprueba Nuevo Reglamento sobre Gestión Preventiva de los Riesgos Laborales para un entorno de trabajo seguro y saludable, Diario Oficial, 27 de julio de 2024.
[15] Decreto Supremo N°132 del Ministerio de Minería, que aprueba Reglamento de Seguridad Minera, Diario Oficial, 7 de febrero de 2004.

*generadores de ácidos que se encuentren en obras y depósitos masivos mineros, tales como depósitos de relaves, botaderos, depósitos de estériles y ripios de lixiviación*".

A su vez, el artículo 16 señala que aquellas faenas mineras que tengan una capacidad de extracción hasta 5.000 t/mes y que cuenten con una o más plantas de producción, depósitos de relave o ripios de lixiviación deberá declarar medidas y acciones para el manejo de **residuos o desechos peligrosos** en su plan de cierre[16].

## 9.4. Normas de Emisión

Se debe considerar las normas primarias y secundarias de calidad ambiental, definidas en el art. 2 letra o de la Ley N°19.300 y reguladas en el artículo 40 de la misma preceptiva y el Decreto 6 que establece reglamento para la dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión. Estas disposiciones obligan a que cualquier proyecto que genere riesgos para la población o el medioambiente, incorpore medidas de prevención, control y monitoreo, incluyendo el manejo de sustancias peligrosas como el **cianuro**.

### a. Decreto Supremo N°46/2003, que "*Establece Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas*"

A través de sus artículos 10 y 11, regula las descargas hacia aguas subterráneas (acuíferos), estableciendo límites estrictos para la concentración de cianuro (0,2 mg/L en Condiciones de Vulnerabilidad Media y 0,20 mg/L en Condiciones de Vulnerabilidad Baja respectivamente), así como para metales pesados y sales. Si bien la normativa no aplica directamente a depósitos de relaves, conforme a lo dispuesto en su artículo 2, es especialmente relevante ya que define valores de referencia explícitos para la concentración de cianuro y establece los criterios técnicos para el muestreo y análisis de las aguas[17] .

[16] Ley N°20.551, que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, Diario Oficial, 11 de noviembre de 2011.
[17] Decreto Supremo N°46 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, el cual establece Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, Diario Oficial, 17 de enero 2003.

## 9.5. Normas internacionales aplicables en materia de cianuro y residuos peligrosos

El "Código Internacional para el Manejo del Cianuro para la Fabricación, el Transporte y la Utilización del Cianuro en la Producción de Oro", 2002 (Código Internacional para el Manejo del Cianuro), es un programa voluntario de certificación basado en el desempeño de las mejores prácticas para el manejo del cianuro en la minería. Este instrumento constituye el estándar técnico más reconocido para la producción, transporte, almacenamiento y uso del **cianuro** en minería del oro y la plata. Establece requisitos de gestión para proteger la salud de los trabajadores, prevenir derrames, asegurar sistemas de tratamiento y entrega un marco de auditoría verificable que puede ser adoptado por pequeños productores en forma proporcional. Su integración mejora los estándares internos de operación y fortalece la trazabilidad del reactivo (Instituto Internacional de Gestión del Cianuro, 2002).

De forma complementaria al citado código, es relevante considerar los compromisos internacionales asumidos por Chile, en particular el **Convenio de Basilea**, que fiscaliza el control de los movimientos transfronterizos y la eliminación de desechos peligrosos incluidos aquellos con **cianuro**, y el **Convenio de Minamata**, que establece medidas para reducir y eliminar el uso de mercurio en la minería aurífera, promoviendo indirectamente alternativas como la cianuración bajo condiciones controladas.

En definitiva, la gestión del cianuro en la industria minera nacional se articula en un entramado regulatorio robusto pero disperso, que transita desde bases generales de protección ambiental y sanitaria hasta disposiciones técnicas de alta especificidad, las que son aplicables a todas las empresas mineras, sean de pequeño, mediano o gran tamaño. A su vez, la convergencia de normas sobre el manejo de residuos peligrosos, seguridad laboral y estabilidad química en el cierre de faenas exige una ejecución rigurosa de los protocolos internos en las empresas. Al integrar estas exigencias legales con estándares internacionales, como el Código Internacional para el Manejo del Cianuro, el Convenio de Basilea y el Convenio de Minamata, la actividad minera no solo asegura el cumplimiento normativo y la mitigación de riesgos para la salud y medio ambiente, sino que también avanza hacia una gestión de activos más responsable y alineada con los desafíos de la sostenibilidad global.

# 10. Remediación de residuos sólidos

En el contexto de las exigencias normativas para el manejo de residuos peligrosos, resulta fundamental incorporar estrategias que permitan controlar y reducir la presencia de cianuro en los residuos generados, teniendo diversos métodos para mitigar la presencia de cianuro libre en residuos sólidos, cuya selección depende principalmente de su concentración y de las características del material tratado. La presente sección se centra en la revisión de métodos biológicos y químicos aplicables a la remediación de sólidos contaminados. (Cosmos Anning, 2019).

## 10.1. Métodos biológicos

El uso de métodos biológicos para degradar el cianuro libre y los complejos de cianuro se informó por primera vez en la década de 1980. Hay una gran cantidad de microorganismos, hongos y especies vegetales que tienen la capacidad de resistir la toxicidad del cianuro, mientras que otras tienen el potencial de degradar el cianuro presente en una matriz de residuos. La ruta de biodegradación utilizada va a depender de factores externos como el oxígeno, el pH y la concentración de cianuro.

Se ha evidenciado que hongos como *Fusarium solani* y *Fusarium oxysporum* degradaron el 50% de complejos metalocianuros en cinco días. Mientras que la bacteria *Escherichia coli BCN6* ha sido utilizada para transformar 50 mg/L de cianuro presente en efluentes de minería de oro en amoníaco, menos tóxico para el medio ambiente.

El uso de bacterias para degradar residuos con cianuro es más económico y medioambientalmente seguro en comparación con los métodos químicos. Además, estos métodos pueden desarrollarse sin necesidad de electricidad ni reactivos. Por estas razones, suelen preferirse frente a procedimientos químicos o naturales. Sin embargo, presentan limitaciones, como la necesidad de temperaturas óptimas (mayores a 10 °C), grandes superficies de contacto y tiempos más largos para completar la degradación.

## 10.2.Métodos químicos

La mitigación de la concentración de cianuro a través de métodos químicos implica convertir el cianuro en compuestos de baja peligrosidad mediante una reacción de oxidación. El proceso de clorinación alcalina puede reducir la concentración de cianuro hasta los límites más bajos aceptados, sin embargo, el consumo elevado de reactivos aumenta los costos operacionales, lo que ha desincentivado su aplicación. La reacción de destrucción del cianuro consta de dos etapas:

(i) Conversión del cianuro en cloruro de cianógeno (CNCl)
(ii) Hidrolisis del CNCl a cianato ($OCN^-$)

$$CN^- + Cl_2 \rightarrow CNCl + Cl^- \quad (4)$$

$$CNCl + H_2O \rightarrow OCN^- + 2H^+ + Cl^- \quad (5)$$

En condiciones alcalinas, el cianato puede hidrolizarse para producir amoníaco:

$$OCN^- + 3\,H_2O \rightarrow NH_4^+ + HCO_3^- + OH^- \quad (6)$$

La efectividad del método se logra cuando el amoníaco formado es completamente eliminado al agregar suficiente cloro hasta alcanzar el “punto de ruptura” (*breakpoint*), momento en que el amoníaco se oxida convirtiéndose en gas nitrógeno inerte.

El peróxido de hidrogeno es utilizado para oxidar cianuro libre y complejos débiles de cianuro en una reacción de un solo paso, obteniendo como producto cianato. Un ejemplo de oxidación de complejos cianurados débiles se puede apreciar en la ecuación 8.

$$CN^- + H_2O_2 \rightarrow OCN^- + H_2O \quad (7)$$

$$2\,Cu(CN)_3^{2-} + 7\,H_2O_2 + 2\,OH^- \rightarrow 6\,OCN^- + 2\,Cu(OH)_2 + 6\,H_2O \quad (8)$$

Se ha investigado la eliminación de cianuro de aguas residuales de minas de oro mediante **peróxido de hidrógeno** e hipoclorito de calcio ($Ca(OCl)_2$). A un pH de 8, en un tiempo de contacto de 1 h, se eliminó un 45,7 % peso/volumen de cianuro de las aguas residuales de la mina. Se concluyo que la combinación de $H_2O_2$ y $Ca(OCl)_2$ con variaciones de concentración de 5:5 puede reducir eficazmente las concentraciones de cianuro a un límite aceptable (50 mg/L).

# 11. Conclusiones

La cianuración se presenta como una alternativa técnica y económicamente viable para mejorar la recuperación de oro en la pequeña minería aurífera chilena, siempre que su implementación se realice bajo condiciones adecuadas de manejo ambiental, seguridad operacional y control del proceso. A lo largo de este trabajo, se ha mostrado que la minería aurífera de pequeña escala cumple un rol relevante en la economía local y en la generación de empleo en zonas rurales, pero enfrenta limitaciones estructurales asociadas a la falta de tecnologías apropiadas, infraestructura adecuada y acceso a procesos de mayor valor agregado. Estos factores han limitado su competitividad, especialmente en un contexto marcado por los compromisos derivados del Convenio de Minamata, que ha impulsado la reducción progresiva del uso de mercurio en el procesamiento de minerales auríferos.

Desde un punto de vista técnico, la revisión de los fundamentos químicos y operacionales permite sostener que la cianuración es un proceso maduro, eficiente y ampliamente utilizado en la industria minera mundial, con capacidad para alcanzar altas recuperaciones de oro, incluso en menas de baja ley. Si bien su uso requiere resguardos específicos, la operación bajo condiciones alcalinas controladas, el empleo de reactivos adecuados, la incorporación de tecnologías de recuperación y destrucción de cianuro, junto con protocolos de seguridad y monitoreo, permiten gestionar sus riesgos asociados. En este sentido, el manejo del cianuro no constituye una barrera técnica insalvable, sino una condición que debe ser abordada mediante estándares adecuados de diseño, operación, capacitación y control.

El análisis comparativo de agentes lixiviantes alternativos muestra que, aunque existen opciones como el tiosulfato o la tiourea, estas presentan actualmente mayores costos operacionales, menor estabilidad química o un menor grado de desarrollo industrial, lo que limita su aplicación inmediata en operaciones de pequeña escala. Esto refuerza el rol de la cianuración como una alternativa eficiente y disponible para este segmento de la minería, particularmente en un contexto de reducción progresiva del uso de mercurio en el procesamiento de minerales auríferos.

Por otra parte, la revisión de experiencias internacionales en países como Ecuador, Burkina Faso y Tanzania muestra que la adopción de esquemas de cianuración adaptados a contextos de pequeña minería ha permitido recuperar valor desde relaves y minerales de baja ley, mejorar la

eficiencia del proceso productivo y generar impactos económicos positivos a nivel local. Los casos descritos ofrecen aprendizajes relevantes para Chile, siempre que su eventual adaptación considere las condiciones técnicas, institucionales y regulatorias propias del país, así como criterios adecuados de seguridad, capacitación y fiscalización.

Y el marco normativo chileno constituye un elemento relevante para orientar una eventual implementación segura y responsable de esta tecnología. La existencia de regulaciones en materia de seguridad y salud ocupacional, protección medioambiental, evaluación de impactos, gestión de residuos, cierre de faenas y control de emisiones establece condiciones que permiten ordenar el diseño, operación y fiscalización de este tipo de procesos. Más que constituir una barrera, la normativa aplicable define estándares que permiten prevenir riesgos, fortalecer la trazabilidad del proceso y resguardar tanto a las personas como al entorno.

Bajo estas condiciones, la instalación de plantas de cianuración vinculadas comercialmente a ENAMI, o a otras empresas privadas, podrían constituir una medida estratégica para fortalecer la pequeña minería aurífera chilena, al ofrecer una alternativa de procesamiento más eficiente para minerales que hoy enfrentan limitaciones técnicas o económicas bajo los esquemas tradicionales. Con ello, sería posible reducir pérdidas asociadas al no aprovechamiento oportuno del mineral, incrementar la competitividad del sector y potenciar su contribución al desarrollo regional.

En conclusión, la implementación de la cianuración como proceso metalúrgico para la pequeña minería del oro puede constituir una herramienta relevante de política pública para mejorar la recuperación de minerales auríferos, fortalecer la viabilidad económica del sector y apoyar el desarrollo de las localidades donde esta actividad se realiza. Su aplicación requiere condiciones adecuadas de diseño, operación, capacitación, financiamiento y fiscalización, en coherencia con la normativa aplicable y con los compromisos internacionales asumidos por el país. Bajo ese enfoque, la cianuración puede contribuir a transitar hacia un modelo productivo más seguro, eficiente y competitivo, fortaleciendo la inserción de la pequeña minería en una minería moderna y responsable en el país.

# 12. Referencias


Cochilco. (2025 ). *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2005-2024.* Santiago.

Cosmos Anning, J. W. (2019). Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: A review. *Waste Management & Research*, 1-10.

Domic Mihovilovic, E. (2001). *Hidrometalurgia : fundamentos, procesos y aplicaciones.*

Instituto Internacional de Gestión del Cianuro. (2002). *Código internacional para el Manejo del Cianuro para la Fabricación, el Transporte y el Uso del Cianuro en la mProducción de Oro.* Washington DC: International yanide Management Institute.

Kohio, K. S. (2024). Review of pollution trends and impacts in artisanal and small-scale gold mining in Sub-Saharan Africa Advancing towards sustainable practices through equitable redistribution of gold spin-offs . *Clear Production*.

Larrabure. G, R.-R. J. (2021). A review on the negative impact of different elements during cyanidation of gold and silver from refractory ores and strategies to optimize the leaching process. *Minerals Engineering*.

Liu, Z. G. (2022). A systematic review of gold extraction: Fundamentals, advancements, and challenges toward alternative lixiviants. *Hazardous Materials, 440*.

Marsden, J. &. (2006). *The Chemistry of gold extraction* (2 ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Meller, P. &. (2021). *La Empresa Nacional de Minería (ENAMI) de Chile: modelo y buenas prácticas para promover la sostenibilidad de la minería pequeña y artesanal en la región andina.* Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Ministerio de Medio Ambiente. (2021). *Primer reporte nacional completo del Convenio de Minamata sobre el Mercurio.* Santiago.

ONU. (2013). *Convenio de Minamata sobre el Mercurio.*

ONU. (2019). *Global Mercury Assessment 2018.*

Parga, J. W. (1988). Zinc -dust cementation of silver from alkaline cyanide solutions - analysis of Merrill-Crowe plant data. *Mining, Metallurgy & Explorations, 5*, 170-176.

Plessis. C.A, L. H. (2021). Lime use in gold processing – A review. *Minerals Engineering*.

Ramírez, A. (2010). Toxicidad del cianuro: Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre. *Scielo*.

Richmond K. Asamoah, M. Z.-M. (2019). Refractory gold ores and concentrates part 1: mineralogical and physico-chemical characteristics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* .

Sociedad Nacional de Minería F.G. (Febrero de 2025). *Sociedad Nacional de Minería F.G.* Obtenido de https://www.sonami.cl/

SONAMI. (2024). Obtenido de https://www.sonami.cl/v2/n1386-diciembre-de-2024/

SONAMI. (2025). *Sociedad Nacional de Minería F.G.* Recuperado el 2025

Veiga. M, C. P. (2014). Processing centres in artisanal gold mining. *Cleaner Production*, 535-544.

Verbrugge, B. L. (2021). The cyanide revolution: Efficiency gains and exclusion in artisanal - and small-scale gold mining. *Geoforum, 126*, 267-276.

WGC. (2025). *The Role of Gold Processing Plants in Artisanal and Small - Scale Mining.* Levin Sources.

Trabajo elaborado por la Sociedad Nacional de Minería F.G.

Francisco Carvajal
Analista Químico

Reinaldo Salazar
Gerente de Estudios

Rubén Varas
Gerente Pequeña Minería

Ivonne Schencke
Gerente Legal y de Compliance

Carlos Gajardo
Gerente de Medio Ambiente

Vicente Cancino
Analista Pequeña Minería

Francisca Sepúlveda
Especialista en Sustentabilidad

Ignacio Maureira
Abogado

Edición contenido
Cristián Villela
Gerente de Relaciones Corporativas y Comunicaciones

# Anexo

## Convenio de Minamata

Tratado internacional adoptado en 2013, cuyo objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas (generadas por el ser humano) de mercurio, en él se recogen diversas medidas para cumplir dicho objetivo. Dentro de estas medidas destacan, el control del suministro y el comercio del mercurio, por lo cual se imponen limitaciones a determinadas fuentes de mercurio, como la extracción primeria del mineral. Además, se controlan los productos con mercurio añadido y los procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio, y se fiscaliza la extracción de oro artesanal y en pequeña escala.

Toda referencia al mercurio incluye, mezclas con otras sustancias, aleaciones de mercurio que tengan una concentración de **al menos 95% en peso** de mercurio. A su vez, se entiende como **compuestos de mercurio,** al cloruro de mercurio o calomelanos, óxido de mercurio, sulfato de mercurio, nitrato de mercurio, mineral cinabrio y sulfuro de mercurio.

Es importante destacar que cada Parte (país) debe notificar a la secretaría si, en cualquier momento, determina que las actividades de extracción y tratamiento de oro artesanal y a pequeña escala en su territorio son **más que insignificantes**. En tal caso, deberá elaborar y aplicar un plan de acción nacional de conformidad con el anexo C del convenio. Dicho plan deberá presentarse ante la secretaría a más tardar **tres años** después de la entrada en vigor del acuerdo para esa Parte, o tres años después de haber notificado a la secretaría.

Cada emisión y liberación de mercurio es recogida en un artículo aparte dentro del convenio, buscando reducir los niveles del metal de manera flexible, teniendo presente los planes de desarrollo cada país.

Los artículos que tienen una mayor vinculación con la minería son:

- Artículo 3: disposiciones relativas al comercio, suministro y compuestos de mercurio.
- Artículo 7: disposiciones aplicables a la minería artesanal y pequeña minería del oro.
- Artículo 11: gestión de desechos contaminados con mercurio.

Más información del convenio en www.minamataconvention.org.




SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERIA