

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Tratamiento de efluentes de la industria minera mediante tecnología de membrana. Aplicación a Chile y Ecuador

Autor: Jesús Montes Sánchez

Tutores: Lourdes García Rodríguez

David Sánchez Martínez

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Tratamiento de efluentes de la industria minera mediante tecnología de membrana. Aplicación a Chile y Ecuador

Autor:

Jesús Montes Sánchez

Tutores:

Lourdes García Rodríguez
Catedrática de Universidad

David Sánchez Martínez
Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Máster: Tratamiento de efluentes de la industria minera mediante tecnología de membrana.
Aplicación a Chile y Ecuador

Autor: Jesús Montes Sánchez

Tutores: Lourdes García Rodríguez
David Sánchez Martínez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A todo el que puso piedras en mi camino
A todo el que me ayudó a salvarlas
A mis padres, hermanos y amigos
Al tiempo y a mí mismo*

Sudamérica tiene un alto nivel de importancia en cuanto a la producción global de recursos naturales, en general, y de minerales metálicos en particular. Concretamente, Chile representa la mayor parte de las importaciones europeas de productos acabados de cobre desde el año 2012. Asimismo, Ecuador está emergiendo como un foco de inversión minera en Latinoamérica, impulsado por la combinación de un marco regulatorio favorable y unas extensas reservas de oro y cobre.

Sin embargo, el sector minero sudamericano está ligado a una serie de retos, tales como la escasez de agua, la contaminación de los acuíferos y los riesgos sanitarios asociados. Por ello, este estudio se ha llevado a cabo con el objetivo de caracterizar los problemas que representa la minería en estos países para el recurso hídrico y analizar una posible solución que ayude a mitigar los mismos y la tecnología empleada para dicho fin.

En lo referente a contaminación, en el presente trabajo se han recopilado los datos de composición del agua minera analizados en numerosas publicaciones científicas, de entre las cuales algunas estudian casos de Chile y Ecuador. Y si se comparan dichos valores con los límites que marcan la normativa de dichos países se puede observar como en varios casos son superados, algunos ampliamente. El resultado no es más que la contaminación por sólidos, tanto suspendidos como disueltos, y metales como el cobre, el hierro o el mercurio.

Por último, dado que la composición del agua salobre se muestra semejante a la de las aguas mineras analizadas aquí, se estudia la tecnología de ósmosis inversa (*RO*, *Reverse Osmosis* en inglés) para su tratamiento. En primer lugar, se explica el cálculo energético y después se realizan cálculos de la permeabilidad de los elementos de membrana, todo esto apoyado con los reportes del software de simulación Q+ de LG Chem Water Solutions. El primero refleja un comportamiento lineal del consumo frente a la presión osmótica del concentrado. El segundo sirve para obtener una primera estimación de la calidad del producto, el número de elementos de membrana necesarios y posibles configuraciones válidas.

Abstract

South America has a high level of importance in terms of the global production of natural resources, in general, and of metallic minerals, in particular. Specifically, the Republic of Chile represents the major amount of European imports of final copper products since 2012. Likewise, the Republic of Ecuador is emerging as a focus of mining investment in Latin America, driven by the combination of a favorable regulatory framework and vast gold and copper reserves.

Nevertheless, the South American mining sector is linked to a series of challenges, such as water scarcity, pollution of aquifers and associated sanitary risks. Therefore, this study has been carried out with the aim of characterizing the issues that mining industry represents in these countries for water resources and to analyze a possible solution that would help mitigate them as well as the technology involved for that purpose.

Regarding contamination, this study compiles the composition data of mining water analyzed in numerous papers, among which some research cases from Chile and Ecuador. Comparing these values with the limits set by the regulations of these countries, it can be observed repeatedly how they are exceeded, some of them widely. The consequences are nothing but contamination by solids, both suspended and dissolved, and by such as toxic metals as copper, iron or mercury.

To conclude, since brackish water could be considered similar in terms of composition to the mining water compiled, treatment by reverse osmosis (RO) technology is studied herein. First, the energy consumption calculation is explained and then it is followed by a calculation of the permeability of the filtration membrane elements. The former reflects a linear behavior of the specific energy consumption (SEC) against the osmotic pressure of the concentrate. The latter can be used to obtain an initial estimation of the quality of the product, the amount of required membrane elements and some possible valid configurations. The aforementioned calculation is supported by the data reports from a simulation software developed by LG Chem Water Solutions.

Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Objetivos, Alcance y Metodología	1
1.1 <i>Justificación del Proyecto</i>	1
1.2 <i>Alcance</i>	4
1.3 <i>Métodos de estudio</i>	5
2 El Sector Minero en Chile y Ecuador	6
2.1 <i>La Minería en Chile</i>	7
2.1.1 <i>La minería de pequeña escala en Chile</i>	7
2.1.2 <i>La minería de mediana escala en Chile</i>	10
2.1.3 <i>La gran minería en Chile</i>	11
2.1.4 <i>Uso de recursos del sector minero en Chile: el agua</i>	14
2.1.5 <i>Uso de recursos del sector minero en Chile: la energía</i>	20
2.2 <i>La Minería en Ecuador</i>	22
2.2.1 <i>Evolución de la minería en Ecuador y controversia actual</i>	22
2.2.2 <i>Proyectos actuales en la minería de Ecuador</i>	25
2.2.3 <i>Datos económicos de la minería de Ecuador</i>	26
3 El Agua en los Procesos Mineros	28
3.1 <i>Proceso minero: consumo y contaminación</i>	28
3.2 <i>Relaves</i>	29
3.3 <i>Ejemplos de efluentes mineros por composición</i>	30
3.4 <i>Requerimientos de calidad del agua</i>	41
4 Introducción al Cálculo Energético de un Sistema RO	45
4.1 <i>Propiedades del agua a tratar</i>	45
4.2 <i>Cálculo de los parámetros de operación del sistema de ósmosis inversa (RO)</i>	47
5 Empleo de Software para Sistemas RO	51
5.1 <i>Simulación de sistemas RO</i>	51
5.2 <i>Cálculo de la permeabilidad de una membrana</i>	55
5.3 <i>Cálculo del consumo específico (SEC)</i>	58
6 Conclusiones	60
Referencias	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Consumo de agua por sector y país	6
Tabla 2-2 Proyectos de mediana minería para 2017-2026 en Chile	11
Tabla 2-3 Instalaciones desaladoras construidas y proyectadas en Chile, 2016	16
Tabla 2-4 Situación de los proyectos mineros estratégicos de Ecuador, 2018	26
Tabla 2-5 Situación de los proyectos mineros de segunda generación de Ecuador, 2018	26
Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros	31
Tabla 3-2 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en Chile	42
Tabla 3-3 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en Chile	43
Tabla 3-4 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en Ecuador	44
Tabla 4-1 Correlaciones de las propiedades termodinámicas de las disoluciones de sales marinas en los rangos aplicables a los procesos de desalación	45
Tabla 5-1 Especificaciones del fabricante para las membranas LG BW	54
Tabla 5-2 Sumario de casos simulados en Q+ y principales resultados del sistema	56
Tabla 5-3 Sumario de casos simulados en Q+ y principales resultados relacionados con la primera membrana de la primera etapa	57
Tabla 5-4 Sumario de casos simulados en Q+ para el cálculo del SEC	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Fuentes de agua dulce en Sudamérica	2
Figura 1-2 Mapa de conflictos socioambientales de explotación minera	3
Figura 2-1 Mapa de explotaciones mineras en Chile	7
Figura 2-2 Producción histórica de cobre en Chile, en miles de toneladas	12
Figura 2-3 Producción de la minería metálica en Chile por metal	12
Figura 2-4 Producción global de la minería de cobre por país	13
Figura 2-5 Participación en la producción global de la minería de cobre por país en el año 2018	13
Figura 2-6 Participación en el PIB por sectores en Chile en el año 2018	13
Figura 2-7 Valor de las exportaciones por metal realizadas por el sector minero chileno	14
Figura 2-8 Participación del sector minero en las exportaciones chilenas	14
Figura 2-9 Uso consuntivo de aguas en Chile	15
Figura 2-10 Mapa de las instalaciones desaladoras en Chile a fecha de 2016	15
Figura 2-11 Extracción de agua para la minería de cobre chilena según fuente	17
Figura 2-12 Reparto del agua marina extraída para la minería cuprífera chilena	17
Figura 2-13 Consumo de agua en la minería de cobre chilena por proceso	18
Figura 2-14 Consumo de agua (continental) por unidad de cobre procesado en Chile	18
Figura 2-15 Tasas de agua recirculada en la minería de cobre en Chile	19
Figura 2-16 Proyección de la demanda de agua en la minería de cobre en Chile hacia 2029	19
Figura 2-17 Consumo nacional de energía en la minería del cobre chilena	20
Figura 2-18 Porcentaje de consumo energético de combustibles y electricidad por proceso en la minería de cobre en Chile en 2018	21
Figura 2-19 Eficiencia en el consumo energético por unidad de producción de cobre fino en empresas chilenas en el año 2017	21
Figura 2-20 Mapa de las concesiones mineras en Ecuador antes y a partir del 2017	22
Figura 2-21 Producción anual de oro en Ecuador	27
Figura 3-1 Etapas del procesamiento minero	29
Figura 4-1 Esquema del sistema de RO de estudio	47
Figura 4-2 Presión osmótica del concentrado ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) en función de la salinidad	50
Figura 4-3 Consumo específico de energía para el sistema ejemplo, en función de la conversión expresada como razón de caudales volumétricos de producto y alimentación	50
Figura 5-1 Ejemplo de diagramas de flujo de dos instalaciones de desalación en Israel	52
Figura 5-2 Proceso de tratamiento de BWRO en dos etapas. Interfaz de simulación del software Q+ Projection	53
Figura 5-3 Permeabilidad a agua (L_w) y a sales (L_s) de distintos modelos de membranas LG BW calculados a partir de los resultados de simulaciones en el software Q+	57
Figura 5-4 Consumo específico de energía para los casos simulados en el software Q+ correspondientes a la serie de membranas 2521 R y 4021 ES citados en la Tabla 5-4	58

Notación

T, t	Temperatura
S	Salinidad
ρ_{sw}	Densidad de la disolución de sales marinas
ρ_w	Densidad del agua pura
Φ	Coefficiente osmótico del agua
R	Constante universal de los gases
Π_i	Presión osmótica de la corriente i
p_i	Presión de la corriente i
E	Condiciones ambiente
F	Corriente de alimentación
P	Corriente de producto o permeado
BD	Corriente de concentrado
$F-BD$	Canal entre la corriente F y BD
HPP	Bomba de alta presión
ERD	Dispositivo de recuperación de energía
BP	Bomba de apoyo
q_i	Caudal másico de la corriente i
$q_{v,i}$	Caudal volumétrico de la corriente i
r_m	Conversión en función del caudal másico
r_v	Conversión en función del caudal volumétrico
Δp_{loss}	Pérdida de presión
$P_{w,i}$	Consumo energético de la bomba i
η_i	Rendimiento de la bomba i
$\eta_{eng,i}$	Rendimiento del motor de la bomba i
SEC	Consumo específico de energía
Eff	Eficiencia del ERD
ε	Parámetro auxiliar de la eficiencia del ERD
HP_{DP}	Diferencial de presión del lado de alta presión
LP_{DP}	Diferencial de presión del lado de baja presión
NDP	Presión impulsora neta (<i>Net Driving Pressure</i> , en inglés)
TDP	Presión impulsora neta a la salida (<i>Tail Driving Pressure</i> , en inglés)
DP	Parámetro de diferencial de presión
L_w	Permeabilidad de la membrana al agua
L_s	Permeabilidad de la membrana a sales
C_i	Concentración de la corriente i
C_i^*, S_i^*, Π_i^*	Concentración, salinidad y presión osmótica en la superficie de membrana para la corriente i
CPF	Factor de polarización por concentración
q_s	Caudal másico de sales

1 OBJETIVOS, ALCANCE Y METODOLOGÍA

Sudamérica tiene un alto nivel de importancia en cuanto a la producción global de minerales metálicos; en particular, Chile representa la mayor parte de las importaciones europeas de productos acabados de cobre desde el año 2012. Asimismo, Ecuador está emergiendo como un foco de inversión minera en Latinoamérica, impulsado por la combinación de un marco regulatorio favorable y unas extensas reservas de oro y cobre. Sin embargo, el sector minero sudamericano está ligado a una serie de retos, tales como la escasez de agua, la contaminación de los acuíferos y los riesgos sanitarios asociados.

1.1 Justificación del Proyecto

El agua es un recurso fundamental para la vida. Ya sea de fuentes subterráneas o superficiales, la disponibilidad y el acceso al agua en calidad y cantidad suficientes es una necesidad crítica en todo el mundo. Factores como el crecimiento de la población y el desarrollo económico significan que la disponibilidad de agua se está volviendo cada vez más limitada en muchas áreas. Conjuntamente con las crecientes preocupaciones sobre el impacto del cambio climático global y la pérdida de biodiversidad, el enfoque del agua como recurso natural clave se ha agudizado.

Por esto, asegurar el acceso a este recurso y a los servicios de mantenimiento y cuidado del mismo va a ser una maniobra indispensable para paliar los efectos del cambio climático de modo local, aunque sea en esencia un fenómeno global. Los sectores de la industria cuyo uso intensivo del agua tiene bastante importancia, como el energético y el extractivo, juegan un papel importante en la conservación y la disponibilidad del suministro, por lo que sería provechoso que proyectaran sus procesos productivos en este sentido. Generar más soluciones asociadas a garantizar el acceso al agua potable, el consumo sostenible y la reducción y manejo de las aguas residuales debe ser un aspecto primordial para los gobiernos e industrias.

Las leyes que regulan el agua varían en todo el mundo, pero del sector minero se espera que demuestre liderazgo para el uso y la gestión del agua. En la minería el agua se utiliza dentro de una amplia gama de actividades, incluyendo procesamiento de minerales, supresión de polvo, transporte de lechada y consumo de los empleados. Durante las últimas décadas, la industria ha avanzado mucho en el desarrollo de enfoques de circuito cerrado que maximizan la conservación del agua. Como el agua juega un papel crucial, el uso responsable del agua es un tema comercial crítico relacionado con la capacidad de las minas individualmente para establecerse, operar y cerrar; así como para garantizar que su contribución al desarrollo sostenible sea positiva a largo plazo.

Los territorios de América Latina y el Caribe son el hogar del 8% de la población mundial, así como del 65% del agua dulce disponible del mundo. Solamente ya en el trío que conforman los ríos Amazonas, Paraná-de la Plata y Orinoco fluye más de un 30% del agua dulce renovable del planeta. A eso es posible añadir las importantes reservas de acuíferos en países como Paraguay, Uruguay o Brasil y las nieves y glaciares de las cordilleras del Cono Sur [1].

No obstante, estas reservas hídricas no están distribuidas del modo más adecuado, habiendo grandes zonas con escasa disponibilidad de agua. Tanto es así que dos tercios de la región se clasifican como áridas o semiáridas. Además, los efectos del calentamiento global sobre los recursos hídricos de América Latina y el Caribe han empeorado en las últimas décadas. Algunos de estos impactos han sido:

- Aumento en el número de fenómenos climáticos extremos (inundaciones, deslizamientos, sequías...).
- Dificil disponibilidad del agua o estrés hídrico
- Incremento de los episodios de días secos y precipitación intensa.
- Tendencia descendente de la precipitación en países como Chile o Nicaragua.
- Subida del nivel del mar a ritmo de 2-3 mm/año.
- Disminución considerable de la superficie de glaciares en la zona tropical andina de Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú.

El impacto negativo de estos fenómenos viene siendo bastante claro. Entre 2000 y 2005 se estima que hubo en la zona 1,23 millones de personas afectadas por las sequías. Asimismo, el estado en declive de los glaciares afecta al abastecimiento de agua de alrededor de 30 millones de personas [1].

Aunque los problemas del agua son importantes a nivel mundial, suelen ser sobre todo problemas más graves desde una perspectiva local. Las áreas donde no hay suficiente agua para satisfacer la demanda se consideran zonas de estrés hídrico. Las comunidades cercanas a los sitios mineros suelen mostrar preocupación por la disponibilidad, el acceso y la contaminación de sus fuentes de agua. Si otros usuarios consideran que una mina es un consumidor excesivo de agua o que afecta negativamente a la calidad del agua, se podrían desencadenar conflictos.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 1-2, los territorios de América Latina y el Caribe son la región del planeta con más número de conflictos socioambientales de explotación minera. En países andinos, como Chile, Ecuador, Colombia o Bolivia, el sector minero juega un papel esencial en la economía local. Y pese a ser el agua un elemento básico en los procesos de extracción, el sector solamente es responsable (según el país) de un 2-8% del uso del agua, en contraposición con el empleo del 70% del agua al que a veces llega el riego agrícola. A pesar de ello, esto no ha servido para que la industria minera escape de los conflictos por el agua con otros agentes como el sector energético, agrícola o las comunidades locales [2].

Estas presiones significan que, aunque los gobiernos y las autoridades locales son responsables de la regulación del agua, muchas compañías mineras consideran necesario ir más allá del cumplimiento normativo. Sin embargo, pese a que en algunos casos las compañías mineras han actuado por debajo del nivel de compromiso esperado en cuanto a la gestión del agua, estas pueden suponer una contribución positiva para las comunidades proveyendo un suministro seguro y limpio.

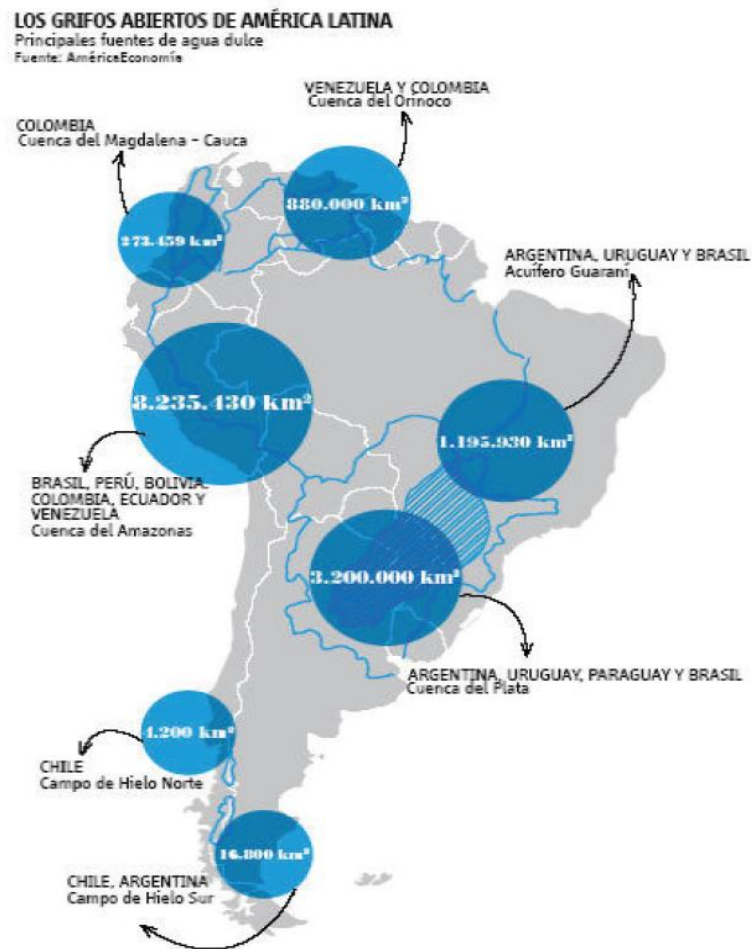


Figura 1-1 Fuentes de agua dulce en Sudamérica (AméricaEconomía)

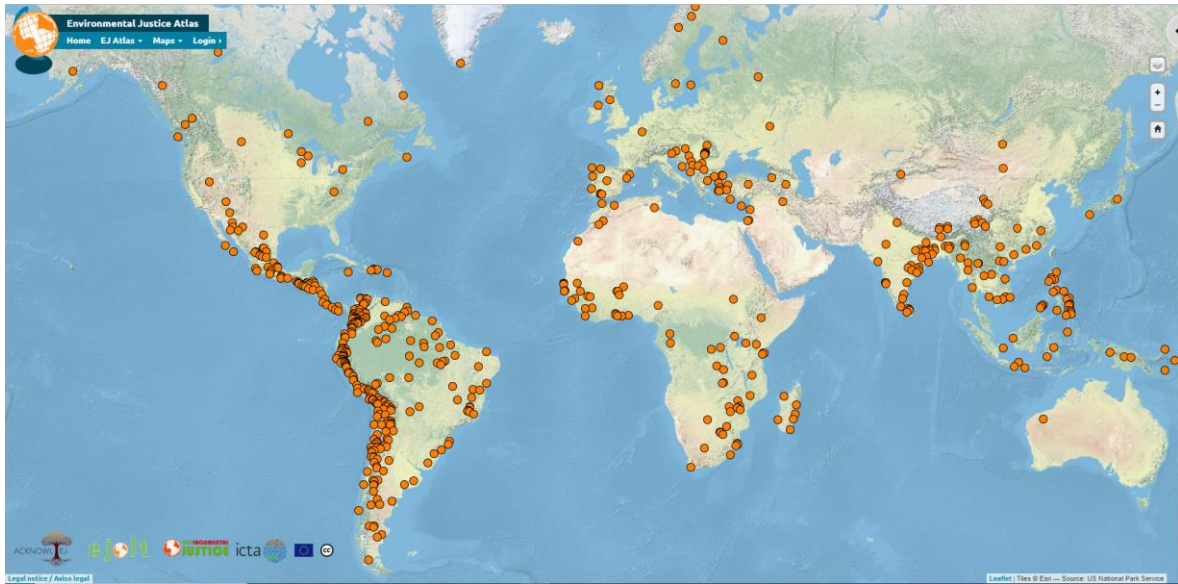


Figura 1-2 Mapa de conflictos socioambientales de explotación minera [3]

La minería es una de las pocas industrias que puede utilizar el agua de pobre calidad para diversos procesos. El agua de mar, las aguas subterráneas hipersalinas o los efluentes de otras industrias son fuentes potenciales de agua para las operaciones mineras. Asimismo, las plantas de tratamiento y desaladoras construidas para minas también se pueden usar para ayudar a las comunidades locales. Un ejemplo en este sentido es la mina de Minera Esperanza en Chile, donde se está utilizando agua de mar sin tratar para abastecer las necesidades de agua de la instalación. Y otra muestra es la mina de Cerro Verde en Perú, donde se han proyectado una potabilizadora y una planta de tratamiento de agua residual que garantizarán que la ciudad de Arequipa tenga acceso a agua potable limpia y cumpla con los requisitos de calidad del agua, en caso de que la expansión minera prosiga [4].

Las minas dependen del desarrollo de un balance hídrico para poder gestionar el agua y así lograr un equilibrio sostenible entre el suministro, el consumo, la operación y los riesgos ambientales. Entre los desafíos que enfrenta la industria minera está la necesidad de minimizar las pérdidas de agua durante el procesamiento y maximizar el reciclaje del agua. Hoy en día es inusual que una mina no cuente con potencial para reutilizar el agua del proceso, la cual se acumula en una instalación de relaves o en una instalación de almacenamiento de agua a tal efecto. Por otra parte, las descargas de agua planificadas de las minas al ambiente receptor normalmente se monitorean y controlan cuidadosamente para garantizar el cumplimiento de las reglamentaciones y minimizar el impacto en las aguas receptoras. La descarga del agua de proceso tratada debe monitorearse rutinariamente y debe cumplir con ciertos estándares y requisitos de calidad en términos de temperatura, pH y conductividad, entre otros. No obstante, a veces puede haber descargas no planificadas, como filtraciones y fugas de lagunas de almacenamiento, presas de relaves y vertederos; del mismo modo que suceden pérdidas de contención debido a eventos naturales como terremotos o eventos de alta precipitación.

Por otra parte, el sector minero es señalado frecuentemente como una fuente de contaminación. Pese a la existencia de métodos de disminución del impacto ambiental, en bastantes casos los requerimientos ambientales no se alcanzan de manera efectiva (sobre todo a nivel de minería a pequeña y media escala). La huella ambiental de los procesos mineros puede perdurar durante largos periodos de tiempo, incluso tras la clausura de las minas, lo cual ha quedado grabado como una mancha en la reputación minera para las gentes locales, que resultan más afectados de manera directa.

Además, la actividad minera a veces se sitúa en regiones ya de por sí sensibles a la escasez de agua, con algunas de sus reservas hídricas sobreexplotadas y que acaban en condiciones extremadamente pobres en cuanto a disponibilidad. El uso consuntivo del agua en la minería abunda y el agua extraída que no se consume se retorna directa o indirectamente a la corriente para que se pueda aprovechar por otros usuarios de la cuenca mediana y baja, ya que las explotaciones suelen emplazarse en zonas de cabecera de las cuencas. Debido a esa situación estratégica, el posible impacto, tanto en términos de cantidad como de calidad, suele tener una amplia zona de influencia. En el caso de la minería a gran escala, los procedimientos de reciclaje del agua son más eficientes, aunque genere una menor posibilidad de que otros usuarios puedan reutilizar el agua posteriormente.

1.2 Alcance

Vista la motivación que ofrece la situación en la que recursos hídricos e industria minera se mueven en la región de Sudamérica, se establecen una serie de metas que atañen a este trabajo y que se enmarcan en el contexto del proyecto nacional SOLMIDEFF [5] y un proyecto internacional: el proyecto REMIND [6].

El proyecto SOLMIDEFF es un proyecto tecnológico que pretende el desarrollo conceptual completo de una tecnología totalmente innovadora y singular, de la cual no existe aún ningún prototipo en el mundo. La tecnología consiste en la integración de un captador solar paraboloide en cuyo foco se sitúa una microturbina de gas con un sistema innovador de ósmosis inversa y con un sistema de aprovechamiento térmico de los gases de escape de la microturbina. El sistema opera aislado de la red eléctrica, de forma solar autónoma o con respaldo de energía convencional mediante biocombustibles. Por tanto es posible lograr una operación 100% renovable.

El objetivo, en términos generales, del proyecto REMIND ('Renewable Energies for Water Treatment and Reuse in Mining Industries') es desarrollar un marco innovador de interacción entre las fuentes de energía renovable y las últimas tecnologías de tratamiento de agua en el sentido de un crecimiento sostenible para las empresas del sector minero. Se espera que los nuevos paradigmas explorados reduzcan drásticamente el impacto ambiental debido tanto al consumo intensivo de agua y energía como a la liberación de efluentes residuales no tratados durante los ciclos productivos del cobre y el oro.

El consorcio del proyecto REMIND entre la Unión Europea, Chile y Ecuador está en línea con la política y estrategia de la UE para el suministro de materias primas. El proyecto apoya económicamente la colaboración internacional de investigación de estos países latinoamericanos hacia un desarrollo más respetuoso con el medio ambiente e impulsado por las fuentes de energía renovable.

Las actividades de transferencia de conocimiento bidireccional implementadas en REMIND tienen como objetivos:

- i) Implementar un uso racional de los recursos hídricos en el sentido de una economía circular.
- ii) Promover un enfoque tecnológico 'libre de carbono' (con el nexo agua-energía) para reducir las necesidades de fuentes de energía convencionales.
- iii) Mitigar el riesgo de salud medioambiental en dos zonas de prueba (el distrito minero de Antofagasta, Chile, y la Región del Oro, Ecuador).
- iv) Explotar la cooperación intersectorial académica e industrial, estableciendo las mejores prácticas para la transferencia de conocimiento en contextos análogos.

Así, en dicho contexto, el presente proyecto fija los siguientes objetivos específicos, los cuales se espera sirvan de apoyo para la consecución de aquellos concebidos para el proyecto REMIND:

- i) Caracterizar el sector minero tanto en Chile como en Ecuador (fundamentalmente, el dedicado a la producción de oro y cobre).
- ii) Relacionar la actividad minera de ambas regiones con su impacto en los recursos hídricos.
- iii) Caracterizar los efluentes de la actividad del sector.
- iv) Modelar el tratamiento de los efluentes producidos mediante ósmosis inversa.

- v) Realizar un análisis de dicha propuesta, tanto en términos técnicos como energéticos.

Como trabajo futuro, los dos últimos objetivos permitirán realizar diseños específicos utilizando la tecnología del proyecto SOLMIDEFF, que permite realizar el tratamiento mediante ósmosis inversa de forma

- más eficiente gracias al concepto no convencional de módulos de membranas innovadores.
- más sostenible gracias al uso de energía solar y al concepto de nula descarga de líquidos (*ZLD*, *Zero Liquid Discharge*) asociada al aprovechamiento de los gases de escape.

A pequeña escala sería aplicable el uso de una o varias unidades conectadas en paralelo de microturbina de gas solar conectadas a un sistema integrado de tratamiento de agua, mientras que a escala mediana o grande utilizaríamos el mismo concepto de ósmosis inversa innovadora y subsistema *ZLD* pero alimentados por una turbina de gas de mayor escala con diseños específicos de concentradores solares a mayor escala.

1.3 Métodos de estudio

El desarrollo de los objetivos previamente nombrados se llevará a cabo mediante distintos métodos de estudio, los cuales supondrán fundamentalmente revisión bibliográfica, obtención de datos, revisión del estado del arte, realización de un modelado y cálculos pertinentes. Así el estudio quedaría, de forma resumida, tal y como se describe a continuación:

- i) Detalle de la participación económica del sector minero en Chile y Ecuador.
- ii) Detalle del abastecimiento de agua al sector minero en Chile y Ecuador.
- iii) Detalle del consumo de agua del sector minero en Chile y Ecuador.
- iv) Detalle de la producción de metal en términos de consumo de agua.
- v) Detalle de los requisitos de calidad de agua en función del objetivo de reuso.
- vi) Descripción de las vías de contaminación del agua durante el procesado del mineral.
- vii) Realización de un catálogo de efluentes mineros típicos, con su caracterización correspondiente.
- viii) Propuesta de uno de los procedimientos de tratamiento aplicable a la casuística revisada en REMIND.
- ix) Implementación de un modelo de cálculo de los requerimientos energéticos de la técnica de tratamiento escogida.
- x) Implementación de un modelo de cálculo de propiedades operacionales del sistema o equipos implicados en dicha técnica de tratamiento.
- xi) Cálculo y modelado mediante un software de simulación de la tecnología propuesta.

2 EL SECTOR MINERO EN CHILE Y ECUADOR

En el proceso minero existen distintas etapas que representan un punto de consumo de agua, algunos más intensivas que otros, pero, en definitiva, que requieren del agua como recurso vital para llevar a cabo su objetivo. El vínculo entre la correcta gestión de recursos hídricos y la producción económica de las compañías mineras en los países sudamericanos es ineludible. Es por ello que es imperativo realizar un apunte de la situación de la industria minera, tanto económica como técnica, de modo que quede reflejado el peso real que el sector supone en estas regiones; y de sus acciones respecto a las reservas hídricas.

Generalmente, la industria minera actúa por tres caminos sobre las fuentes de agua: las consume, las contamina y las destruye. Un estudio de la PUCP estimó en 1.263,5 millones de USD el costo que supuso entre 2008-2009 para Perú la contaminación ambiental generada por el sector minero sobre los recursos hídricos del país. Otro ejemplo de estos impactos de la minería es Brasil, donde la Agencia Nacional de Aguas ha documentado numerosos casos de contaminación de cuencas de ríos a causa de los procesos mineros.

No obstante, en cuanto a consumo, suele ser el sector agrícola el que sobresale por encima de los demás, exceptuando únicamente algunos casos especiales como países como Rusia o Canadá.

Tabla 2-1 Consumo de agua por sector y país (The World's Water, 2013)

PAÍS	AÑO	TOTAL (km ³ /año)	POBLACIÓN en 2010 (millones)	TOTAL PER CÁPITA (m ³ /p·año)	USO (%)			USO (m ³ /p·año)		
					DOMÉSTICO	INDUSTRIAL	AGRÍCOLA	DOMÉSTICO	INDUSTRIAL	AGRÍCOLA
MUNDO*	2010	3.856,00	6.863,88	562	11%	19%	70%	429	723	2.710
Australia	2010	59,84	21,51	2.782	16%	11%	73%	445	306	2.058
Brasil	2006	58,07	195,42	297	28%	17%	55%	83	52	162
Canadá	2006	45,08	33,89	1.330	20%	68%	12%	260	913	157
Chile	2007	26,70	17,13	1.558	4%	10%	86%	62	156	1.340
China	2007	578,90	1.361,76	425	12%	24%	64%	52	99	272
Ecuador	2005	9,90	13,77	719	13%	6%	81%	93	43	582
España	2008	32,50	45,32	717	18%	22%	60%	129	158	437
EE.UU.	2005	482,20	317,64	1.518	13%	46%	41%	193	699	626
Ghana	2000	0,98	24,33	40	24%	10%	66%	10	4	27
Irán	2004	93,30	75,08	1.243	7%	1%	92%	85	12	1.143
Marruecos	2000	12,60	32,38	389	10%	3%	87%	39	12	339
México	2009	80,40	110,65	727	14%	9%	77%	102	67	557
Perú	2000	19,30	29,50	654	7%	8%	85%	46	52	556
Portugal	2002	8,50	10,73	792	8%	19%	73%	63	150	578
Rusia	2000	76,68	140,37	546	20%	60%	20%	109	328	109
Sudáfrica	2000	12,50	50,49	248	31%	6%	63%	77	15	156

* todas las medidas referidas a volumen en km³

2.1 La Minería en Chile

Es importante explicar primeramente que la minería en Chile está regida fundamentalmente por la extracción de un metal: el cobre. De hecho, desde hace tiempo el país es líder mundial en la producción de cobre, y las operaciones mineras a gran escala residentes ahora cuentan con una amplia gama de tecnología moderna. Aunque la fuerza laboral del sector minero, la cual alcanzó la cifra de 228.340 trabajadores en 2018 según datos de COCHILCO, se considera baja (un 2,7% de la ocupación total del país), desde un punto de vista económico hubo 42 mil millones de dólares en productos minerales exportados en el año 2018, lo que supone alrededor del 55,8% del total de las exportaciones nacionales, de las que la industria del cobre representó aproximadamente el 86% de las exportaciones mineras del país.



Figura 2-1 Mapa de explotaciones mineras en Chile [7]

2.1.1 La minería de pequeña escala en Chile

La Minería Metálica a Pequeña Escala (MMPE) en Chile se dedica principalmente al cobre, oro y plata, para lo cual emplea a 12.000 trabajadores directos y a unos 72.000 dependientes [8]. La mayoría de los productores de MMPE se concentran dentro de la zona norte, que abarca las Regiones I-VI del país. La mayor parte de la actividad minera ocurre en el desierto de Atacama y lejos de las grandes ciudades y zonas agrícolas sensibles. La definición de MMPE varía considerablemente de un país a otro, e incluso puede cambiar con el tiempo. En Chile, las operaciones mineras con una capacidad de extracción de menos de 200 toneladas de minerales por día se clasificaron originalmente como "artesanales y de pequeña escala". Recientemente, sin embargo, el SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería) ha comenzado a utilizar el número de trabajadores contratados por año como base para la clasificación; las minas con menos de 80 trabajadores contratados anualmente ahora se consideran "de pequeña escala". Dichas operaciones generalmente se ubican en las áreas rurales más remotas de Chile, son altamente inseguras, presentan técnicas rudimentarias de producción y procesamiento y proporcionan ingresos mínimos a los empleados.

El apoyo técnico a la minería chilena a pequeña escala es brindado principalmente por ENAMI (Empresa Nacional de Minería) y SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minas). En general, los objetivos de estas agencias públicas son proporcionar asistencia técnica, crédito y subsidios, comprar minerales y concentrados a los mineros, introducir herramientas de gestión ambiental en las operaciones y reducir los problemas ambientales en el sector. El objetivo específico de ENAMI es promover el desarrollo de la minería a pequeña y mediana escala al proporcionar los servicios necesarios para facilitar su acceso al mercado de metales refinados en condiciones competitivas. Utiliza tres instrumentos principales:

- i) El desarrollo minero, involucra financiación de empresas mineras, asistencia técnica para la preparación y evaluación de proyectos, la concesión de créditos para la implementación de emprendimientos factibles y el acceso al mercado a través de compras de mineral autorizadas.
- ii) El procesamiento de minerales, que implica el tratamiento de minerales de sulfuro y óxido de cobre en productos de fundición, concentrados y precipitados en plantas de ENAMI o de terceros.
- iii) Los servicios de fundición y refinación, ayuda a garantizar que los productos derivados del sector MMPE se procesen con la misma tecnología que los empleados por los productores a gran escala en Chile.

Aunque ENAMI trabaja junto con la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), en realidad no posee minas y es una organización sin ánimo de lucro. ENAMI compra minerales y concentrados de pequeños y medianos productores de cobre de las Regiones III, IV y V, y apoya las actividades mineras de esas compañías durante períodos de precios bajos. Los minerales de cobre recolectados se procesan en las plantas concentradoras de Taltal, Salado, Manuel Antonio Matta y Vallenar; los concentrados se funden en las plantas de fundición Hernán Videla Lira (Paipote) y Ventanas. Ventanas también tiene una refinación de electrolitos y una planta de metales preciosos (oro y plata). Ya en 2000, la planta de electrorefinado produjo 319.000 toneladas de cátodos electrolíticos de cobre, alrededor del 6,93% de la producción nacional.

SERNAGEOMIN es una agencia pública que se creó en 1980 para ayudar al gobierno (Ministerio de Minería) con temas especializados en geología y minería, principalmente en el sector minero de pequeña y mediana escala. Las oficinas regionales de las Regiones I-V y VIII están involucradas. Geológicamente, la Agencia realiza trabajos en el área de exploración minera, geología ambiental y riesgos geológicos. Los temas de minería cubren propiedad minera, control de riesgos operativos, gestión ambiental y protección de recursos.

En 1992, el Departamento de Gestión Ambiental buscó controlar la seguridad laboral para minería, plantas, presas de relaves y sistemas de eliminación de residuos. El Decreto Supremo 72/Ministerio de Minería y el artículo N° 71 del Código Sanitario faculta a SERNAGEOMIN con la autoridad para controlar la eliminación de residuos, incluidos relaves, residuos de lixiviación y minerales de baja graduación. Además, ofrece servicios de consultoría a la Comisión Nacional del Medio Ambiente sobre evaluación de impacto ambiental; informa a CONAMA cualquier daño ambiental o contaminación detectada; y supervisa todas las presas de relaves.

Por otra parte, de las iniciativas más importantes emprendidas hasta la fecha para facilitar las mejoras ambientales en el sector minero chileno en pequeña escala han sido la formación de CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) en 1990 y la promulgación de la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (N° 19300) en 1994. Esta Ley, combinada con normas regulatorias adicionales, estableció ciertos mecanismos de control clave, como la "Evaluación del Impacto Ambiental" y el "Plan de Gestión Ambiental". CONAMA, junto con los Ministerios de Salud, Agricultura y Minería, y la comunidad, tienen la responsabilidad de promover el desarrollo sostenible en el sector minero chileno. Otras dos iniciativas legislativas importantes han sido el Decreto 601/año 2005, que regula la descarga de residuos líquidos en aguas superficiales y subterráneas y la promulgación de normativa que obliga a la industria a implementar soluciones técnicas a los problemas de contaminación.

En resumen, las actividades de MMPE en Chile están reguladas por la agencia gubernamental SERNAGEOMIN en las áreas de propiedad minera, seguridad y apoyo geológico, y por CONAMA, que evalúa los impactos ambientales y los problemas asociados con la eliminación de residuos, la contaminación y el tratamiento de efluentes. Estas agencias públicas están dedicadas a disminuir los riesgos para la salud en el sector de MMPE al alentar la introducción de procesos y herramientas de gestión ambiental más ecológicos. Además, ambos están trabajando para promover el desarrollo sostenible en el sector mejorando las condiciones de vida de los trabajadores y sus familias, y protegiendo a las comunidades circundantes.

Los principales impactos ambientales del sector MMPE chileno incluyen la contaminación por efluentes líquidos descargados a los ríos, la infiltración de los suelos, la contaminación de las aguas subterráneas y las amenazas de las presas de relaves. El desbordamiento de presas de relaves procesados y las aguas residuales ácidas son algunos de los residuos industriales líquidos más comunes en el sector de MMPE.

El proceso de amalgamación se emplea ampliamente en los sectores de minería de oro artesanal y en pequeña escala. Los mineros generalmente manejan el mercurio descuidadamente y a menudo inhalan vapores de mercurio tóxicos mientras destilan amalgama de oro. Se han hecho algunos esfuerzos para capacitar a los mineros sobre cómo manejar el mercurio adecuadamente. Además, se intentó introducir cierto equipamiento en un intento de mejorar la recuperación de mercurio durante la destilación. Sin embargo, la toxicidad del mercurio sigue siendo uno de los impactos ambientales más generalizados en el sector de MMPE de Chile. Finalmente, las presas de relaves abandonadas plantean otro problema ambiental serio en el sector de MMPE de Chile, porque son una amenaza de contaminación, particularmente cuando se encuentran cerca de zonas urbanas.

Cabe señalar, sin embargo, que la legislación ambiental chilena no distingue entre la minería a gran, mediana y pequeña escala, aunque ciertos grupos de regulaciones solo son adecuados para ciertos segmentos. Por ejemplo, la regulación de las emisiones de SO₂ y As (Decreto Supremo 185/año 1991) está claramente orientada hacia las fundiciones de cobre del sector minero de mediana y gran escala. Sin embargo, las normas para la contaminación de aguas superficiales, y una serie de otras regulaciones ambientales son aplicables al sector MMPE.

Para ayudar a mitigar los impactos ambientales en el sector minero a gran escala de Chile, se han implementado planes de descontaminación, es decir, acuerdos entre la empresa y las autoridades para resolver problemas ambientales en un período de tiempo determinado. Esto ha demostrado ser particularmente efectivo para capturar y reducir las emisiones de As y SO₂ en las fundiciones de cobre locales. Sin embargo, la implementación de planes de descontaminación en el sector de MMPE es más difícil, en gran medida debido a la naturaleza de sus operaciones. Las autoridades están alentando una serie de iniciativas ambientales, que incluyen el uso eficiente del mercurio (es decir, para disminuir las pérdidas en las aguas residuales vertidas de los trapiches); implementación de equipos eficientes para la destilación de mercurio; construcción de estanques de relaves; y reutilización de aguas residuales. La capacitación de los mineros en las áreas de seguridad e impacto ambiental es otra acción que están tomando las autoridades.

En el caso de la minería en pequeña escala, el Estado tiene dos puntos de vista diferentes: primero, para apoyar la actividad con fines socioeconómicos; y segundo, garantizar el derecho de todos los chilenos a vivir en un ambiente libre de contaminación. Al principio, el objetivo era establecer un marco legal y fiscal, proporcionando educación y atención médica a los mineros y sus familias expuestas a contaminantes. Ahora, el desafío es mejorar las condiciones de vida de los mineros mediante la introducción de técnicas de proceso y minería más responsables y seguras ambientalmente. Cabe señalar que las empresas mineras a gran escala no tienen ninguna conexión directa con el sector MMPE.

Las agencias internacionales, particularmente la oficina regional de la CEPAL de las Naciones Unidas en Santiago, han estado recopilando información sobre el sector de MMPE de Chile y haciendo estudios comparativos con otros MMPE en el mundo. El Grupo del Banco Mundial a través de la Corporación Financiera Internacional está explorando la posibilidad de establecer un Grupo Consultivo Internacional sobre Minería Artesanal y de Pequeña Escala como un foro para evaluar y abordar algunos de los problemas del sector. Sus tareas planificadas incluyen el desarrollo de pautas de políticas, el asesoramiento a los mineros locales y la difusión de conocimientos sobre las mejores prácticas.

En 1998, el Estado, a través de SERNAGEOMIN y ENAMI, lanzó el programa ECOMIN, cuyo objetivo es controlar y reducir el impacto ambiental de la minería a pequeña y mediana escala, y mejorar la seguridad e higiene en la industria. Brinda capacitación sobre temas básicos de protección del medio ambiente; ayuda a difundir el conocimiento de experiencias positivas de producción más limpia en el sector; y ha trabajado para incorporar el sector MMPE al Sistema nacional de Impacto Ambiental. En Chile, hay once universidades, con sede en las ciudades de Iquique, Antofagasta, Copiapó, La Serena, Santiago y Concepción, que tienen departamentos activos de minería y/o metalurgia, que, históricamente, se han centrado principalmente en la minería a gran y mediana escala en lugar de investigar más bien la investigación minera a pequeña escala. Sin embargo, las universidades han sido utilizadas como centros de investigación y consultadas para obtener retroalimentación en el área de capacitación ambiental para el MUS, y para alentar el uso de herramientas efectivas de gestión ambiental y la difusión de técnicas más amigables con el medio ambiente [9].

2.1.2 La minería de mediana escala en Chile

Las tres clasificaciones aplicables al sector de la minería de mediana escala chilena [10] son las siguientes:

- Base a trabajadores y horas trabajadas (SERNAGEOMIN): 80-400 trabajadores y entre 200 mil y 1 millón de horas trabajadas.
- Base a producción (IIMCh): 300-8.000 t/d de mineral (menos de 50.000 t de cobre fino al año).
- Base a producción (ENAMI): más de 10.000 t de minerales en ventas al mes.

Si bien esta clasificación se encuentra bastante extendida, aún se puede subcategorizar el sector en:

- Mediana minería de mayor escala: capacidad de producción nominal de 12.000-50.000 t/año de cobre fino equivalente.
- Mediana minería de menor escala: capacidad de producción nominal de 1.200-12.000 t/año de cobre fino equivalente.

A fecha de 2016, el censo de empresas mineras del SERNAGEOMIN, en el apartado de mediana minería, contaba con casi una treintena de ellas, incluyendo 21 cupríferas y 6 auríferas. Su capital es principalmente nacional y de compañías familiares, habiendo además alguna con participación de socios internacionales. Cabe destacar su aporte a la generación de empleos directos e indirectos. Las empresas de esta escala se ubican mayormente en zonas de la cordillera de la costa, así como en la depresión en la región norte-central de Chile. Este factor permite su cercanía a núcleos de población.

A dichas empresas se les reconoce un alto nivel de inversión y desarrollo. No obstante, la franja más cercana al límite inferior de producción y tamaño aún se sostiene en condiciones de vulnerabilidad ante ciclos de precios bajos. Estas empresas, con el apoyo de ENAMI para el fomento, continúan introduciendo mejoras en sus negocios y procesos para resistir los periodos de mayor penalización en los precios, ya que de otro modo sería muy complicado debido a las dificultades en la financiación a largo plazo y en la exportación de sus productos. En los últimos años, la mediana minería del cobre en Chile está desarrollando cuatro proyectos para su ejecución entre 2017 y 2026 (Tabla 2-2).

Tabla 2-2 Proyectos de mediana minería para 2017-2026 en Chile [10]

PROYECTO	COMPAÑÍA	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Diego de Almagro	Minera Sierra Norte S.A.	Región de Atacama	Proyecto para la producción de cátodos y concentrado de cobre. Se espera una producción promedio de 35.000 t/año de cobre fino, concentrado y cátodos de alta pureza. Para ello se contará con una inversión de 475 millones de dólares.
Productora (proyecto de Hot Chili)	Sociedad Minera El Águila Ltda.	Región de Atacama	Proyecto para desarrollar una mina de rajo abierto y una planta de concentración con capacidad para procesar 30.000 t/d de mineral, para un objetivo anual de hasta 50.000 t de cobre fino y 1.190 kg de oro. Para ello contará con una inversión estimada de 725 millones de dólares.
El Espino	El Espino S.A.	Región de Coquimbo	Proyecto de minería aurífera y cuprífera en el que se incluirá una planta LX-SX-EW con capacidad para tratar 6.300 t/d de mineral y una planta concentradora con capacidad para tratar 20.000 t/d de mineral. El objetivo anual es de 7.200 t de cobre en cátodos, 32.800 t de cobre fino y 708 kg de oro. La inversión estimada será de 624 millones de dólares.
Playa Verde	Minera Playa Verde Ltd.	Región de Atacama	Proyecto para extracción por draga de los antiguos depósitos de relaves de Playa Grande en Chañaral para su posterior tratado y procesamiento en una planta metalúrgica. El objetivo es la obtención anual de 7.080 t de cobre en cátodo y 1.560 t de cobre concentrado. Su inversión estimada es de 95 millones de dólares.

Los proyectos de mediana escala presentan una combinación de las ventajas correspondientes a proyectos de pequeña y gran escala, como pueden ser:

- Mayor simplicidad técnica
- Yacimientos a baja altura
- Campamentos no necesarios
- Menor monto de inversión
- Apoyo de entidades como ENAMI
- Empleo local
- Menor nivel de conflictos
- Menor invasión ambiental y comunitaria
- Cercanía a núcleos de población y comunidades

2.1.3 La gran minería en Chile

El Ministerio de Minería chileno, a través de organismos ya mencionados como COCHILCO o SERNAGEOMIN y gracias a la información oportuna que proveen mensualmente las empresas nacionales, desde las de pequeña a las de gran escala, elabora ciertas publicaciones de carácter anual en las que se recogen una serie de datos estadísticos sobre el sector minero. Analizando dicha información se puede adquirir una imagen cuantitativa de la situación económica del sector.

La minería chilena ha experimentado un crecimiento en escala brutal a lo largo de las últimas siete décadas, pasando del medio millón de toneladas producidas en los años 50 hasta el volumen de producción actual, el cual ronda los 6 millones de toneladas únicamente en cobre (Figura 2-2). Ese cambio de escala queda reflejado en cuanto a tasas de producción, de las cuales las grandes compañías mineras chilenas representan un 90%. Solo en producción de hierro, las compañías de mediana escala suponen un aporte considerable (un 44% aproximadamente). Por ello, se cree pertinente definir un sector económico como el minero en referencia a las compañías de gran escala por ser las más representativas del mismo.

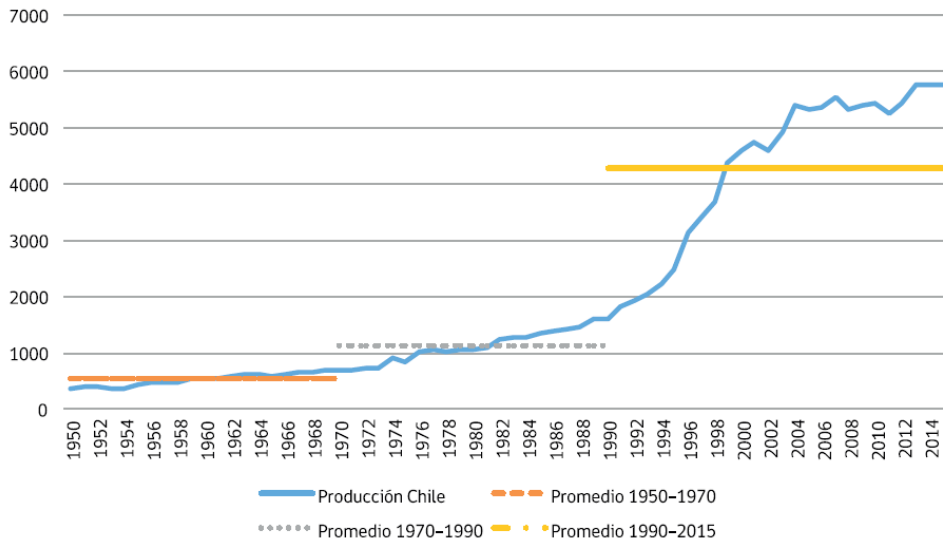


Figura 2-2 Producción histórica de cobre en Chile, en miles de toneladas [11]

Ya en cuanto a datos de producción minera del país, como ya se ha comentado anteriormente, la minería metálica en general y la de cobre en particular juegan un papel fundamental. La producción de los principales metales extraídos en las minas chilena en el año 2018 llegó a 14,86 millones de toneladas, de los cuales 5,83 millones de toneladas fueron de cobre fino (Figura 2-3). También destaca la importancia de otros metales como el hierro y el oro. Además, la industria de minera del cobre de Chile sigue siendo tras muchos años líder a nivel mundial. En el año 2018, Chile copó el 27,97% de la producción mundial de este metal, seguido justo en siguiente posición por los 2,4 millones de toneladas (un 11,69%) producidas por Perú (Figura 2-4 y Figura 2-5).



Figura 2-3 Producción de la minería metálica en Chile por metal [12]

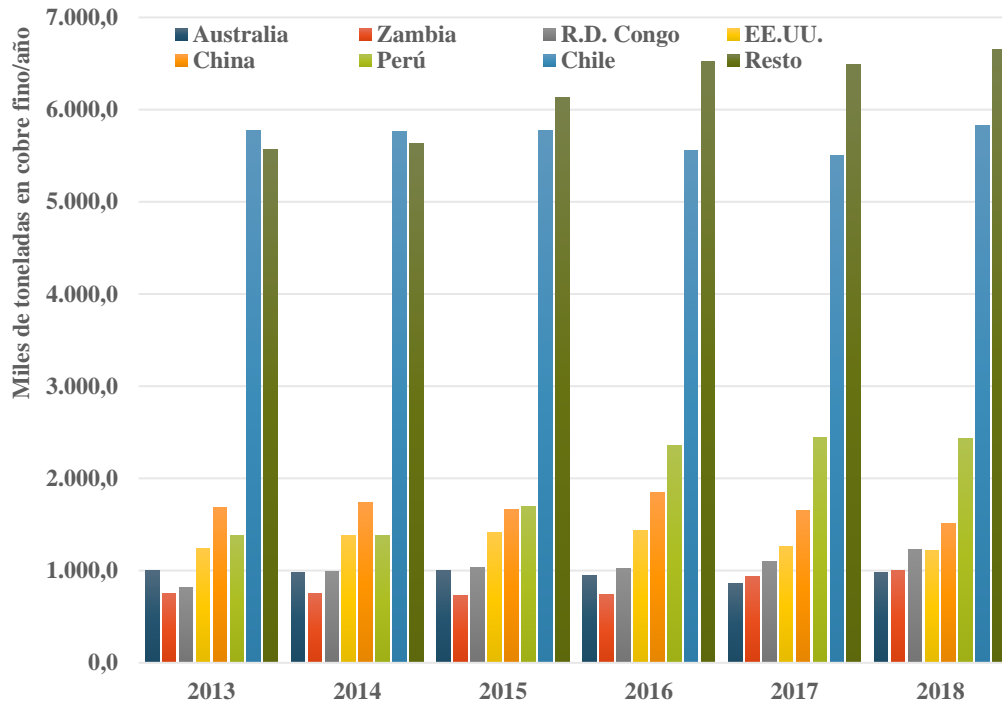


Figura 2-4 Producción global de la minería de cobre por país [12]

Estas tasas de producción convierten a la industria minera chilena en uno de los principales baluartes de la economía nacional. Si bien el valor porcentual respecto al PIB por sectores ha estado en tendencia descendente los últimos años hasta alcanzar un 10,1% en 2018 (Figura 2-6), las cifras totales de la recaudación tributaria del sector se han mantenido estables en torno a los 55 mil millones de dólares por año.

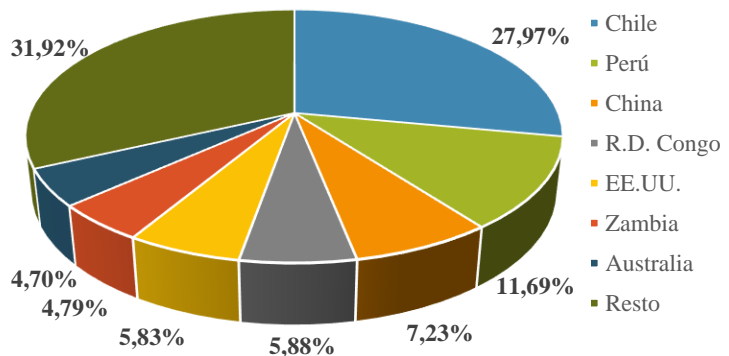


Figura 2-5 Participación en la producción global de la minería de cobre por país en el año 2018 [12]

Por otra parte, en cuanto a las exportaciones chilenas, más de la mitad de las mismas, esto es, más de 40 mil millones de dólares anuales (un 55% del total), corresponden a la producción minera metálica (Figura 2-8). Dentro de las mismas el cobre es el metal de mayor exportación y con una diferencia abismal con el segundo (Figura 2-7).

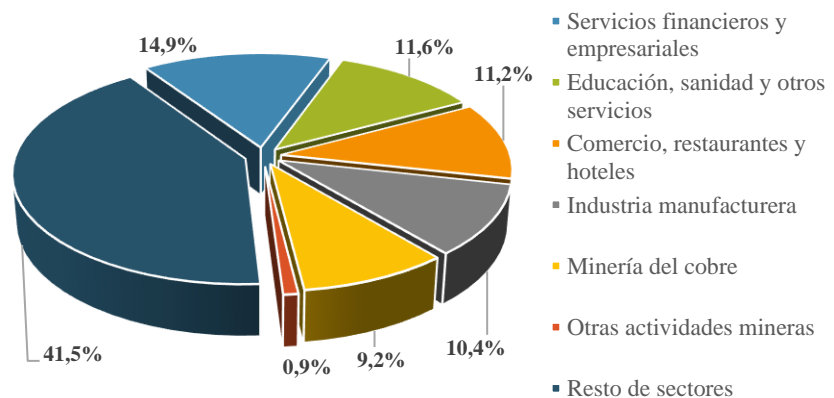


Figura 2-6 Participación en el PIB por sectores en Chile en el año 2018 [12]

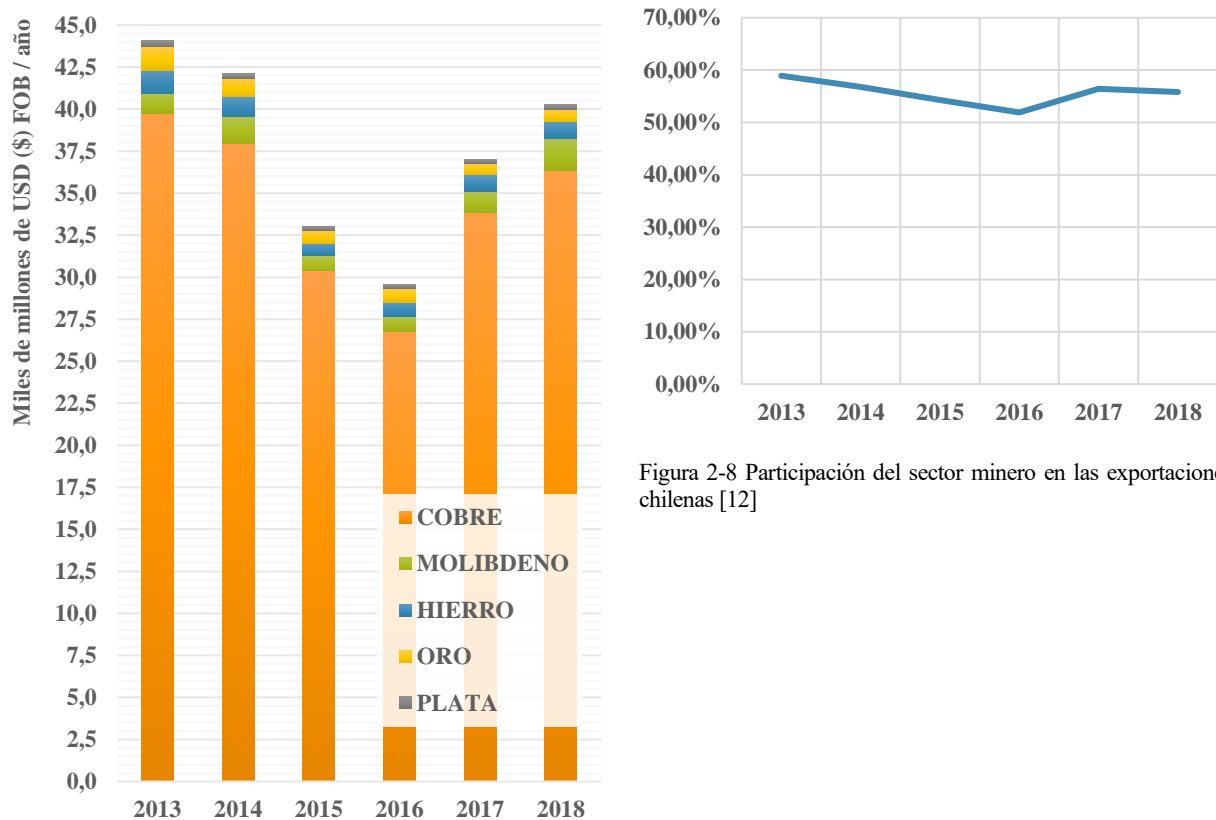


Figura 2-7 Valor de las exportaciones por metal realizadas por el sector minero chileno [12]

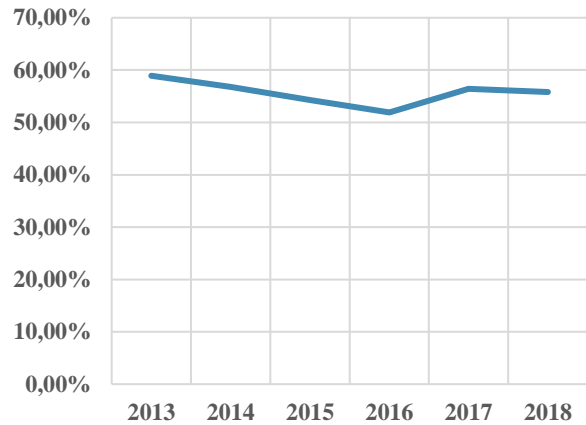


Figura 2-8 Participación del sector minero en las exportaciones chilenas [12]

2.1.4 Uso de recursos del sector minero en Chile: el agua

En lo concerniente a este estudio, los datos técnicos recogidos a continuación se cernirán exclusivamente en torno al agua como parte de la minería, esto es, a información cuantitativa que refleje la realidad del uso de este recurso en el sector minero chileno: abastecimiento, consumos, reutilización...

En Chile se hace un registro de la disponibilidad de los acuíferos superficiales y subterráneos. En el primer caso, del caudal apto a entregar con el derecho de aprovechamiento. Según el seguimiento, a medida que se va hacia el sur del país la disponibilidad crece. Aunque el agua se considera de dominio público, se otorgan concesiones para su uso. En ese sentido, se puede diferenciar:

- Uso consuntivo: es aquel al que no se le requiere que, una vez empleada, se retorne el agua al medio de donde se ha captado o no en las mismas condiciones que se extrajo.
- Uso no consuntivo: es aquel al que se le exige que el agua utilizada se retorne posteriormente al medio de donde se obtuvo, como suele ser el caso de los usos ambientales, energéticos, recreativos o de navegación.

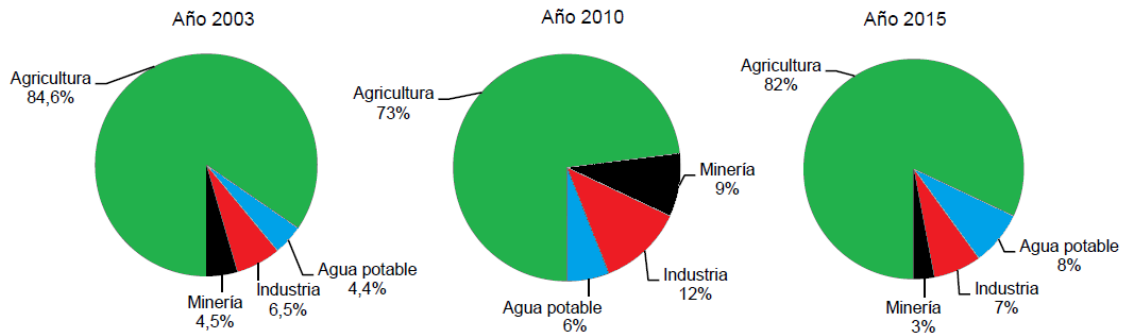


Figura 2-9 Uso consuntivo de aguas en Chile [2]

Como ya se mencionó anteriormente y se puede apreciar en la Figura 2-9, el sector minero es estigmatizado en términos de consumo abusivo del agua, ya que el agrícola acapara un porcentaje bastante mayor que todo el resto de sectores junto.

Una de las formas relativamente nuevas de abastecimiento es la del agua de mar, ya sea desalada o no. El consumo de agua marina en Chile, ya sea humano, agrícola, industrial o minero, se nutre fundamentalmente de los tratamientos de desalación por osmosis inversa (Tabla 2-3). Además, se emplean con menor frecuencia tecnologías térmicas, de destilación y de intercambio iónico. Una de las desventajas de la desalación es su gran consumo de energía. Esto es debido no solo al consumo del tratamiento del agua, sino también al bombeo desde el nivel del mar hasta las zonas de gran altitud donde se encuentran numerosas instalaciones mineras (Figura 2-10). Por si no fuera suficiente, a todo esto, hay que añadir que estos procesos se llevan a cabo en áreas que normalmente no cuentan con una alta disponibilidad de energía.



Figura 2-10 Mapa de las instalaciones desaladoras (●) en Chile a fecha de 2016 (IDE, 2017, Dirección General de Aguas)

Tabla 2-3 Instalaciones desaladoras construidas y proyectadas en Chile, 2016 [2]

MACROZONA	REGIÓN	NOMBRE	COMPAÑÍA	CAPACIDAD (L/s)	USOS	ESTADO (EN 2016)
Norte	XV	Arica	Aguas del Altiplano	412,0	Potable	En operación
		Pampa Camarones	Minera Pampa Camarones	---	Cobre	En operación
	I	Bullmine	SCM Bullmine	150,0	Yodo	Aprobado
		Quebrada Blanca Fase 2	Teck	1300,0	Cobre	Factibilidad
		Comité Caleta Chanavayita	Dirección de Obras Hidráulicas	9,3	Potable y rural	En operación
		Eloísa	Eloísa S.A.	200,0	Yodo	Aprobado
		Tocopilla	Aguas Antofagasta S.A.	200,0	Potable	En calificación
	II	RT Sulfuros	Codelco Norte	1630,0	Cobre	En calificación
		Mantos de la Luna	Mantos de la Luna	8,7	Cobre	En operación
		Michilla	Minera Michilla (Antofagasta Minerals)	75,0	Cobre	En operación
		Esperanza	Minera Centinela (Antofagasta Minerals)	50,0	Cobre	En operación
		Agua Desalasa Antucoya	Minera Antucoya (Antofagasta Minerals)	20,0	Cobre	En operación
		Agua de Mar Encuentro	Antofagasta Minerals	20,0	Cobre	En construcción
		Homitos	Caja Compensación Los Andes	4,3	Potable	En operación
		Algorta	Algorta Norte	---	Yodo	Aprobado
		Moly-Cop	Moly-Cop Chile S.A.	4,3	Acero	Aprobado
		Sierra Gorda	Minera Sierra Gorda SCM	63,0	Cobre	En operación
		La Chimba	Aguas Antofagasta S.A.	680,0	Potable	En operación
		Sur Antofagasta	Aguas Antofagasta S.A.	1000,0	Potable	Aprobado
		Taltal	Aguas Antofagasta S.A.	5,0	Potable	En operación
		Coloso	Minera Escondida (BHP)	525,0	Cobre	En operación
		Ampliación Coloso	Minera Escondida (BHP)	2500,0	Cobre	En construcción
		Agua de Mar Lomas Bayas	Xstrata	---	Cobre	Factibilidad
		Paposo	Dirección de Obras Hidráulicas	1,4	Potable y rural	En operación
		Spence	Spence (BHP)	800,0	Minería	En calificación
		Las Cenizas Taltal - Las Luces	Minera Las Cenizas	9,3	Cobre	En operación
		Planta de Osmosis Inversa	Cementos Polpaico	4,6	Industrial	En operación
	III	Diego de Almagro	Minera Can Can	---	Cobre	Factibilidad
		Manto Verde	Anglo American	120,0	Cobre	En operación
		Cerro Negro	CAP	600,0	Hierro	En operación
		Bahía Caldera	Seven Seas Water Chile SpA	95,6	Potable	En calificación
		Minera Candelaria	Freeport-McMoRan	300,0	Cobre	En operación
		Planta Desalinizadora de Agua de Mar	Econssa Chile S.A.	1200,0	Potable	En calificación
IV	Proyecto Dominga	Andes Iron	450,0	Hierro	Factibilidad	
	Comité de A.P.R. Chungungo	Dirección de Obras Hidráulicas	5,6	Potable y rural	En operación	
Austral	XI	Islas Huichas	Dirección de Obras Hidráulicas	2,8	Potable y rural	En operación

Según datos sobre la minería del cobre chilena, la extracción de agua para el sector lleva en tendencia ascendente desde el año 2012 (Figura 2-11). Principalmente, son las fuentes de agua superficiales y subterráneas los principales focos de abastecimiento. No obstante, se observa también que, aunque a un ritmo inferior, la extracción del agua marina para la minería cuprífera chilena va creciendo. Dentro del agua marina extraída, existe actualmente paridad entre la usada como agua salobre y la desalada (Figura 2-12), de hecho, de los 3.993 L/s de agua marina extraída en 2018 el 53% correspondió a agua desalada.

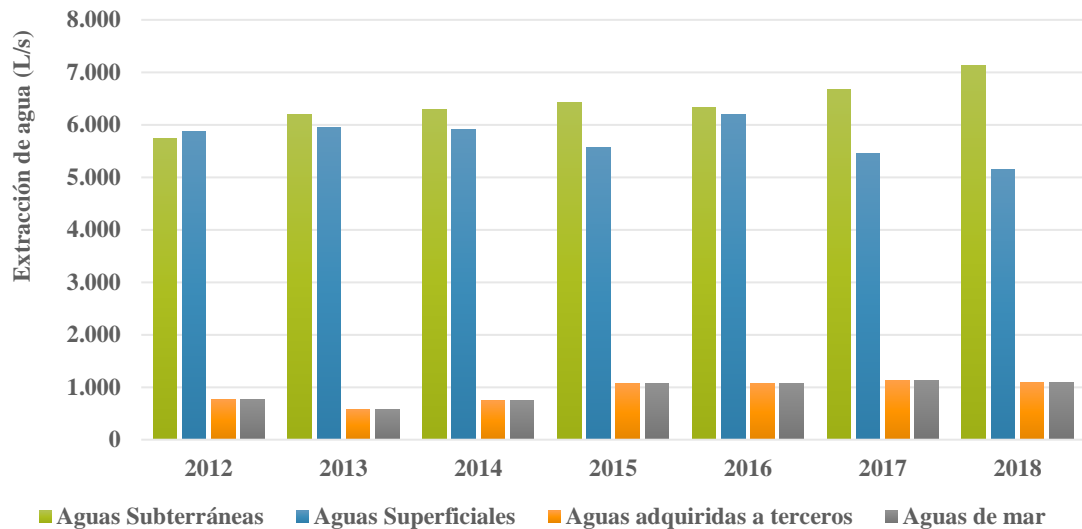


Figura 2-11 Extracción de agua para la minería de cobre chilena según fuente [12]

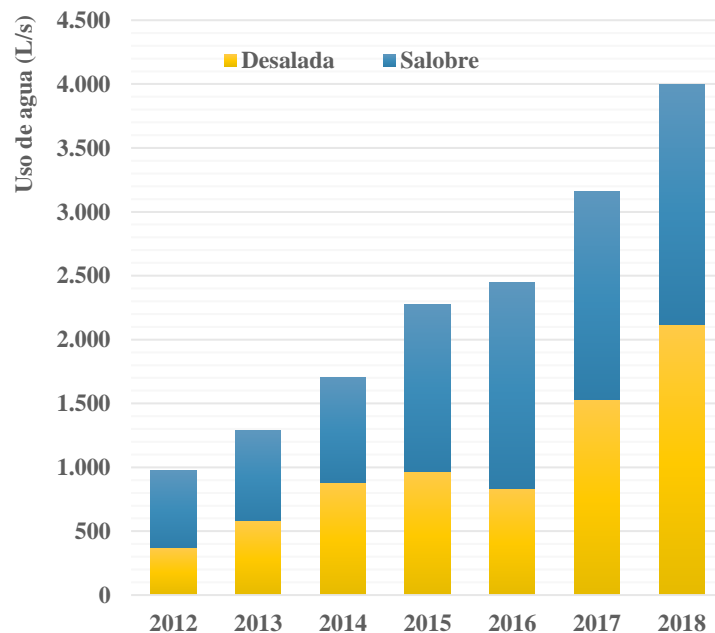


Figura 2-12 Reparto del agua marina extraída para la minería cuprífera chilena [12]

Como se verá más adelante en el apartado 3.1, se pueden definir distintas áreas de proceso y consumo de agua en la actividad minera. En base a dichas áreas de proceso, la magnitud en el consumo por proceso se podría discernir tres escalas (Figura 2-13). La primera, la cual representa en torno a dos tercios del total, sería la del área de concentración. En un segundo rango, con en torno a un 13% cada una, están el área de hidrometalurgia y servicios/otros. Por último, con apenas participación en el total, se sitúan las áreas de mina, fundición y refiniería y venta. Sin embargo, desde un punto de vista del aprovechamiento real del recurso, es interesante analizar a qué cantidad de cobre procesado equivalen los datos de consumo de agua (Figura 2-14) y qué cantidad del agua es recirculada (Figura 2-15), práctica minera que viene siendo habitual desde hace más de 10 años en Chile.

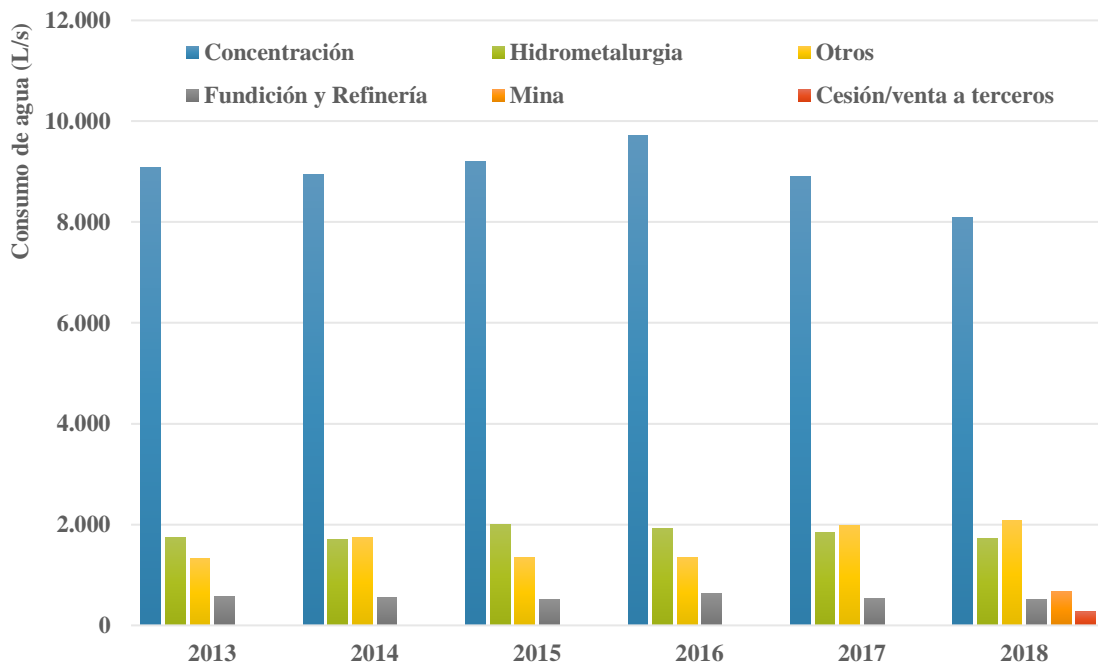


Figura 2-13 Consumo de agua en la minería de cobre chilena por proceso [12]

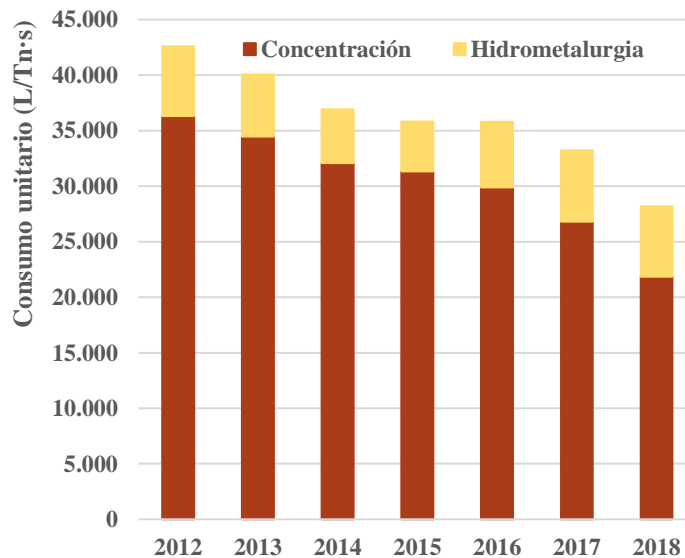


Figura 2-14 Consumo de agua (continental) por unidad de cobre procesado en Chile [12]

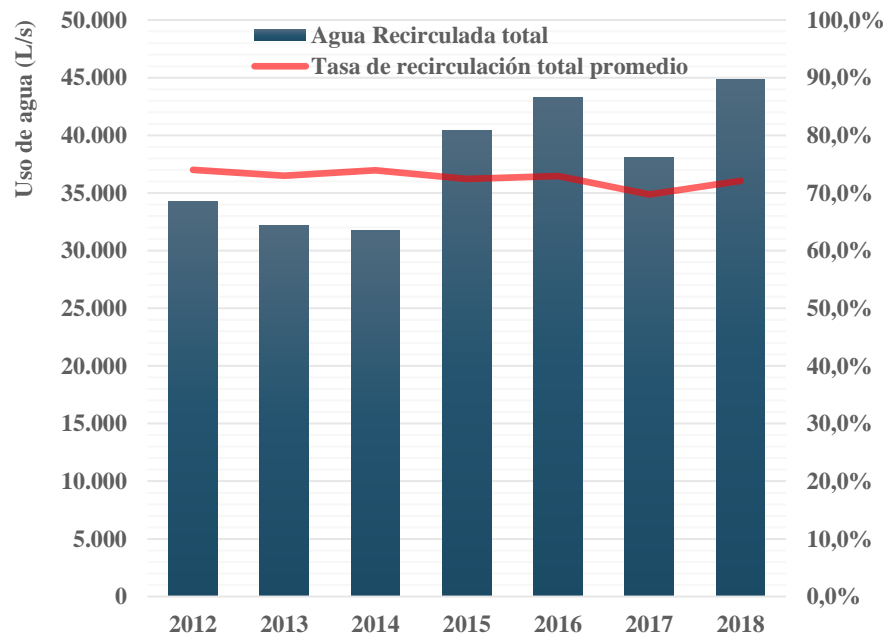


Figura 2-15 Tasas de agua reciclada en la minería de cobre en Chile [12]

Finalmente, para terminar este análisis técnico de los datos de recorrido del agua a través de la industria minera chilena, cabe evaluar la proyección de demanda de agua que los modelos prevén para el sector en años venideros (Figura 2-16).

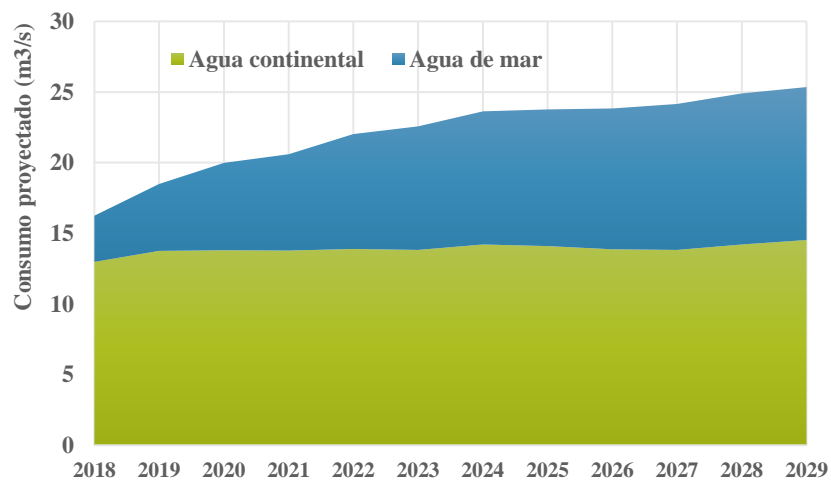


Figura 2-16 Proyección de la demanda de agua en la minería de cobre en Chile hacia 2029 [13]

Podemos analizar que se espera una demanda de 14,53 m³/s para 2029, lo que supone un aumento del 12% respecto a 2018 y una tasa de crecimiento anual promedio de consumo de 4,2%. Esto es debido, por una parte, al cambio en la matriz de producción, la cual está girando cada vez más hacia los minerales de sulfuros, cuyo procesamiento mediante flotación requiere de mayores cantidades de agua. Por otra parte, el descenso en las leyes de los minerales extraídos implica un mayor consumo de agua para la misma cantidad de cobre fino.

Mientras que la demanda de agua continental se prevé que crezca en torno a un estable 1% promedio anual, la de agua de mar lo hará a ritmo de un 12,2% promedio anual llegando a los 10,82 m³/s en 2029 (un 230% más que en 2018). La puesta en marcha de algunas nuevas plantas de desalación y una mayor extensión de la red de tuberías son los principales baluartes en lo que se podrá apoyar dicho consumo creciente. La desalación y el uso de agua de mar está siendo la opción que un mayor número de proyectos están acogiendo para su abastecimiento.

2.1.5 Uso de recursos del sector minero en Chile: la energía

Gracias a la recolección de datos que realiza COCHILCO sobre 40 actividades de producción de cobre en el país, las cuales incluyen fundiciones y refinerías de las grandes compañías, se desarrolla una línea de investigación respecto al sector de la minería de importancia estratégica como es el estudio del consumo de energía. Las fuentes de energía de las que se abastece el sector son la electricidad, a través del Sistema Eléctrico Nacional, y los combustibles, desde el carbón o diésel hasta la leña y el butano. Su consumo queda reflejado en la Figura 2-17.

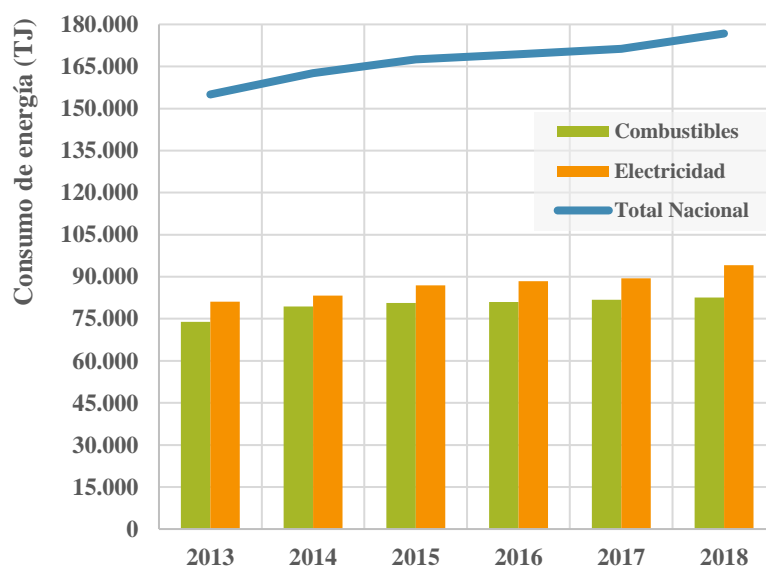


Figura 2-17 Consumo nacional de energía en la minería del cobre chilena [12]

Dentro de los procesos mineros, la etapa de concentración es la que predomina en cuanto al consumo eléctrico (55%) y la mayor consumidora de combustible (80,4%) es la etapa de mina (Figura 2-18). Es llamativo cómo la sección de servicios es responsable de un consumo mayor que el correspondiente a procesos como el refinado en cuanto a combustibles o la fundición en cuanto a energía eléctrica. Sin embargo, este fenómeno es fácilmente explicable dado que en los últimos años se han incluido los consumos de las plantas de desalinización e impulsión de agua de mar en el área de servicios.

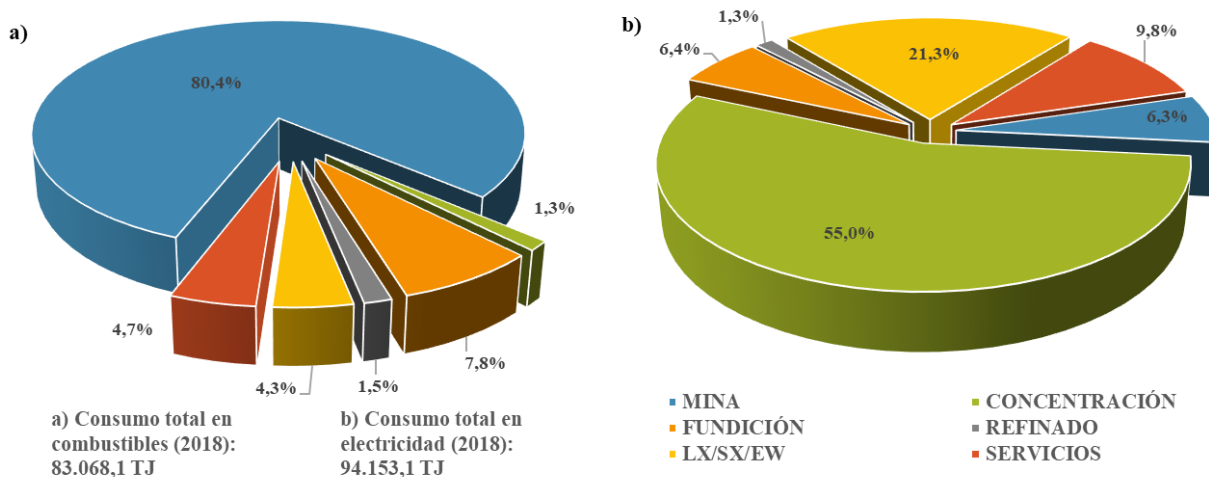


Figura 2-18 Porcentaje de consumo energético de combustibles y electricidad por proceso en la minería de cobre en Chile en 2018 [12]

Por otra parte, si se atiende al tamaño de la empresa, la gran minería chilena es la responsable de alrededor de un 95% de los consumos energéticos del sector, con cifras casi idénticas tanto en combustibles como en electricidad. El resto del gasto energético es atribuible esencialmente a las empresas privadas de mediana minería, ya que la pequeña minería o, incluso, la mediana minería estatal apenas alcanza un 1% del consumo. Pese a ser los mayores consumidores, según datos de la encuesta sobre recursos realizada por COCHILCO en 2017, el tamaño de la producción, y por ende el tamaño de la empresa, es sinónimo de un aumento en la eficiencia del uso de esa energía (Figura 2-19).

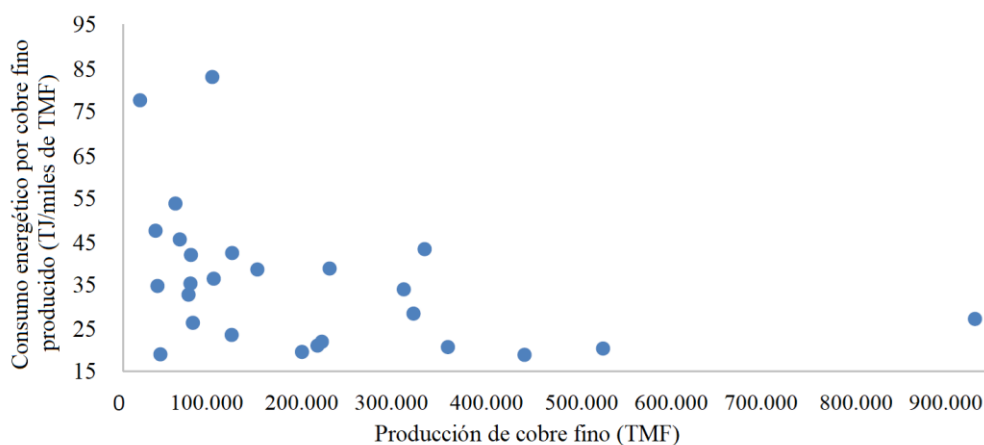


Figura 2-19 Eficiencia en el consumo energético por unidad de producción de cobre fino en empresas chilenas en el año 2017 [14]

2.2 La Minería en Ecuador

La situación minera en la República del Ecuador es ciertamente distinta a la de Chile. A grandes rasgos, la minería ecuatoriana se podría definir como artesanal, emergente y convulsa. Su principal recurso: el oro. Sus grandes problemas: la falta de regularización y aplicación de leyes mineras y la contaminación de acuíferos generada por el mercurio y el cianuro. Asimismo, el acceso a datos cuantitativos que ayuden a definir mejor esta realidad es escaso, como cabe esperar en este contexto. Antes del 2017, unas 790.000 hectáreas de tierra ecuatoriana estaban concedidas para su exploración y explotación minera, lo cual representaba un 3% del territorio nacional (Figura 2-20). Las áreas de actividad minera estaban mayormente concentradas en las provincias del sur del país, con una mayor herencia minera: El Oro, Azuay, Loja y Zamora Chinchipe. En 2003 en Ecuador el número total de mineros artesanales de oro rondaba los 100.000 [15]; solo en la provincia de El Oro los dependientes directa e indirectamente de este tipo de minería eran más de 20.000 en 2011 [16]. A partir de 2017, se otorgaron una serie de nuevas concesiones que aumentaron dicha cifra hasta alrededor de los 3,7 millones de hectáreas (un 13% del territorio ecuatoriano), entre las que se pueden encontrar tierras y bosques protegidos, zonas de gran biodiversidad y valor ecológico y áreas de población indígena [17].

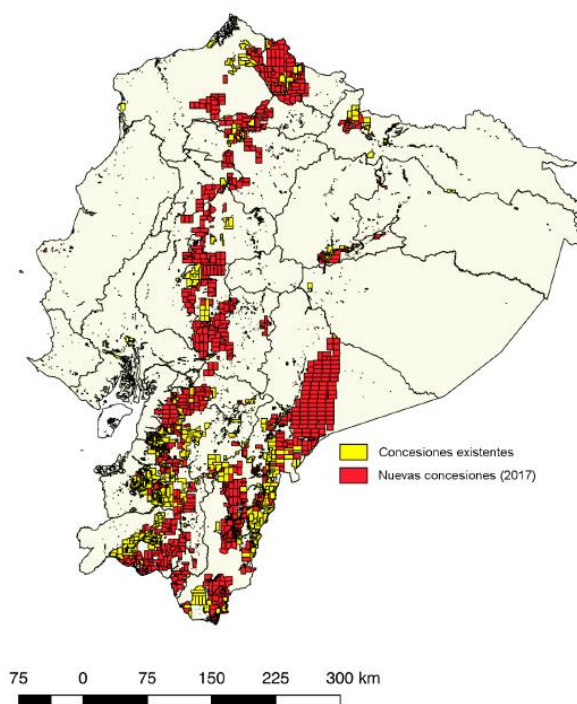


Figura 2-20 Mapa de las concesiones mineras en Ecuador antes y a partir del 2017 [17]

2.2.1 Evolución de la minería en Ecuador y controversia actual

Las provincias del sur de Ecuador, como El Oro o Loja, comprenden la zona minera más antigua de Ecuador. La actividad de dicho sector ha estado contribuyendo al deterioro del estado de los recursos hídricos, el suelo y el aire, lo cual ha desembocado en última instancia en graves problemas en la salud de las comunidades de la región. Históricamente, la minería en Ecuador ha evolucionado a lo largo de tres fases: la etapa precolombina, la etapa colonial y la etapa republicana.

Sobre la extracción del oro y la plata durante la primera existe poca información. Tras la llegada de los españoles a la región de El Oro, y una vez sacada a la luz la abundancia de los recursos auríferos de la provincia, el capitán Alonso de Mercadillo levantó en 1549 el asentamiento minero de Zaruma. Al inicio, destacaban las minas que rodeaban el cerro del Calvario en Zaruma, como la de Pillacela, Miranda, El Sesmo o Viscaya. En el área de Portovelo se promovía la extracción de oro de la arena del río Amarillo y minas como la de Portovelo, Abundancia o Cantabria. El siglo XVII puso fin al apogeo de la extracción minera española. La mano de obra, la cual era fundamentalmente aborigen, disminuyó, así como lo hicieron las minas poco profundas, lo cual llevó al decaimiento. De aquella época apenas quedan restos en la actualidad, pues la mayoría fueron abandonadas o sepultadas.

El paso a la época republicana supuso la llegada de una de las pioneras la explotación mineral en la provincia de El Oro: la Great Zaruma Gold Mining Company Co. Las labores mineras en la región eran complejas debido al difícil relieve de la zona, el cual complicaba el transporte de maquinaria pesada desde el puerto de Guayaquil. En el año 1897, la empresa Southern American Development Company (SADCO) compró Great Zaruma e instauró la explotación aurífera a nivel industrial. Se calcula que SADCO llegó a una producción de más de 99 toneladas de oro y 450 toneladas de plata hasta el año 1950, cuando la empresa sale del país.

Tras la marcha de SADCO, los extrabajadores, junto al Estado ecuatoriano, se agrupan y forman la Compañía Industrial Minera Asociada (CIMA), la cual estuvo actuando sobre los depósitos mineros hasta el año 1978. El fin de CIMA supuso el paso a la minería artesanal. Los extrabajadores de CIMA pasaron a crear y organizar algunas cooperativas, basadas en relaciones de confianza mutua. A estas alturas, el mercurio ya se usaba para extraer el oro por amalgamación. No obstante, el sector de la minería artesanal iba cogiendo fuerza hacia los años 90 y fue entonces cuando empezaron a surgir nuevas organizaciones de tipo industrial y se cambió el marco legal de las mismas. En este nuevo periodo se incorporó a los procesos la técnica de la recuperación de oro por cianuración. El resultado para el sector fue un aumento en los beneficios y una disminución de desechos y residuos nocivos para el medioambiente [18].

Cuando el presidente Correa llegó al poder en 2007, inició el conocido como *Diálogo Minero*. Este proceso consistió en grupos de trabajo multilaterales con diferentes actores involucrados en la minería, y se completó con una serie de medidas y acciones, entre las que destacan:

- Aprobación de la Ley de Minería de 2009.
- Creación de la Empresa Nacional Minera (ENAMI), con el objetivo de desarrollar un cambio en la matriz energética.
- Creación de un censo de las explotaciones mineras.
- Elaboración de un Plan de Regularización de la Minería Artesanal a Nivel Nacional (PREMAN).
- Creación de planes de manejo ambiental para el uso del agua y para la obtención de concesiones cedidas por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA).
- Creación de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM)

La idea era convertir Ecuador en un país con minería a gran escala. Así, estas leyes y medidas respaldaban los megaproyectos y aseguraban su futuro. Gracias a estas nuevas actuaciones se regularizó el sector y, además, implicó la acción combinada de instituciones nacionales y locales frente a la actividad de la minería ilegal. Los diferentes actores reconocieron la intención de reforzar el control sobre asuntos socioambientales, el interés del estado en la distribución de beneficios y la regularización de la situación minera artesanal y a pequeña escala, aunque existían preocupaciones sobre las implicaciones de esta ley en términos de atraer inversión extranjera para desarrollar proyectos a gran escala. Pese a todos estos esfuerzos, las actividades continuaron ejecutándose en mayor medida de manera informal hasta el día de hoy [18], [19].

Los métodos del procesado del mineral han ido cambiando también a lo largo de las tres etapas. En la época precolombina se explotó fundamentalmente minas poco profundas, además de recuperar el oro en las arenas del río Puyango. Ya en la época colonial, se perforaba y explotaba el cuarzo aurífero de modo manual. Se daba el empleo de herramientas como el pico, la cuña o la carretilla, lo cual permitía unos bajos rendimientos. El mineral se machacaba hasta unos manejables 5 cm de espesor. Luego en un molino hidráulico se trituraba las piedras, recuperándose una cantidad muy pequeña de oro.

Al comenzar el siglo XVII se integró la técnica de empleo del azogue o mercurio para optimizar la recuperación de oro. A la salida de la etapa de trituración se añadieron unas canaletas largas de 8 m de longitud en las que se colocaban unas bayetas donde circulaba una mezcla de agua y la arena aurífera. Las bayetas absorbían la arena por sedimentación y luego se exprimían en cajas de hormigón, drenándose el agua y solidificando la arena. Después, la arena se introducía en depósitos especiales, donde se combinaba con el mercurio que atrapaba el oro en forma de perlas. Finalmente, tras la evaporación del mercurio, el oro quedaba en forma de polvo. El producto nunca superaba los 18 quilates, debido al contenido en impurezas y trazas metálicas.

En la época republicana, los procedimientos y tecnologías utilizados por SADCO, CIMA y las demás empresas y asociaciones de mineros fueron bastante similares. Cabe destacar la introducción del molino chileno por parte de las asociaciones. La extracción en las vetas se subdividió en explotación del cuarzo, molienda del cuarzo y extracción en las plantas de procesado. Los frontones servían para el acceso a las vetas incrustadas en tierra desde la superficie. Para la producción de cuarzo era muy común el empleo de explosivos como el nitrato de amonio o la dinamita. Se realizaban perforaciones de 120x180 cm, con pendientes iguales o mayores del 2%, lo que permitía transportar el agua infiltrada por gravedad a los sitios de bombeo. Ya en las plantas de procesado se empleaban sistemas de 40 pisones metálicos hidráulicos para reducir el cuarzo a espesores de $\frac{3}{4}$ ” y obtener barras de plata y oro.

La minería artesanal, la cual apareció en la década de los años 80 como consecuencia de la pobreza y el desempleo, se lleva a cabo mediante técnicas convencionales. Estas aprovechan la densidad del metal para realizar la separación de los sedimentos por concentración gravimétrica. La técnica de amalgamación con mercurio es llevada a cabo por los mineros artesanales menos desarrollados de manera manual, mientras que los más desarrollados emplean placas, tromeles y cribas. El mercurio y el oro se separan al aire libre mediante destilación por calor.

A partir de los años 80, el uso de perforadoras de gasolina mejoró el avance de las excavaciones. Asimismo, los compresores de ventilación, los molinos chilenos y de bola y los martillos neumáticos permitían mayor profundidad en las perforaciones subterráneas. Por último, ya en los años 90, se comenzó a introducir los carros y vagones eléctricos y los procesos de cianuración, técnicas que aun siguen activas, y que permitieron mejorar los resultados de la recuperación de oro [19].

En la actualidad el fenómeno de la minería aurífera artesanal y pequeña escala en Ecuador gira en torno a dos controversias fundamentales. Aunque es cierto que este tipo de minería realmente sirve de sustento económico a las pobres comunidades locales, tiene inherentemente un elemento negativo por la afectación que supone a las condiciones de vida en los asentamientos mineros. Para los mineros, la extracción del oro es una fuente esencial de ingresos para su subsistencia, ya que existe una falta de empleo en estas zonas. Sin embargo, estos trabajadores, entre los que se incluyen mujeres y niños, se exponen de manera continua a peligros físico-químicos, trastornos por ruido y contaminación acústica y a la probabilidad de desprendimientos y corrimientos de tierras [19].

Por otra parte, el asunto que ocupa la mayor preocupación de estas personas es el carácter informal y la falta de regulación de sus actividades. Este hecho genera constantes conflictos. En el sector de la minería pequeña y artesanal en Ecuador se da el fenómeno de lo que se podría denominar como “sistemas legales enlazados”, esto es, el sector está regulado por un marco plural de leyes adscritas a diferentes organismos (estado, comunidades, locales...). Esto conlleva, entre otras cosas, el rechazo/aceptación de las actividades mineras ilegales por parte de los propietarios de los derechos de explotación en sus propias concesiones, el rechazo/aceptación por parte de los propietarios de las plantas de procesamiento a tratar mineral procedente de la minería ilegal, proveedores informales o ilegales de materiales mineros (mercurio, cianuro, dinamita...), comercio ilegal de oro dictando el precio local del mismo... En resumen, corrupción a todos los niveles y formas.

Las compañías de gran (más de 1.000 t de mineral procesado por día) y mediana escala (300-1.000 t/d) juegan con ventaja en cuanto a demandas legislativas y pago de tasas y cánones. No hay un límite superior de volumen de producción permitido para clasificar a los pequeños mineros. Asimismo, las grandes explotaciones se evaden de tal categorización ya que reportan menos de 300 t de mineral procesado por concesión, mientras extraen de varias concesiones al mismo tiempo. Por ello existe una discrepancia importante entre el reporte y la cifra real del nivel de producción porque las autoridades tampoco cuentan con medios efectivos de monitorización y control de la producción, lo que permite a grandes empresas hacerse cargo de los mismos impuestos que una explotación pequeña artesanal [20].

Además, existe una gran percepción pública de que los derechos mineros son concedidos a entidades extranjeras, las cuales se llevan los mayores beneficios y generan el mayor impacto pernicioso en estas regiones, siendo finalmente los pequeños mineros los que se tienen que hacer cargo de las consecuencias en la que consideran legítimamente *su* tierra. Como resultado, se ha dado el caso de la creación de algunos movimientos radicales y conflictos contra los grandes proyectos mineros en defensa de la minería artesanal [19].

2.2.2 Proyectos actuales en la minería de Ecuador

A continuación, se muestra un resumen de los proyectos mineros, principalmente de gran escala, considerados como estratégicos (Tabla 2-4) actualmente y de segunda generación (Tabla 2-5) que se están desarrollando a fecha del tercer trimestre 2018 en Ecuador.

Tabla 2-4 Situación de los proyectos mineros estratégicos de Ecuador, 2018 [21]

PROYECTO	COMPAÑÍA	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Río Blanco	Ecuagoldmining S.A.	Cuenca, Azuay	Proyecto de gran escala para la producción de oro y plata, con una inversión total estimada de 88,8 millones de USD y una proyección de exportaciones equivalentes desde 2018 hasta 2022 de 635,6 millones de USD.
Fruta del Norte	Aurelian Ecuador S.A.	Yantzaza, Zamora Chinchipe	Proyecto de gran escala para la producción de oro, con una inversión total estimada de 1.240 millones de USD y una proyección de exportaciones equivalentes desde 2019 hasta 2034 de 6.282 millones de USD.
Mirador	Ecuacorriente S.A.	El Pangui, Zamora Chinchipe	Proyecto de gran escala de mina de cielo abierto con un valor de producción objetivo para 2021 de 21 millones de toneladas anuales, siendo la inversión total estimada de 2.015 millones de USD y la proyección de exportaciones equivalentes desde 2019 hasta 2040 de 22.186 millones de USD.
Loma Larga	INV Minerales Ecuador S.A.	Cuenca, Azuay	Proyecto de gran escala de mina subterránea para la producción de oro, plata y cobre, con una inversión total estimada de 432 millones de USD y una proyección de exportaciones equivalentes desde 2021 hasta 2032 de 2.330 millones de USD.
San Carlos Panantza	ExplorCobres S.A.	San Juan Bosco y Limón Indanza, Morona Santiago	Proyecto de gran escala de mina de cielo abierto, siendo la inversión total estimada de 3.032 millones de USD.

Tabla 2-5 Situación de los proyectos mineros de segunda generación de Ecuador, 2018 [21]

PROYECTO	COMPAÑÍA	UBICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Cascabel	Exploraciones Novomining S.A.	Ibarra, Imbabura	Proyecto a gran escala, sin método de extracción todavía definido, del cual se espera pueda llegar a ser una de las mayores minas de cobre y oro de Latinoamérica. Entre 2012 y 2017 se han invertido 44,9 millones de USD.
Cangrejos	Odin Mining Ecuador S.A.	Santa Rosa, El Oro	Proyecto a gran escala para la extracción de oro y cobre, sin método de extracción todavía definido. Entre 2014 y 2017 se han invertido 2,3 millones de USD.
Ruta del Cobre	Compañía Minera Ruta del Cobre	Cuenca, Azuay	Proyecto a gran escala para la extracción de oro y cobre, sin método de extracción todavía definido. Entre 2014 y 2017 se han invertido 10,9 millones de USD.
Llumirahua	ENAMI y CODELCO	Cotacachi, Imbabura	Proyecto a gran escala sin método de extracción todavía definido. Entre 2013 y 2017 se han invertido 18,2 millones de USD.
Curipamba	Curimining S.A.	Naves, Bolívar	Proyecto de pequeña minería, sin método de extracción todavía definido. En 2018 se han invertido 5 millones de USD.
La Plata	Compañía Minera La Plata S.A.	Sigchos, Cotopaxi	Proyecto de pequeña minería, sin método de extracción todavía definido. En 2018 se han invertido 396,8 millones de USD.

2.2.3 Datos económicos de la minería de Ecuador

A día de hoy, la industria de explotación de minerales metálicos no representa uno de los principales valores en el PIB de Ecuador. Entre la década comprendida entre 2007 y 2017, este sector pasó de ser responsable de un 0,17% del mismo a serlo de un 0,32%, lo que supone un leve incremento, pero insuficiente como para ser considerado un área estratégica de la economía ecuatoriana. Sin embargo, de esta dependencia se espera un cambio brusco una vez los proyectos estratégicos comiencen a desarrollar de manera estable su actividad productiva, esto es, a partir de 2020.

La producción de oro ha sufrido ciertos altibajos en la última década (Figura 2-21). Desde 2011 se tenía una tendencia ascendente que llegaba a su máximo con más de 8.000 kg de oro producidos. Pero a partir de 2013, la situación se revertía debido al control más estricto de la ARCOM sobre las pequeñas compañías mineras y la entrada de oro de contrabando procedente de otros países como Perú. Así, el último dato, registrado en 2017, dejaba una cifra de 6.176 kg producidos.

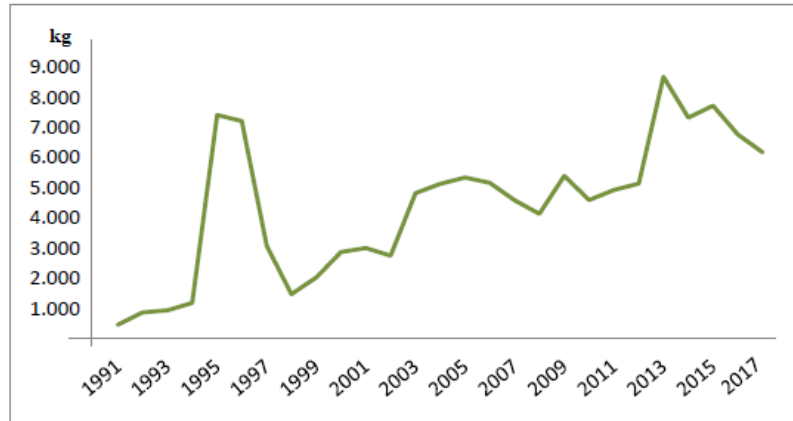


Figura 2-21 Producción anual de oro en Ecuador [21]

Las exportaciones de metales preciosos, o sea, oro, principalmente, y plata, siguió una línea paralela a la de la producción. Contando a ambos, se alcanzaba en 2014 un máximo de 1.003,6 millones de USD FOB en exportaciones (un 3,9% del total de las exportaciones nacionales). Posteriormente, se pasó a un descenso hasta fechas actuales, cifrándose en 5.094 los kilogramos de oro exportados en 2017, por un valor de 167,6 millones de USD FOB (un 0,77% del total). Esto no es más que otro reflejo de que las acciones de ARCOM por regular y manejar mejor los aspectos informales e ilegales de la minería pequeña y artesanal y el contrabando están dando sus frutos.

3 EL AGUA EN LOS PROCESOS MINEROS

En este capítulo se pretende realizar una caracterización de los efluentes que pueden generarse en una instalación minera, cualquiera que sea el proceso que se desarrolle en la misma. El objetivo es ofrecer información sobre un abanico amplio de circunstancias, aunque siempre haciendo especial hincapié en las actividades extractivas de cobre y oro en los países de Chile y Ecuador.

Cabe destacar el catálogo de efluentes mineros que se ha elaborado en este capítulo, como resultado de una amplia revisión bibliográfica de numerosos casos documentados de contaminación de corrientes y acuíferos por parte de la industria minera alrededor del mundo.

3.1 Proceso minero: consumo y contaminación

Típicamente, las distintas áreas de los procesos mineros (Figura 3-1) pueden definirse como se indica seguidamente [2]:

- Área mina: consiste en aquellas instalaciones pertenecientes a una mina subterránea o a cielo abierto, hasta la etapa de traslado del material hacia la molienda primaria. En esta área el agua se emplea para la eliminación del polvo en suspensión en caminos, en ocasiones procedente de la extracción y bombeo subterráneo también.
- Área de planta concentradora: involucra el procesado de minerales, consistente en molienda, flotación, clasificación y espesado. Se puede dar la recirculación de los efluentes residuales o no al proceso, según la distancia existente entre la sección de concentrado y filtrado y la de almacenaje. Tras la flotación, una fracción del agua empleada pasa a formar parte de los relaves. Después, en el espesado, se recupera de los mismos parte del agua y se puede recircular. Esta área tiene unida la mayor cantidad de agua consumida en relación al volumen total.
- Área de planta hidrometalúrgica: incluye los procesos de extracción por solventes, lixiviación en pilas y electroprocesado para la producción de cátodos. El gasto principal es resultado del agua evaporada en la superficie de las pilas, bañadas con una solución de agua y ácido sulfúrico. La solución actúa infiltrándose en la pila y disolviendo el cobre de dentro de los minerales oxidados.
- Fundición y refinación: para obtener los ánodos se empieza por un concentrado seco (proceso pirometalúrgico) y se generan placas gruesas. Dichos ánodos se comercializan directamente o pasan por una etapa de refinación en celdas electrolíticas que contienen una solución de ácido sulfúrico. Al aplicar una corriente eléctrica, se disuelve el cobre anódico y este se deposita en el cátodo inicial. Se crean cátodos de alta pureza.
- Área de servicios y otros: consiste en los volúmenes de consumo de pequeña magnitud relativa en comparación al global consumido en el proceso minero, esto es, bebida, cocinado, lavados, servicios higiénicos y riego en las instalaciones. También se incluyen, además de otros consumos, las plantas de molibdeno en operación.

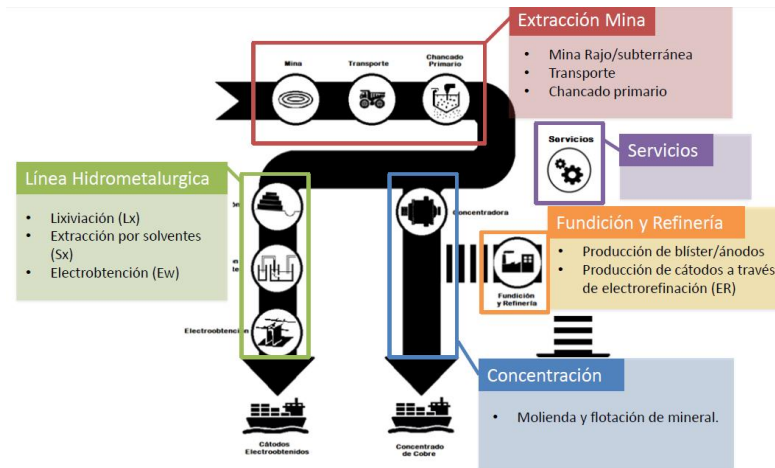


Figura 3-1 Etapas del procesamiento minero [14]

Cada una de las etapas de procesamiento del mineral anteriores se considera un punto de consumo y contaminación del agua de proceso, aunque hay que tener claro que no todas consumen y contaminan en la misma magnitud. Finalmente, esa agua pasa a formar parte de un efluente residual, ya sea como parte de un almacén de relaves o vertido a una corriente o acuífero, el cual es objeto de estudio del presente trabajo.

En las plantas metalúrgicas a pequeña escala, como sucede en los numerosos casos en las explotaciones mineras auríferas en Ecuador, los ríos drenan estas instalaciones. Durante el procesado, para la extracción del metal se lleva a cabo una recuperación combinando el empleo de mercurio para la amalgamación y el cianuro para la lixiviación. Los desechos mineros se guardan en estanques de relaves, los cuales pueden o no estar revestidos, o se descargan directamente a arroyos.

3.2 Relaves

Los relaves son una mezcla de la roca finamente molida que queda tras la recuperación de los metales de valor y el agua de proceso. Se encuentran volúmenes considerables de relaves a cielo abierto en muchos países donde las regulaciones ambientales no se cumplen estrictamente. La naturaleza química y física de las partículas de relaves puede compararse con la arena y el limo típicos de los ríos y sus propiedades están determinadas por la naturaleza del mineral, la geoquímica, el método de procesamiento utilizado para extraer el mineral, el tamaño de partícula del material triturado y el tipo de proceso químico utilizado en la extracción del mineral.

Los relaves de las minas se caracterizan por propiedades físicas pobres, como agregación deficiente, alta conductividad hidráulica, textura fina y capacidad de cohesión muy limitada. Estas propiedades hacen que los relaves sean diferentes del suelo y la falta de cohesión es responsable del variado contenido de humedad y temperatura que se observa en estos desechos tóxicos. Químicamente, los relaves suelen contener hasta un 6% de pirita, alta salinidad, son nutricionalmente deficientes con bajos contenidos de materia orgánica. El alto contenido de sulfuros da como resultado una alta acidez y altas concentraciones de metales en el agua subterránea cerca de los relaves. Los rasgos característicos de los relaves de una mina como la aurífera son las concentraciones elevadas de metales pesados tóxicos, como arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb), cobre (Cu), zinc (Zn), cobalto (Co) y mercurio (Hg). La mayor fracción del total de metales pesados puede existir como silicatos, los cuales son de acceso limitado para la vida microbiana.

La contaminación ambiental de las minas se asocia principalmente a la liberación de elementos nocivos de los relaves y otros desechos mineros. La infiltración de agua a través de pilas y estanques de relaves que contienen sulfuro, trabajos superficiales y subterráneos, desechos y rocas de desarrollo conduce a la lixiviación de grandes volúmenes de metales como zinc, níquel, plomo, cadmio, arsénico y de iones de sulfato en los ecosistemas de ríos y corrientes. Esto da como resultado un drenaje ácido de mina (AMD) con un efecto perjudicial severo en los cuerpos de agua receptores. La contaminación por metales pesados y el drenaje ácido de las minas es una preocupación ambiental muy importante donde los materiales de desecho que contienen sulfuros ricos en metales de la actividad minera han sido almacenados o abandonados. Los relaves y vertederos de rocas están asociados con los impactos superficiales que afectan en gran medida la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Los impactos subterráneos son causados por la afluencia de agua en las labores subterráneas y el subsiguiente desagüe del acuífero.

Cabe destacar como fuente de contaminación ambiental de las minas de oro los productos químicos utilizados en el procesamiento del oro. Un tercio de este valor estimado sale al aire y el resto se mezcla en montones de relaves, tierra y vías fluviales. El mercurio de la amalgama también puede liberarse al medio ambiente como resultado del reprocesamiento de algunos antiguos vertederos de relaves de oro. El método de extracción de cianuración por lixiviación también da lugar a la emisión de cianuro de hidrógeno y la producción de grandes cantidades de relaves, una fuente potencial de metales pesados debido a la extracción de minerales de bajo grado [22].

3.3 Ejemplos de efluentes mineros por composición

Son numerosos los estudios realizados sobre los impactos que diferentes explotaciones mineras generan sobre su entorno. Dichos estudios varían en cuanto al aspecto del entorno afectado por la actividad minera: el suelo, el agua, la fauna, la salud de la población, etc. Igualmente, los focos mineros estudiados abarcan la práctica totalidad de minerales, tipos de procesos y localizaciones. Uno de los objetivos del presente trabajo era realizar una revisión bibliográfica lo más amplia posible para ofrecer una muestra representativa de todos esos datos recabados en las distintas investigaciones a modo de ‘catálogo de efluentes mineros’, el cual se detalla en las siguientes páginas. Para su elaboración se han revisado alrededor de 60 publicaciones.

En las tablas se incluye un código, la localización de la mina en cuestión, el o los principales metales extraídos, el tipo de masa de agua desde la que se realiza el muestreo, el número de puntos en los que se recogen muestras, el número total de muestras y toda una serie de analitos que en mayor o menor medida van apareciendo en los registros de análisis de cada uno de los estudios.

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros (NOTA: * d.d. indica dato desconocido; ** tz indica contenido <0,001 mg/L; *** Rango de número de muestras varía en función del analito).

CÓDIGO MUESTREO	AU001	AU002	AU003	AU004	AU005	AU006
ORIGEN, PAÍS	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica
TIPO DE MINA	Oro	Oro	Oro	Oro	Oro	Oro
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Relave	Relave	Relave	Agua superficial	Agua de filtración	Agua subterránea
N° PUNTOS DE MUESTREO (N° MUESTRAS)	16 (d.d)	16 (d.d)	16 (d.d)	10 (20)	3 (8)	4 (12)
ANALITOS						
pH	1,80	3,40	3,50	6,16	3,13	4,05
Temperatura (°C)				18,33	22,32	16,91
EC (µS/cm)				999,53	5.456,67	3.831,38
TDS (mg/L)	10.609,00	8.983,00	8.186,00			
Sólidos suspendidos (mg/L)						
Turbidez (FTU)						
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)						
SiO ₂ (mg/L)						
CaCO ₃ (mg/L)						
PO ₄ ³⁻ (mg/L)				4,28	13,33	16,92
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	7.466,00	5.084,00	3.290,00	463,24	1.743,88	1.331,01
NO ₂ ⁻ (mg/L)						
NO ₃ ⁻ (mg/L)				8,76	21,98	13,33
HCO ₃ ⁻ (mg/L)						
NH ₄ ⁺ (mg/L)						
CN ⁻ (mg/L)						
F (mg/L)						
Cl (mg/L)				16,28	46,70	25,72
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)				32,91	284,45	22,09
K (mg/L)	121,00	1,00	1,00			
Mg (mg/L)	152,00	329,00	520,00			
Ca (mg/L)				109,60	265,70	240,56
Fe (mg/L)	430,00	1,00	1,00	19,30	165,82	178,34
Al (mg/L)	894,00	814,00	340,00			
Cu (mg/L)	139,00	278,00	417,00	0,21	4,13	3,13
Cd (mg/L)				2,94	1,01	1,78
Pb (mg/L)				0,19	0,91	0,44
Ni (mg/L)	218,00	736,00	656,00	0,69	16,93	11,11
Mn (mg/L)	356,00	714,00	1.073,00	2,96	56,20	51,87
Zn (mg/L)	59,00	119,00	179,00	1,43	10,14	7,45
Li (mg/L)						
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)	178,00	357,00	536,00	0,36	16,53	14,06
Cr (mg/L)	277,00	555,00	834,00	2,46	8,32	6,32
Sr (mg/L)						
Mo (mg/L)						
Y (mg/L)						
As (µg/L)				5,18	14,60	6,61
Hg (µg/L)				7,97	9,60	9,31
Se (µg/L)				0,41	0,96	0,67
²³⁸ U (µg/L)	200,00	484,00	728,00			
Referencias	[23]	[23]	[23]	[24]	[24]	[24]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	AU007	AU008	AU009	AU010	AU011	AU012
ORIGEN, PAÍS	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Witwatersrand, Sudáfrica	Bibiani, Ghana	Ghana
TIPO DE MINA	Oro	Oro	Oro	Oro	Oro	Oro
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Agua superficial	Agua superficial	Agua superficial	Agua subterránea	Aguas superficiales y subterráneas	d.d.
N° PUNTOS DE MUESTREO (N° MUESTRAS)	14 (24)	30 (54)	3 (3)	8 (15)	24 (24)	d.d. (d.d)
ANALITOS						
pH	7,62	5,27	7,93	3,94	8,20	7,40
Temperatura (°C)					26,75	31,30
EC (µS/cm)	341,79	1.663,22	180,00	3.702,00	2.334,00	5.600,00
TDS (mg/L)					1.144,00	2.900,00
Sólidos suspendidos (mg/L)					71,00	22,00
Turbidez (FTU)					4,80	
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)					130,00	
SiO ₂ (mg/L)						
CaCO ₃ (mg/L)						
PO ₄ ³⁻ (mg/L)					4,80	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	497,05	1.474,00	20,36	4.083,11	450,00	
NO ₂ ⁻ (mg/L)						
NO ₃ ⁻ (mg/L)					2,60	
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	19,47	6,15	132,30	6,23		
NH ₄ ⁺ (mg/L)					74,00	
CN ⁻ (mg/L)					11,10	9,00
F (mg/L)						
Cl (mg/L)	37,78	60,04	37,32	33,53		
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)	22,35	69,42	31,13	72,81		
K (mg/L)	8,68	23,49	8,48	15,93		
Mg (mg/L)	31,13	47,35	7,79	62,77		
Ca (mg/L)	119,11	184,91	17,18	130,14		
Fe (mg/L)	0,24	58,01	0,06	81,79	25,20	0,11
Al (mg/L)	0,37	34,66	0,09	25,79		
Cu (mg/L)	0,11	1,25	1,53	8,99		5,06
Cd (mg/L)						
Pb (mg/L)						0,14
Ni (mg/L)	0,21	5,10	0,16	24,64		
Mn (mg/L)	0,96	17,51	0,09	79,63		
Zn (mg/L)	0,08	5,36	0,04	13,04		0,04
Li (mg/L)						
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)	0,10	2,45	0,04	14,87		
Cr (mg/L)						
Sr (mg/L)						
Mo (mg/L)						
Y (mg/L)						
As (µg/L)					4,50	7.350,00
Hg (µg/L)						
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)	41,38	3.790,00	23,33	6.560,30		
Referencias	[25]	[25]	[25]	[25]	[26]	[27]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	AU013	AU014	AU015	AU016	AU017	AU018
ORIGEN, PAÍS	Obuasi, Ghana	Provincia de Esmeraldas, Ecuador	Ponce Enríquez, Ecuador	Portovelo-Zaruma, Ecuador	Nambija, Ecuador	Endorreica, Chile
TIPO DE MINA	Oro	Oro	Oro	Oro	Oro	Oro
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Relave	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Agua superficial
Nº PUNTOS DE MUESTREO (Nº MUESTRAS)	2 (150)	7 (14)	6 (d.d)	6 (d.d)	4 (d.d)	4 (2-113)***
ANALITOS						
pH	8,88	6,25	7,75	9,00	7,75	
Temperatura (°C)	30,93	24,51				
EC (µS/cm)	4.737,50	53,29	Baja	Baja	Baja	
TDS (mg/L)	2.377,50	25,09				
Sólidos suspendidos (mg/L)	107,50	351,14				
Turbidez (FTU)	84,38	242,37				
Sólidos totales (mg/L)		417,71				
DO (mg/L)	3,85	7,17	>75%	>75%	>75%	
SiO ₂ (mg/L)						
CaCO ₃ (mg/L)		21,31				
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	10,00	0,14				
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	644,00		Baja	Baja	Baja	236,30
NO ₂ ⁻ (mg/L)						
NO ₃ ⁻ (mg/L)	5,40	1,31				
HCO ₃ ⁻ (mg/L)		20,39	Baja	Baja	Baja	
NH ₄ ⁺ (mg/L)	71,50					
CN ⁻ (mg/L)	44,03	0,01				
F (mg/L)						
Cl (mg/L)		2,37				
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)						
K (mg/L)						
Mg (mg/L)						
Ca (mg/L)			Baja	Baja	Baja	
Fe (mg/L)	2,60	8,36				
Al (mg/L)		19,69				
Cu (mg/L)	5,50		0,07	0,35	0,54	2,44
Cd (mg/L)			tz	0,01	0,00	0,03
Pb (mg/L)	0,18	0,09	tz	0,67	0,05	
Ni (mg/L)			0,00	0,00	0,06	
Mn (mg/L)			0,20	0,68	8,06	
Zn (mg/L)	0,10		0,01	0,68	0,23	
Li (mg/L)						
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)			0,01	0,02	0,83	
Co (mg/L)			0,00	0,01	0,03	
Cr (mg/L)		0,04	0,00	0,01	0,06	0,03
Sr (mg/L)						
Mo (mg/L)						0,06
Y (mg/L)						
As (µg/L)	8.580,00	4,46	34,47	378,75	36,73	814,00
Hg (µg/L)		0,26	0,07	3,36	29,56	9,00
Se (µg/L)			0,40	1,63	0,74	
²³⁸ U (µg/L)			0,03	0,04	2,38	
Referencias	[28]	[29]	[30]	[30]	[30]	[31]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	AU019	CU001	CU002	CU003	CU004	CU005
ORIGEN, PAÍS	Rapel, Chile	Sur de Marruecos	Distrito Minero de Ducktown (TN), EEUU	Dong Gua Shan, China	Noruega	Sungun, Irán
TIPO DE MINA	Oro	Cobre	Cobre	Cobre	Cobre, zinc, níquel	Cobre
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Agua superficial	Relave	Agua superficial	Relave	Relave	Agua superficial
N° PUNTOS DE MUESTREO (N° MUESTRAS)	18 (2-851)***	2 (d.d)	3 (3)	d.d. (d.d)	8 (d.d)	22 (44)
ANALITOS						
pH		2,80	2,37	3,00	3,75	8,40
Temperatura (°C)						
EC (µS/cm)				2.800,00	1.849,80	490,10
TDS (mg/L)				2.010,00		288,10
Sólidos suspendidos (mg/L)				0,70		
Turbidez (FTU)						
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)						7,19
SiO ₂ (mg/L)						
CaCO ₃ (mg/L)						
PO ₄ ³⁻ (mg/L)						
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	119,30		1.348,33	376,00	6.197,83	68,90
NO ₂ ⁻ (mg/L)						
NO ₃ ⁻ (mg/L)				107,00		
HCO ₃ ⁻ (mg/L)						187,20
NH ₄ ⁺ (mg/L)						
CN ⁻ (mg/L)						
F (mg/L)						
Cl (mg/L)				530,00		
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)			15,13	653,00		17,85
K (mg/L)			11,67	173,00		16,03
Mg (mg/L)			44,80			15,81
Ca (mg/L)			75,77			201,22
Fe (mg/L)			229,89		1.326,01	0,64
Al (mg/L)			47,70		302,56	0,60
Cu (mg/L)	0,05	21,90	4,75	78,80	161,94	0,37
Cd (mg/L)	0,05	0,02	0,02		3,46	0,02
Pb (mg/L)	0,28	0,00	0,02	9,96		0,01
Ni (mg/L)			0,16	16,60	1,30	
Mn (mg/L)			22,86			0,28
Zn (mg/L)		6,06	25.433,33	18,30	986,00	0,77
Li (mg/L)						
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)			0,85			
Cr (mg/L)	0,22					0,22
Sr (mg/L)						
Mo (mg/L)	0,22					0,43
Y (mg/L)						
As (µg/L)	119,30				240,00	
Hg (µg/L)	281,00					
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)						
Referencias	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]	[36]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	CU006	CU007	FE001	PB001	SN001	W001
ORIGEN, PAÍS	Aconcagua, Chile	Caletones, Chile	Stripa, Suecia	Derbyshire, Reino Unido	Selangor y Perak, Malasya	Valdarcas, Portugal
TIPO DE MINA	Cobre	Cobre	Hierro	Plomo	Estaño	Tungsteno
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Agua superficial	Corriente fluvial	Agua subterránea	Relave	Relave	Agua vertedero
N° PUNTOS DE MUESTREO (N° MUESTRAS)	19 (4-910)***	9 (16)	5 (>200)	5 (d.d)	7 (33)	1 (15)
ANALITOS						
pH		5,70	10,06	7,14	3,44	2,53
Temperatura (°C)			8,60			14,50
EC (µS/cm)		1.530,00	1.090,00	518,00	736,90	4.970,00
TDS (mg/L)					308,59	
Sólidos suspendidos (mg/L)					18,40	
Turbidez (FTU)					33,31	
Sólidos totales (mg/L)					517,73	
DO (mg/L)					4,98	
SiO ₂ (mg/L)		132,00	18,00		7,69	56,20
CaCO ₃ (mg/L)			63,00			3.943,00
PO ₄ ³⁻ (mg/L)			0,02		11,51	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	115,11	553,00	57,00	36,60	309,67	5.880,00
NO ₂ (mg/L)			0,01			
NO ₃ (mg/L)		5,70	0,10		3,86	
HCO ₃ (mg/L)			18,00	252,60		
NH ₄ ⁺ (mg/L)			0,02			
CN ⁻ (mg/L)						
F (mg/L)			5,30	0,60		173,00
Cl (mg/L)			460,00			
Br (mg/L)			4,50			
I (mg/L)			0,14			
Na (mg/L)		24,00	218,00			2,85
K (mg/L)		8,70	0,44			1,32
Mg (mg/L)		33,00	0,03			43,20
Ca (mg/L)		194,00	94,00	93,60		257,00
Fe (mg/L)		33,00	0,00	0,00	16,25	2.143,00
Al (mg/L)		60,00	0,02			3.735,00
Cu (mg/L)	0,79	24,40	0,01	0,00		17,40
Cd (mg/L)				0,00	0,00	
Pb (mg/L)	0,08	0,04	0,01	0,01	0,84	
Ni (mg/L)			tz		0,05	
Mn (mg/L)			tz		5,62	204,00
Zn (mg/L)		1,34	0,00	0,16		8,71
Li (mg/L)			0,09			
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)			0,01			
Cr (mg/L)	0,03		tz			
Sr (mg/L)			0,89			
Mo (mg/L)	0,18					
Y (mg/L)						
As (µg/L)	132,00	204,00			76,00	9.610,00
Hg (µg/L)	87,00					
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)					53,55	
Referencias	[31]	[37]	[38]	[35]	[39]	[40]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	W002	W003	XM001	XM002	XM003	XM004
ORIGEN, PAÍS	Valdarcas, Portugal	Silver Ledge (CO), EEUU	Liangqiao, China	Shangba, China	Wengcheng, China	Alto Atlas, Marruecos
TIPO DE MINA	Tungsteno	Tungsteno	Cobre, hierro	Cobre, hierro	Cobre, hierro	Cobre, molibdeno
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Corriente fluvial	Agua superficial	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Relave
Nº PUNTOS DE MUESTREO (Nº MUESTRAS)	1 (24)	d.d. (d.d)	1 (3)	1 (3)	1 (2)	1 (d.d)
ANALITOS						
pH	3,10	5,70	2,62	4,62	6,06	8,70
Temperatura (°C)	14,20	5,60				
EC (µS/cm)	866,00	1.090,00				
TDS (mg/L)						
Sólidos suspendidos (mg/L)						
Turbidez (FTU)						
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)						
SiO ₂ (mg/L)	19,50	27,40				
CaCO ₃ (mg/L)	241,00	30,00				
PO ₄ ³⁻ (mg/L)						
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	327,00	518,00				
NO ₂ ⁻ (mg/L)						
NO ₃ ⁻ (mg/L)						
HCO ₃ ⁻ (mg/L)						
NH ₄ ⁺ (mg/L)						
CN ⁻ (mg/L)						
F (mg/L)	3,83					
Cl (mg/L)						
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)	5,74	3,93				
K (mg/L)	1,30					
Mg (mg/L)	4,82	8,99				
Ca (mg/L)	28,80	211,00				
Fe (mg/L)	48,60	12,30	49,63	3,00	2,70	
Al (mg/L)	17,40	0,88	63,90	0,77	0,47	
Cu (mg/L)	0,06	0,01	4,11	0,39	0,10	0,04
Cd (mg/L)		0,01	36,72	0,01	0,00	0,00
Pb (mg/L)		tz	3,01	0,14	0,05	0,01
Ni (mg/L)		0,02	72,08	0,00	tz	
Mn (mg/L)	7,00	2,43	17,48	1,29	0,55	
Zn (mg/L)	0,22	0,70	23,32	1,29	0,87	0,10
Li (mg/L)						
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)						
Cr (mg/L)		0,02				
Sr (mg/L)						
Mo (mg/L)						
Y (mg/L)						
As (µg/L)	32,00		25,00	3,00	8,00	
Hg (µg/L)						
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)						
Referencias	[40]	[41]	[42]	[42]	[42]	[32]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	XM011	XM012	XM013	XM014	XM015	XM016
ORIGEN, PAÍS	Petorca, Chile	Ligua, Chile	Maipo, Chile	Elqui, Chile	Waite Amulet, Canadá	South Crofty, Reino Unido
TIPO DE MINA	Cobre, oro	Cobre, oro	Cobre, oro	Cobre, oro	Cobre, zinc	Estaño, cobre
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Agua superficial	Agua superficial	Agua superficial	Corriente fluvial y agua subterránea	Agua subterránea	d.d.
N° PUNTOS DE MUESTREO (N° MUESTRAS)	4 (3-262)***	5 (4-272)***	42 (2-2047)***	16 (895-2242)***	d.d. (d.d)	d.d. (d.d)
ANALITOS						
pH				2,32	7,42	7,21
Temperatura (°C)				11,45	7,00	41,50
EC (µS/cm)				11.380,00	1.020,00	
TDS (mg/L)						
Sólidos suspendidos (mg/L)						
Turbidez (FTU)						
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)				20,80		
SiO ₂ (mg/L)					5,34	35,30
CaCO ₃ (mg/L)					120,00	
PO ₄ ³⁻ (mg/L)						
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	52,77	54,35	215,62	2.784,75	1.910,00	173,00
NO ₂ (mg/L)						
NO ₃ (mg/L)				14,33		
HCO ₃ ⁻ (mg/L)				282,60		
NH ₄ ⁺ (mg/L)						
CN (mg/L)						
F (mg/L)					0,10	2,70
Cl (mg/L)				925,00	2,56	12.000,00
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)				1.642,00	7,02	4.440,00
K (mg/L)				230,00	5,81	135,00
Mg (mg/L)				78,80	366,00	72,80
Ca (mg/L)				679,00	199,00	2.325,00
Fe (mg/L)				1.500,00	1,04	4,75
Al (mg/L)				192,00	1,00	
Cu (mg/L)	0,04		1,29	251,40	0,01	0,02
Cd (mg/L)			0,04	0,34	tz	
Pb (mg/L)	0,06		0,17	0,75	0,12	
Ni (mg/L)					0,04	0,21
Mn (mg/L)				23,70	0,22	5,00
Zn (mg/L)				14,37	0,07	
Li (mg/L)						120,00
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)					0,05	
Cr (mg/L)	0,05	0,07	0,06		0,05	
Sr (mg/L)						41,20
Mo (mg/L)	0,06	0,07	0,46			
Y (mg/L)						
As (µg/L)	182,00	52,40	12,00	30,40		
Hg (µg/L)	3,00		9,00			
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)						
Referencias	[31]	[31]	[31]	[43]	[41]	[41]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	XM017	XM018	XM019	XM020	XM021	XM022
ORIGEN, PAÍS	Wheal Jean, Reino Unido	Panasqueira, Portugal	Panasqueira, Portugal	Panasqueira, Portugal	Marrakech, Marruecos	Ervedosa, Portugal
TIPO DE MINA	Estaño, plata, zinc	Estaño, wolframio	Estaño, wolframio	Estaño, wolframio	Polimetálica	Polimetálica
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	d.d.	Agua de filtración	Agua superficial	Corriente fluvial	Relave	Agua superficial
Nº PUNTOS DE MUESTREO (Nº MUESTRAS)	d.d. (d.d)	4 (4)	3 (3)	4 (4)	1 (d.d)	6 (69)
ANALITOS						
pH	3,50	3,25	5,23	6,90		5,70
Temperatura (°C)	21,60					13,55
EC (µS/cm)		2.827,50	763,33	60,50		242,70
TDS (mg/L)		1.838,00	496,00	39,35		
Sólidos suspendidos (mg/L)						
Turbidez (FTU)						
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)						
SiO ₂ (mg/L)	25,50	85,00	16,67	10,75		
CaCO ₃ (mg/L)						
PO ₄ ³⁻ (mg/L)				0,07		
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1.390,00	2.209,25	399,33	6,50		29,65
NO ₂ (mg/L)				0,07		
NO ₃ (mg/L)				3,20		
HCO ₃ ⁻ (mg/L)				13,13		
NH ₄ ⁺ (mg/L)						
CN ⁻ (mg/L)						
F (mg/L)	4,40			0,11		
Cl (mg/L)	179,00	5,00	6,00	5,25		
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)	93,00	15,40	9,13	6,00		5,15
K (mg/L)	12,00	2,28	3,33	0,83		1,06
Mg (mg/L)	43,00	207,25	50,67	1,75		11,34
Ca (mg/L)	191,00	242,50	76,33	2,75		19,18
Fe (mg/L)	346,00	46,15	0,16	0,06		1,42
Al (mg/L)		103,78	0,97	0,11		
Cu (mg/L)	0,01	29,80	0,43	0,04	120,00	0,27
Cd (mg/L)		0,29	0,04	tz	5,50	0,04
Pb (mg/L)		0,02	0,02	tz	0,80	0,01
Ni (mg/L)	0,86	1,63	0,19	0,00		0,05
Mn (mg/L)	19,70	53,45	4,07	0,09		0,26
Zn (mg/L)	125,00	32,00	4,37	0,08	9.145,00	1,14
Li (mg/L)	2,70	0,78	0,09	0,00		
Be (mg/L)	0,15	0,04	0,01	tz		
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)	0,27	1,80	0,05	0,00		0,05
Cr (mg/L)						
Sr (mg/L)	1,87	0,49	0,22	0,02		
Mo (mg/L)						
Y (mg/L)		0,33	0,02	tz		
As (µg/L)	2.100,00	72,00	10,00	3,00		33,33
Hg (µg/L)						
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)						
Referencias	[41]	[44]	[44]	[44]	[32]	[45]

Tabla 3-1 Catálogo de efluentes mineros, cont.

CÓDIGO MUESTREO	XM023	XM024	XM025	XM026	XM027	XM028
ORIGEN, PAÍS	Greens Creek (AK), EEUU	Lovozero, Rusia	Faja Pirítica Ibérica, España	Faja Pirítica Ibérica, España	Faja Pirítica Ibérica, España	Faja Pirítica Ibérica, España
TIPO DE MINA	Polimetálica	Polimetálica	Sulfuros metálicos	Sulfuros metálicos	Sulfuros metálicos	Sulfuros metálicos
TIPO DE PUNTO DE MUESTREO	Agua subterránea	Relave	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Corriente fluvial	Agua superficial
Nº PUNTOS DE MUESTREO (Nº MUESTRAS)	d.d. (d.d)	d.d. (d.d)	d.d. (173-550)***	d.d. (d.d)	d.d. (d.d)	4 (15)
ANALITOS						
pH	7,66	11,74	3,07	3,00	2,50	2,94
Temperatura (°C)	9,20					
EC (µS/cm)			1.940,00			2.730,25
TDS (mg/L)				57,30	155,20	1.740,25
Sólidos suspendidos (mg/L)						
Turbidez (FTU)						
Sólidos totales (mg/L)						
DO (mg/L)						
SiO ₂ (mg/L)		11.000,00	50,00			
CaCO ₃ (mg/L)	90,00					
PO ₄ ³⁻ (mg/L)						
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	2.620,00		1.204,00			1.313,00
NO ₂ ⁻ (mg/L)						
NO ₃ ⁻ (mg/L)			5,50			
HCO ₃ ⁻ (mg/L)		2.666,00				
NH ₄ ⁺ (mg/L)			1,49			
CN ⁻ (mg/L)						
F (mg/L)		11.000,00				
Cl (mg/L)	1,30	75,00	23,60			
Br (mg/L)						
I (mg/L)						
Na (mg/L)	15,00	24.038,00	26,60			
K (mg/L)	9,60	222,00	3,20			
Mg (mg/L)	318,00	100,00	94,00			
Ca (mg/L)	518,00		112,60			
Fe (mg/L)	0,54		23,47			97,49
Al (mg/L)	0,25					
Cu (mg/L)	tz	0,28	7,60	9,70	39,60	4,77
Cd (mg/L)	0,00		0,08	0,10	0,50	
Pb (mg/L)	tz	0,03	0,21	0,24	0,60	0,40
Ni (mg/L)	0,04			0,30	0,78	0,47
Mn (mg/L)	0,97		13,70	16,10	16,40	12,94
Zn (mg/L)	0,88		24,23	30,60	97,10	8,95
Li (mg/L)						
Be (mg/L)						
Ti (mg/L)						
Co (mg/L)	0,01					
Cr (mg/L)	0,00					
Sr (mg/L)						
Mo (mg/L)						
Y (mg/L)						
As (µg/L)			68,00	180,00	1.800,00	194,00
Hg (µg/L)						
Se (µg/L)						
²³⁸ U (µg/L)						
Referencias	[41]	[41]	[46]	[47]	[47]	[48]

3.4 Requerimientos de calidad del agua

En este apartado se intenta dar un marco legal que fije el límite más restrictivo al tratamiento de los efluentes. Por supuesto, debe entenderse que los requerimientos de calidad fijados por las leyes atienden a un nivel de tratamiento siempre superior al que sería necesario en un proceso minero. Esto es debido a que en el primer caso el objetivo es proteger la integridad y salubridad de las propias fuentes de agua y, por ende, de los seres vivos en interacción con las mismas. No obstante, las tareas llevadas a cabo en la industria minera no necesitan de un agua con unas características muy rigurosas. Por ello, en cada caso de diseño se debe atender a los criterios de calidad requeridos para el uso final del agua de vertido.

En Chile existe cierta normativa de emisión dirigidas a salvaguardar el recurso hídrico (aguas marinas, continentales superficiales y continentales subterráneas). El marco legal general en este campo está reflejado en la Ley N° 19300 de Bases Generales del Medio Ambiente, refrendado por el Ministerio de Secretaría General de la Presidencia (año 1994), el cual inició un proceso normativo de carácter formal y activo para elementos de agua, aire, suelo, residuos sólidos-líquidos y otras sustancias químicas.

Por otro lado, en cuanto normas específicas, se elaboraron el Decreto N° 90, del Ministerio de Secretaría General de la Presidencia (año 2001), que define la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales (vigente de modo pleno desde septiembre de 2006 y revisable cada 5 años como mínimo); el Decreto N° 609, del Ministerio de Obras Públicas (año 1998), que describe la Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes asociados a las Descargas de Residuos Industriales Líquidos a Sistemas de Alcantarillado; y el Decreto N° 46, del Ministerio de Secretaría General de la Presidencia (año 2002), que define la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas [49].

Tabla 3-2 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en Chile [50]

CONTAMINANTES			LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO DE VERTIDO		
			a)	b)	c)
Aceites y grasas	AyG	mg/L	20,00	20,00	20,00
Aluminio	Al	mg/L	5,00	1,00	1,00
Arsénico	As	mg/L	0,50	0,10	0,20
Boro	B	mg/L	0,75		
Cadmio	Cd	mg/L	0,01	0,02	0,02
Cianuro	CN ⁻	mg/L	0,20	0,50	0,50
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	400,00		
Cobre total	Cu	mg/L	1,00	0,10	1,00
Coliformes fecales o termotolerantes	Coli/100mL	NMP/100mL	1.000,00	1.000,00	1.000,00
Índice de fenol	Fenoles	mg/L	0,50	0,50	0,50
Cromo hexavalente	Cr ⁶⁺	mg/L	0,05	0,20	0,20
Cromo total	Cr total	mg/L		2,50	2,50
DBO5	DBO5	mg O ₂ /L	35,00	35,00	60,00
Estaño	Sn	mg/L		0,50	0,50
Fluoruro	F ⁻	mg/L	1,50	1,00	1,50
Fósforo	P	mg/L	10,00	2,00	5,00
Hidrocarburos fijos	HF	mg/L	10,00		
Hidrocarburos totales	HCT	mg/L		5,00	10,00
Hidrocarburos volátiles	HCV	mg/L			1,00
Hierro disuelto	Fe	mg/L	5,00	2,00	10,00
Manganeso	Mn	mg/L	0,30	0,50	2,00
Mercurio	Hg	µg/L	1,00	5,00	5,00
Molibdeno	Mo	mg/L	1,00	0,07	0,10
Níquel	Ni	mg/L	0,20	0,50	2,00
Nitrógeno Total Kjeldahl	NKT	mg/L	50,00		50,00
Nitrógeno Total	N	mg/L		10,00	
Pentaclorofenol	C ₆ OHC1 ₅	µg/L	9,00		
pH	pH	-	6,00-8,50	6,00-8,50	6,00-9,00
Plomo	Pb	mg/L	0,05	0,20	0,20
Poder espumógeno	PE	mm	7,00		
SAAM	SAAM	mg/L		10,00	10,00
Selenio	Se	mg/L	0,01	0,01	0,01
Sólidos sedimentables	S SED	mL/L·h			5,00
Sólidos suspendidos totales	SS	mg/L	80,00	80,00	100,00
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	1.000,00	1.000,00	
Sulfuros	S2 ⁻	mg/L	1,00	1,00	1,00
Temperatura	T°	°C	35,00	30,00	30,00
Tetracloroetano	C ₂ Cl ₄	mg/L	0,04		
Tolueno	C ₆ H ₅ CH ₃	mg/L	0,70		
Triclorometano	CHCl ₃	mg/L	0,20		
Xileno	C ₆ H ₄ C ₂ H ₆	mg/L	0,50		
Zinc	Zn	mg/L	3,00	5,00	5,00

a) A cuerpos de agua fluviales
b) A cuerpos de agua lacustres
c) A cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral

Tabla 3-3 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en Chile [51]

CONTAMINANTES		LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO DE VERTIDO		CONTAMINANTES		LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO DE VERTIDO	
		a)	b)			a)	b)
Indicadores físico-químicos				Metales			
pH		6,00-8,50	6,00-8,50	Aluminio	mg/L	5,00	20,00
Inorgánicos				Arsénico	mg/L	0,01	0,01
Cianuro	mg/L	0,20	0,20	Boro	mg/L	0,75	3,00
Cloruros	mg/L	250,00	250,00	Cadmio	µg/L	2,00	2,00
Fluoruro	mg/L	1,50	5,00	Cobre	mg/L	1,00	3,00
Nitratos y nitritos	mg/L	10,00	15,00	Cromo hexavalente	mg/L	0,05	0,20
Sulfatos	mg/L	250,00	500,00	Hierro	mg/L	5,00	10,00
Sulfuros	mg/L	1,00	5,00	Manganeso	mg/L	0,30	2,00
Orgánicos				Mercurio	µg/L	1,00	1,00
Aceites y grasas	mg/L	10,00	10,00	Molibdeno	mg/L	1,00	2,50
Benceno	mg/L	0,01	0,01	Níquel	mg/L	0,20	0,50
Pentaclorofenol	µg/L	9,00	9,00	Plomo	mg/L	0,05	0,05
Tetracloroetano	mg/L	0,04	0,04	Selenio	mg/L	0,01	0,02
Tolueno	mg/L	0,70	0,70	Zinc	mg/L	3,00	20,00
Triclorometano	mg/L	0,20	0,20	Nutrientes			
Xileno	mg/L	0,50	0,50	Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	10,00	15,00
a) En condiciones de vulnerabilidad media b) En condiciones de vulnerabilidad baja							

En el caso de la República del Ecuador, la Presidencia implantó la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, la cual se encuentra bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Dicha norma técnica sirve para establecer los límites permisibles y las prohibiciones para los vertidos de aguas continentales y marinas, los criterios de calidad del agua según su uso y los métodos de análisis de los distintos contaminantes.

Tabla 3-4 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos en Ecuador [52]

PARÁMETRO			LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE VERTIDO	
			a)	b)
Aceites y grasas	Sust. Solubles en hexano	mg/L	0,30	0,30
Alkil mercurio		mg/L	No detectable	No detectable
Aluminio	Al	mg/L	5,00	5,00
Arsénico total	As	mg/L	0,10	0,50
Bario	Ba	mg/L	2,00	5,00
Boro total	B	mg/L	2,00	
Cadmio	Cd	mg/L	0,02	0,20
Cianuro total	CN ⁻	mg/L	0,10	0,20
Cloro activo	Cl	mg/L	0,50	
Cloruros	Cl ⁻	mg/L	1.000,00	
Cobre	Cu	mg/L	1,00	1,00
Cobalto	Co	mg/L	0,50	0,50
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/L	0,20	0,20
Cromo hexavalente	Cr ⁶⁺	mg/L	0,50	0,50
DBO5	DBO5	mg O ₂ /L	100,00	100,00
Dicloroetileno	C ₂ H ₂ Cl ₂	mg/L	1,00	
Estaño	Sn	mg/L	5,00	
Fluoruros	F ⁻	mg/L	5,00	5,00
Fósforo total	P	mg/L	10,00	10,00
Hierro total	Fe	mg/L	10,00	
Hidrocarburos totales	HTP	mg/L	20,00	20,00
Manganeso total	Mn	mg/L	2,00	
Mercurio total	Hg	µg/L	5,00	10,00
Níquel	Ni	mg/L	2,00	2,00
Nitratos + Nitritos	N	mg/L	10,00	
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/L	15,00	40,00
Plata	Ag	mg/L	0,10	0,10
Plomo	Pb	mg/L	0,20	0,50
pH	pH		5,00-9,00	6,00-9,00
Selenio	Se	mg/L	0,10	0,20
Sólidos sedimentables		mL/L	100,00	
Sólidos suspendidos totales	SST	mg/L	1.600,00	100,00
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/L	1.000,00	
Sulfitos	SO ₃ ²⁻	mg/L	2,00	
Sulfuros	S ²⁻	mg/L	0,50	0,50
Temperatura	T°	°C	<35,00	<35,00
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	mg/L	1,00	
Vanadio	V	mg/L	5,00	
Zinc	Zn	mg/L	5,00	10,00

a) A un cuerpo de agua dulce
b) A un cuerpo de agua marina

4 INTRODUCCIÓN AL CÁLCULO ENERGÉTICO DE UN SISTEMA RO

En este capítulo se pretende realizar una introducción al cálculo y evaluación integral del consumo energético de la tecnología de desalación, en concreto, la técnica de ósmosis inversa para agua marina y salobre (Seawater and Brackish Water Reverse Osmosis, SWRO y BWRO, en inglés). Dadas las características de los efluentes mineros anteriormente descritos este procedimiento sería apto para el tratamiento y sería posible obtener un producto que cumpliera los requerimientos necesarios. Además algunas explotaciones mineras se abastecen de agua desalada, especialmente en el caso de Chile según se ha descrito previamente.

Sin embargo, lejos de la técnica, se hace necesario del mismo modo estudiar y analizar su viabilidad desde el plano energético, pues es bien sabido que es uno de los aspectos más comprometidos de este tipo de tecnología.

4.1 Propiedades del agua a tratar

Para comenzar el cálculo, lo primero es describir las propiedades termodinámicas que necesitamos conocer sobre el agua a tratar. Entre estas propiedades, se necesitará medir o calcular la densidad y la presión osmótica. En el caso de calcular la presión osmótica se puede obtener a partir del coeficiente osmótico del disolvente.

Para el caso de disoluciones de sales marinas, se dispone de las correlaciones dadas en la siguiente tabla dependientes de la temperatura (t) y salinidad (S) del agua a tratar, donde la salinidad se define como la fracción másica de sales, es decir, debe expresarse en kg/kg.

Tabla 4-1 Correlaciones de las propiedades termodinámicas de las disoluciones de sales marinas en los rangos aplicables a los procesos de desalación [53]

$$\rho_{sw} = (a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^3 + a_5t^4) + (b_1S + b_2St + b_3St^2 + b_4St^3 + b_5S^2t^2)$$

where

$$a_1 = 9.999 \times 10^2, a_2 = 2.034 \times 10^{-2}, a_3 = -6.162 \times 10^{-3}, a_4 = 2.261 \times 10^{-5}, a_5 = -4.657 \times 10^{-8},$$
$$b_1 = 8.020 \times 10^2, b_2 = -2.001, b_3 = 1.677 \times 10^{-2}, b_4 = -3.060 \times 10^{-5}, b_5 = -1.613 \times 10^{-5}$$

Validity: ρ_{sw} in (kg/m³); $0 < t < 180$ °C; $0 < S < 0.16$ kg/kg
Accuracy: ± 0.1 %

Tabla 4-1 (continuación)

Coefficiente osmótico del agua: $\Phi=f(t,S)$	
$\phi = a_1 + a_2t + a_3t^2 + a_4t^4 + a_5S + a_6St + a_7St^3 + a_8S^2 + a_9S^2t + a_{10}S^2t^2$	
$a_1 = 8.9453 \times 10^{-1}, a_2 = 4.1561 \times 10^{-4}, a_3 = -4.6262 \times 10^{-6}, a_4 = 2.2211 \times 10^{-11}$	
$a_5 = -1.1445 \times 10^{-1}, a_6 = -1.4783 \times 10^{-3}, a_7 = -1.3526 \times 10^{-8}, a_8 = 7.0132$	
$a_9 = 5.696 \times 10^{-2}, a_{10} = -2.8624 \times 10^{-4}$	
Validity: $0 \leq t \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}; 10 \leq S \leq 120 \text{ g/kg}$	
Accuracy: $\pm 1.4 \%$	

En las ecuaciones de la tabla anterior, para valores de salinidad iguales a cero, la densidad del agua sería la correspondiente al agua pura (primer término). Por otra parte, para dichos valores de salinidad, zona no aplicable para la correlación, el valor del coeficiente osmótico es igual a la unidad.

A través de una membrana semipermeable al disolvente, el flujo natural de agua sería desde el lado de menor concentración hacia el de mayor concentración. No obstante, si la presión del segundo supera un valor concreto de presión el flujo se invierte. Dicho valor está basado en lo que se denomina la presión osmótica, Π , de una disolución salina; siendo dicha presión a la que la disolución alcanza el equilibrio con respecto al disolvente puro cuando se sitúan separados por una membrana semipermeable. Si se aplica una presión superior a la presión osmótica a la disolución, parte del disolvente del lado más concentrado fluiría hacia el lado del disolvente puro. Este es el principio en el que se basa la ósmosis inversa.

Usando los valores de temperatura (T), salinidad (S), coeficiente osmótico (Φ) y densidad correspondiente al agua pura (ρ_w), así como la constante universal de los gases (R), es posible hallar el valor de la presión osmótica para disoluciones de sales marinas como sigue:

$$\Pi = \phi \cdot \rho_w \cdot R \cdot T \cdot \left(\frac{2S}{1-S} \cdot \frac{\text{mol}}{62,808 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} \right) \quad (4.1)$$

Como se puede apreciar más adelante, para un caso concreto (Figura 4-2), la presión osmótica es positiva y aumenta con la concentración de sal para una temperatura dada.

De este modo, con dos disoluciones salinas separadas por una membrana semipermeable para que el flujo de disolvente suceda acorde fenómeno de ósmosis inversa ha de satisfacerse la siguiente condición:

$$\Pi_1 - \Pi_2 < p_1 - p_2 \quad \text{siendo} \quad S_1 > S_2 \quad (4.2)$$

En caso de aplicar tratamientos basados en ósmosis inversa a efluentes que sean otro tipo de disoluciones, densidad y presión osmótica son propiedades que deben medirse directamente en el laboratorio. En ambos casos, lo más sencillo sería medir ambas propiedades por comparación con una disolución de cloruro sódico en agua. Además deberían calibrarse medidas de conductividad a fin de obtener correlaciones de densidad y de presión osmótica, ambas en función de la temperatura y la conductividad.

4.2 Cálculo de los parámetros de operación del sistema de ósmosis inversa (RO)

El proceso de tratamiento que se va estudiar se esquematiza en la siguiente figura:

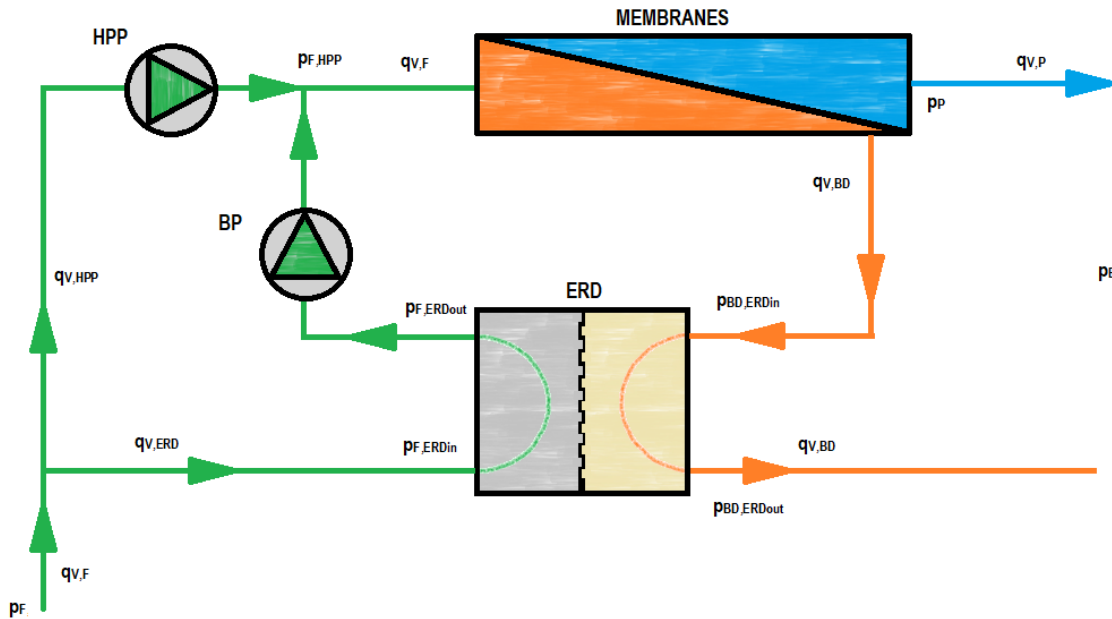


Figura 4-1 Esquema del sistema de RO de estudio

En el diagrama se distinguen tres corrientes fundamentales: alimentación (F , *Feed*), producto o permeado (P) y concentrado o rechazo (BD , *BlowDown*). Además, la alimentación se bifurca en dos corrientes, cada una de las cuales sufre un proceso de presurización distinto con el objetivo de hacer la eficiencia global del sistema lo más alta posible. La mayor parte de la alimentación pasa por una bomba de alta presión (*High Pressure Pump*, *HPP*) para alcanzar la presión de operación (p_F). En este caso, el dispositivo de recuperación de energía (*Energy Recovery Device*, *ERD*, en la Figura 4-1) se denomina cámara isobárica (o intercambiador de presión), ya que es la opción más eficiente actualmente [54]. Este equipo eleva la presión de la otra parte de la corriente de alimentación hasta una presión ligeramente inferior a la del rechazo del módulo de membranas. Tras el paso por el ERD, una bomba de apoyo (*Booster Pump*, *BP*) realiza el último paso de incremento de presión hasta $p_{F,HPP}$.

Los balances de materia correspondientes al sistema quedarían:

$$q_F = q_{ERD} + q_{HPP} = q_P + q_{BD} \quad (4.3)$$

siendo q_i y $q_{V,i}$ el caudal másico y volumétrico, respectivamente, de la corriente i ; relacionados por la densidad de la disolución en dicha corriente. La conversión del proceso de separación (r_m ó r_V , según sea en función de caudal másico o volumétrico, respectivamente) se define como:

$$r_m = \frac{q_P}{q_F} = \frac{q_P}{q_P + q_{BD}} \quad ; \quad \frac{q_{BD}}{q_P} = \frac{1}{r_m} - 1 \quad (4.4 ; 4.5)$$

$$r_V = \frac{q_{V,P}}{q_{V,F}} = \frac{q_P}{q_F} \cdot \frac{\rho_F}{\rho_P} = r_m \cdot \frac{\rho_F}{\rho_P} \quad ; \quad \frac{q_{V,BD}}{q_{V,P}} = \frac{1}{r_V} - 1 \quad (4.6 ; 4.7)$$

Así, el proceso de ósmosis inversa en el sistema se puede resumir en tres procesos básicos:

- i) Presurización del flujo de agua a tratar desde la presión ambiente hasta la presión de operación, cumpliéndose, generalmente, el siguiente principio:

$$\Pi_{BD} - \Pi_P < p_F - p_P - \Delta p_{loss\ F-BD} \quad (4.8)$$

- ii) Proceso de separación a través de la membrana de ósmosis inversa.
- iii) Recuperación de energía procedente de la corriente de concentrado por medio de su expansión

El consumo energético en el primer proceso es el correspondiente a las bombas de alta presión y de circulación:

$$P_{W,HPP} = q_{V,HPP} \cdot \frac{p_{F,HPP} - p_F}{\eta_{HPP} \cdot \eta_{eng,HPP}} \quad (4.9)$$

$$P_{W,BP} = q_{V,ERD} \cdot \frac{p_{F,HPP} - p_{F,ERDout}}{\eta_{BPP} \cdot \eta_{eng,BP}} \quad (4.10)$$

Se asume que la presión de salida, tanto del producto como del rechazo, es decir, p_P y $p_{BD,ERDout}$ tienen el mismo valor que la presión ambiente, p_E .

Globalmente, el consumo específico (SEC) sería:

$$SEC = \frac{\Sigma P_{W,HPP} + \Sigma P_{W,BP}}{q_{V,P}} \quad (4.11)$$

$$SEC = \frac{q_{V,HPP}}{q_{V,P}} \cdot \frac{p_{F,HPP} - p^E}{\eta_{HPP} \cdot \eta_{eng,HPP}} + \frac{q_{V,ERD}}{q_{V,P}} \cdot \frac{p_{F,HPP} - p_{F,ERDout}}{\eta_{BPP} \cdot \eta_{eng,BP}} \quad (4.12)$$

Y, en tercer lugar, el análisis del proceso de recuperación de energía basado en una cámara isobárica, el cual incluye ciertos parámetros de operación, sería:

- Eficiencia, Eff :

$$Eff = \frac{q_{V,ERD} \cdot p_{F,ERDout} + q_{V,BD} \cdot p_{BD,ERDout}}{q_{V,ERD} \cdot p_{F,ERDin} + q_{V,BD} \cdot p_{BD,ERDin}} \quad (4.13)$$

$$\varepsilon = \frac{p_{BD,ERDout} - Eff \cdot p_{BD,ERDin}}{Eff \cdot p_{F,ERDin} - p_{F,ERDout}} \quad (4.14)$$

$$q_{V,ERD} = q_{V,BD} \cdot \varepsilon \quad (4.15)$$

$$\frac{q_{V,ERD}}{q_{V,P}} = \left(\frac{1}{r_V} - 1 \right) \varepsilon \quad ; \quad \frac{q_{V,HPP}}{q_{V,P}} = \frac{1}{r_V} + \left(\frac{1}{r_V} - 1 \right) \varepsilon \quad (4.16 ; 4.17)$$

- Diferencial de presión del lado de alta, HP_{DP} :

$$HP_{DP} = p_{BD,ERDin} - p_{F,ERDout} \quad (4.18)$$

- Diferencial de presión del lado de baja, LP_{DP} :

$$LP_{DP} = p_{F,ERDin} - p_{BD,ERDout} \quad (4.19)$$

Por último, cabría plantear la fuerza motriz del proceso de ósmosis inversa, la cual es conocida como presión impulsora neta (NDP , del inglés *Net Driving Pressure*), y que podría definirse discretamente a lo largo de todo el módulo de membrana (eje OX), de un modo parecido al de la ecuación (4.8), la cual alude al sistema completo. Cuando se refiere a la salida de la membrana y no se tiene en cuenta la polarización por concentración, la NDP se denominará en este trabajo como TDP (*Tail Differential Pressure*):

$$NDP(x) = [p_{F-BD}(x) - p_p(x)] - [\Pi_{BD}(x) - \Pi_p(x)] \quad (4.20)$$

$$TDP = (p_{BD,ERDin} - p_p) - [\Pi_{BD}(T, S_{BD}) - \Pi_p(T, S_p)] \quad (4.21)$$

A modo práctico, en un análisis operacional y energético como éste, para algunos de los parámetros se puede tomar valores aceptables provenientes de los rangos de operación habituales de este tipo de sistemas. Así, para fijar la presión de operación, usaremos un parámetro denominado de modo arbitrario como ‘diferencial de presión’ (DP). Representa la diferencia necesaria entre la presión de operación y la presión osmótica del concentrado para generar una adecuada fuerza motriz del proceso de ósmosis inversa, venciendo los efectos de polarización por concentración o el ensuciamiento de la membrana. La aplicación de dicho parámetro se daría como sigue:

$$p_{F,HPP} = \Pi_{BD} + DP \quad (4.22)$$

Con esto, se daría por finalizado el análisis de cálculo del sistema. Para ejemplificar a modo de sumario todo el planteamiento anterior, se pasa a evaluar un ejemplo práctico. Para dicho ejemplo, se parte de los siguientes valores de partida para los parámetros de operación:

- Entrada de disolución salina de alimentación a 10 °C de temperatura y presión ambiental con salinidad estándar (0,03510504 kg sal/kg disolución) [55]. La temperatura anterior se considera temperatura ambiente. La presión ambiental se considera que es la atmosférica.
- Las salidas finales de producto y concentrado se dan a condiciones de temperatura y presión ambiente.
- Rendimientos de la bomba de alta presión: $\eta_{HPP} = 80\%$; $\eta_{eng,HPP} = 95\%$
- Rendimientos de la bomba de refuerzo: $\eta_{BP} = 75\%$; $\eta_{eng,BP} = 93\%$
- Operación del ERD: $HP_{DP} = 0,7$ bar; $LP_{DP} = 0,6$ bar; eficiencia, $Eff = 97\%$
- Diferencial de presión de operación: $DP = 6$ bar
- Diferencia de presión a la salida de membrana: $TDP = 5$ bar

Los resultados al estudio energético de dicho ejemplo se muestran en las siguientes figuras:

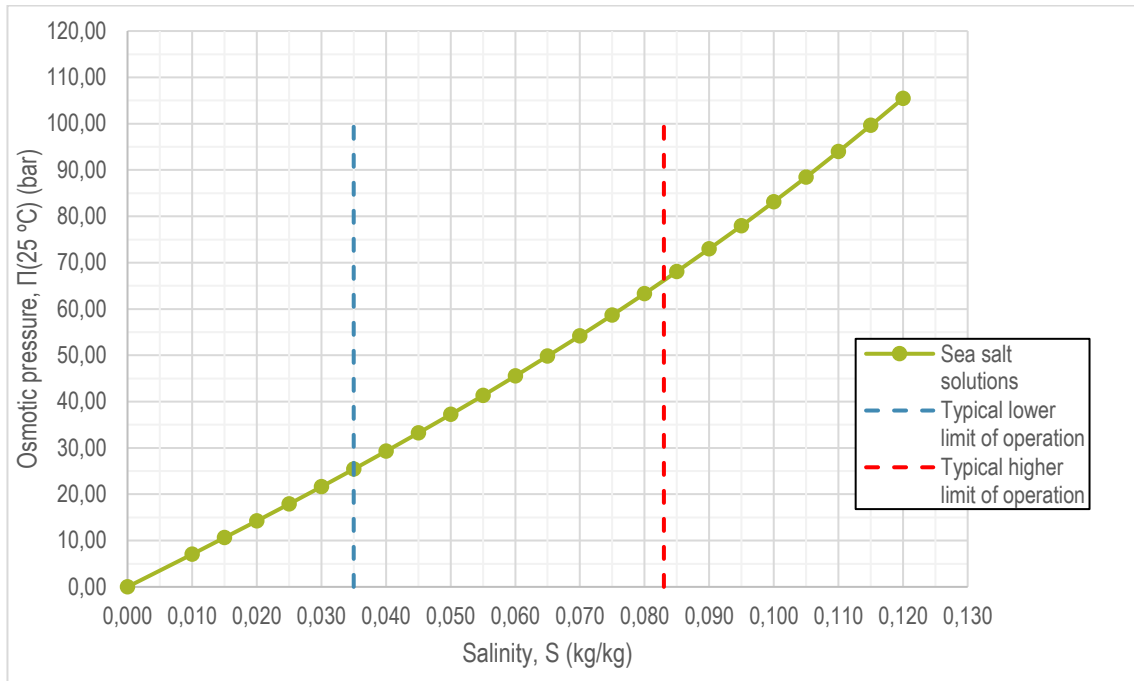


Figura 4-2 Presión osmótica del concentrado ($T=25\text{ °C}$) en función de la salinidad

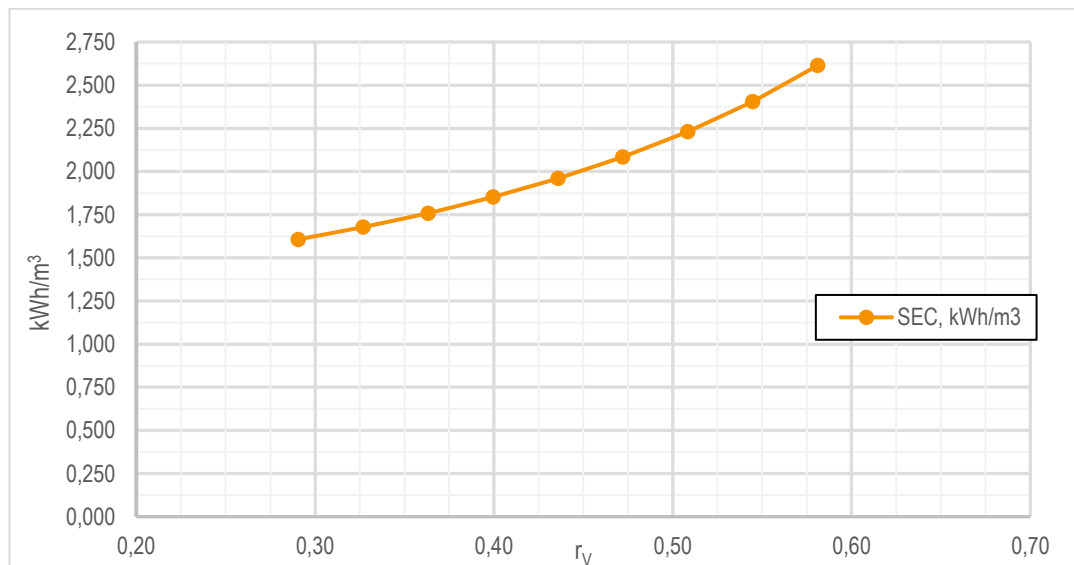


Figura 4-3 Consumo específico de energía para el sistema ejemplo, en función de la conversión expresada como razón de caudales volumétricos de producto y alimentación

Para la relación de recuperación se ha elegido el rango típico de operación. Correspondiente a dicha franja de operación las presiones de operación que deberían alcanzar las bombas HPP y BP iría desde los 43,04 bar hasta unos 71,36. Cabe señalar que la presión máxima de un típico módulo de membrana ronda los 80 bar.

5 EMPLEO DE SOFTWARE PARA SISTEMAS RO

En este capítulo se presentan las herramientas de software existente para realizar simulaciones de sistemas de tratamiento de agua y desalación. Dichas herramientas permiten navegar a través de varias condiciones de funcionamiento y equipos, de manera que es posible establecer nuestro modelo de sistema y analizar finalmente los resultados operacionales que el programa arroja, incorporando al cálculo asimismo información sobre modelos de los productos comerciales actualmente existentes.

En otro sentido, a raíz de los resultados obtenidos en algunas simulaciones ejemplo, se presenta el cálculo de una de las principales características de las membranas, la permeabilidad.

5.1 Simulación de sistemas RO

Como es fácil adivinar, la configuración del sistema del apartado 4.2 es la configuración básica, suficiente para desalación de agua de mar con exigencias de calidad que no sean muy estrictas. También sería habitual en el tratamiento de aguas industriales si no se requieren en el permeado condiciones muy exigentes y la conversión del proceso deseada puede alcanzarse con membranas en serie hasta un máximo de 8. Si la conversión y/o la calidad de permeado deseadas no pueden alcanzarse con la configuración básica, entonces las instalaciones suelen contar con sistemas de más complejidad (Figura 5-1), basados en la combinación o multiplicidad de los siguientes tres configuraciones más simples:

- Extracción de permeado por ambos extremos: debido a que la calidad del permeado disminuye a lo largo de la serie de membranas el flujo de producto puede extraerse desde ambos extremos de la serie.
- Segundo paso: a veces, el flujo de permeado de un primer paso necesita volver a ser tratado, total o parcialmente, por lo que se hace pasar por otra serie de membranas (de agua salobre, BW), denominado segundo paso.
- Múltiples etapas: del mismo modo, el concentrado procedente de la primera etapa puede volverse a tratar en una nueva serie de membranas (segunda etapa).

Si analizamos el catálogo de efluentes mineros de este trabajo, se puede observar como la mayoría de ellos cuenta con características en cuanto a composición que se asemejan en mayor medida a un agua salobre. El espectro de esta clase de agua barre las concentraciones por debajo de molalidad 0,568 mol/kg, correspondientes a 0,035 kg de sólidos disueltos por kg de disolución, valor que se puede considerar como la concentración estándar de sales del agua de mar [55]. Por este motivo, continuando con el análisis energético del tratamiento, se pasa a continuación a evaluar un sistema de tratamiento de dos etapas similar al de agua salobre.

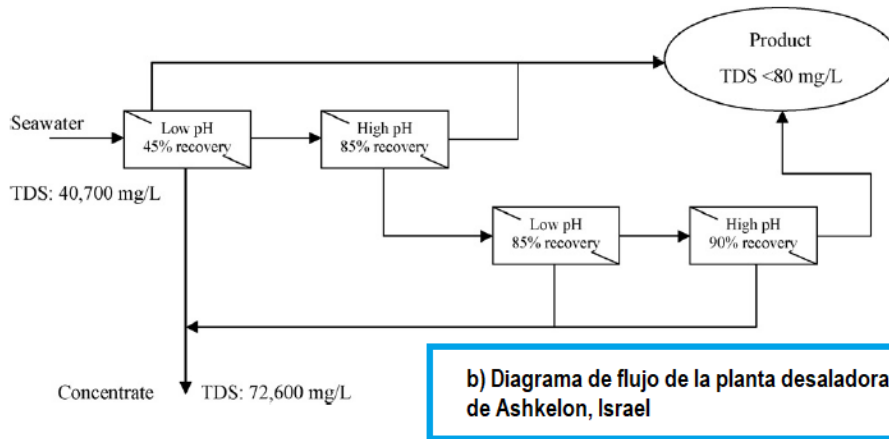
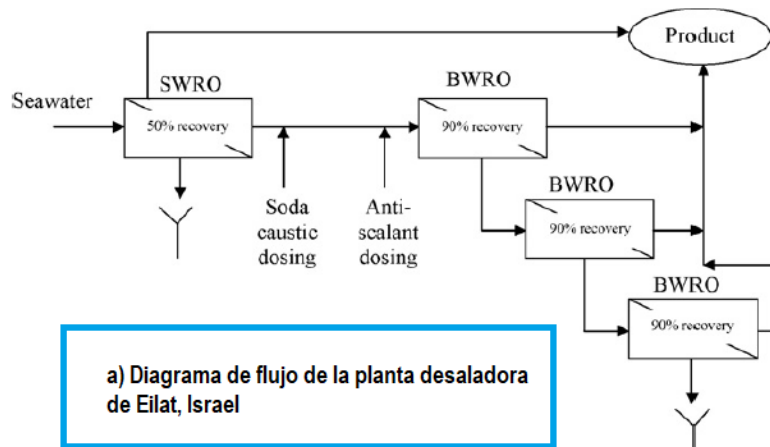


Figura 5-1 Ejemplo de diagramas de flujo de dos instalaciones de desalación en Israel [56]

Dada la amplia variedad de composición de las aguas a tratar que se dan, son los propios fabricantes de membranas los que optan por desarrollar ciertos ensayos y estudios sobre sus propios productos, de modo que sus clientes tengan a disposición una serie de datos aproximativos para la elección de los sistemas de membranas que más les podrían convenir. Hoy en día los fabricantes ofrecen en su catálogo datos sobre las características de sus membranas, así como rangos y límites de operación para las mismas recogidos durante ensayos. También ofrecen software de simulación de sistemas de membranas que permiten variar los equipos, los parámetros de operación y las características del agua, lo cual brinda una aproximación previa a la implantación real de los sistemas.

En este sentido, para este estudio se va a proceder, seguidamente, al empleo de uno de los mencionados softwares; en concreto, el programa Q+ Projection Software v.3.1, desarrollado por LG Chem Water Solutions [57], para examinar la configuración de doble etapa. El sistema generado para la simulación tiene las siguientes características (Figura 5-2):

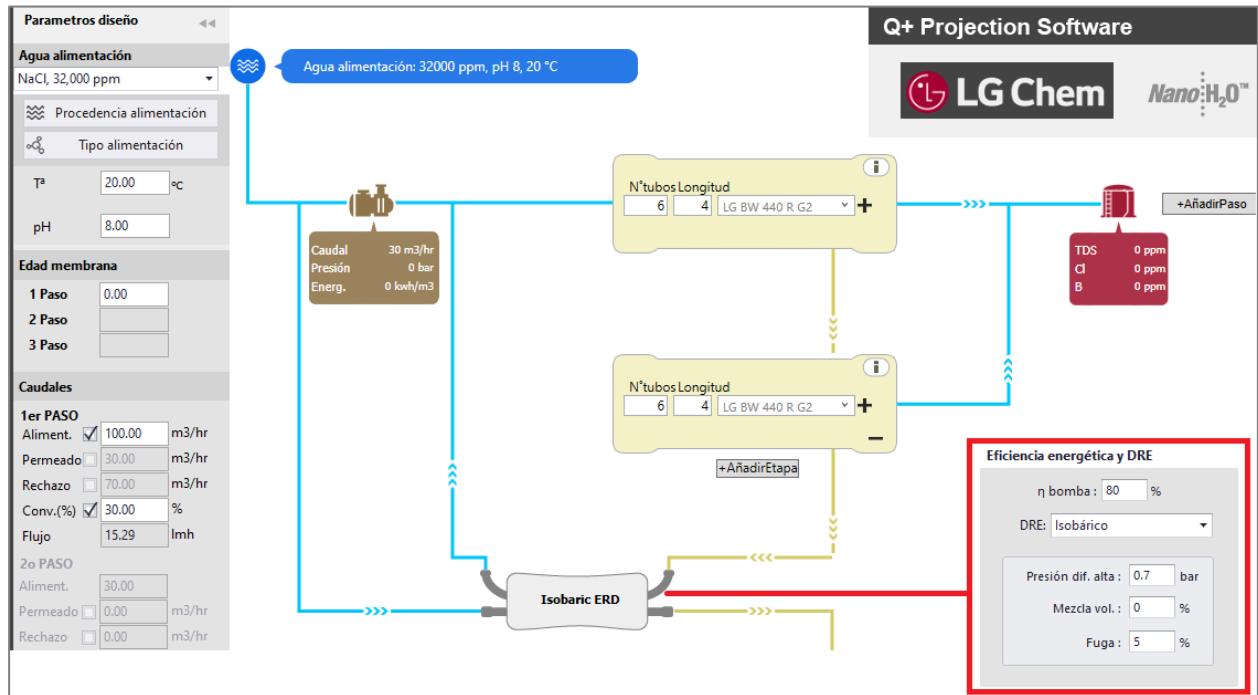


Figura 5-2 Proceso de tratamiento de BWRO en dos etapas. Interfaz de simulación del software Q+ Projection

- Se incluyen una bomba de alta presión (HPP), un dispositivo de recuperación de energía (cámara isobárica, ERD) y una o dos etapas de ósmosis inversa.
- Se fijan la temperatura, el pH y el caudal de alimentación a 20 °C, 8'0 y 100 m³/h, respectivamente.
- La bomba HPP trabaja con un rendimiento global del 80% (valor por defecto de software de algunos fabricantes), o bien 85%. En plantas pequeñas también serían razonables valores de 90-92%.
- La cámara isobárica tiene una diferencia de presión en el lado de alta presión $HP_{DP} = 0,7$ bar. Este parámetro es la diferencia entre la presión de la alimentación a la salida menos la presión del concentrado a la entrada del ERD
- Se van a emplear cuatro modelos de membrana (Tabla 5-1) diseñados para agua salobre por el mismo fabricante LG Chem Water Solutions [58]. Dos de ellos, los modelos LG BW 440 R G2 y LG BW 400 AFR, se encuentran incluidos en la base de datos del propio software. Y, además, los dos restantes, los modelos LG BW 4021 ES y LG BW 2521 R, han sido incorporados mediante una de las herramientas que ofrece el propio software.

Como primer objetivo de este apartado, se pretende estudiar cómo afecta a la instalación los cambios operacionales en cuanto a la composición de la alimentación, la configuración de los dispositivos de membrana (número de tubos de presión y elementos por tubo) y la conversión global. El rango cubierto en los distintos parámetros ha sido el siguiente:

- Presión osmótica en la alimentación: de 1,57 a 9,43 bar (que en el caso de cloruro sódico corresponde a 2.000 a 12.000 mg NaCl/kg disolución).
- Configuración de las etapas: para su elección se ha atendido tanto a las recomendaciones de funcionamiento del fabricante como a la necesidad de reducir al máximo la cantidad de módulos empleados, por cuestiones económicas, intentando satisfacer la mayor cantidad de dichos criterios. Cabe señalar que, de entre ellos, los relacionados con las especificaciones de las membranas en caso de incumplimiento funcionan en el software como señal de error a la hora de mostrar los resultados de cada simulación.
- Recuperación: se han estudiado casos con 30% y 60%.

Tabla 5-1 Especificaciones del fabricante para las membranas LG BW [58]

LG BW 440 R G2 – Características principales		Rechazo superior, caudal alto, durabilidad alta	
Superficie activa de membrana, m ²	41,0	Rechazo de sal (estabilizado), %	99,78
Caudal de permeado*, m ³ /d	12.650	Rechazo de sal (mínimo), %	99,65
(*)Condiciones de testado: 2.000 ppm NaCl a 25°C, 15,5 bar, pH 7, recuperación 15%			
Presión máxima de aplicación, bar	41	Concentración máxima de cloro, ppm	< 0,1
Temperatura máxima de operación, °C	45	Rango de pH continuo (limpieza)	2-11 (1-13)
Turbidez máx. en la alimentación, NTU	1	SDI máximo en la alimentación (15 min)	5,00
Caudal máximo de alimentación, m ³ /h	17,0	Caída de presión máx. por elemento, bar	1
LG BW 400 AFR – Características principales		Anti-ensuciamiento, rechazo alto	
Superficie activa de membrana, m ²	37,0	Rechazo de sal (estabilizado), %	99,60
Caudal de permeado*, m ³ /d	10.500	Rechazo de sal (mínimo), %	99,50
(*)Condiciones de testado: 2.000 ppm NaCl a 25°C, 15,5 bar, pH 7, recuperación 15%			
Presión máxima de aplicación, bar	41	Concentración máxima de cloro, ppm	< 0,1
Temperatura máxima de operación, °C	45	Rango de pH continuo (limpieza)	2-11 (1-13)
Turbidez máx. en la alimentación, NTU	1	SDI máximo en la alimentación (15 min)	5,00
Caudal máximo de alimentación, m ³ /h	17,0	Caída de presión máx. por elemento, bar	1
LG BW 4021 ES – Características principales		Ahorro energético	
Superficie activa de membrana, m ²	3,2	Rechazo de sal (estabilizado), %	99,50
Caudal de permeado*, m ³ /d	1.000	Rechazo de sal (mínimo), %	99,20
(*)Condiciones de testado: 2.000 ppm NaCl a 25°C, 10,3 bar, pH 7, recuperación 8%			
Presión máxima de aplicación, bar	41	Concentración máxima de cloro, ppm	< 0,1
Temperatura máxima de operación, °C	45	Rango de pH continuo (limpieza)	2-11 (2-12)
Turbidez máx. en la alimentación, NTU	1	SDI máximo en la alimentación (15 min)	5,00
Caudal máximo de alimentación, m ³ /h	3,6	Caída de presión máx. por elemento, bar	1
LG BW 2521 R – Características principales		Rechazo alto	
Superficie activa de membrana, m ²	0,9	Rechazo de sal (estabilizado), %	99,60
Caudal de permeado*, m ³ /d	345	Rechazo de sal (mínimo), %	99,30
(*)Condiciones de testado: 2.000 ppm NaCl a 25°C, 15,5 bar, pH 7, recuperación 15%			
Presión máxima de aplicación, bar	41	Concentración máxima de cloro, ppm	< 0,1
Temperatura máxima de operación, °C	45	Rango de pH continuo (limpieza)	2-11 (2-12)
Turbidez máx. en la alimentación, NTU	1	SDI máximo en la alimentación (15 min)	5,00
Caudal máximo de alimentación, m ³ /h	3,6	Caída de presión máx. por elemento, bar	1

5.2 Cálculo de la permeabilidad de una membrana

Como se indicó anteriormente, se ha llevado a cabo el análisis de sistemas con distintos módulos de membrana. Así que, por otra parte, los datos reportados en los distintos casos van a ser utilizados como punto de partida para hallar la permeabilidad, tanto al agua como a sales, de cada uno de los modelos escogidos. La determinación de dichos valores será útil para dimensionar la planta de tratamiento de agua y para estimar la calidad del producto.

Los fenómenos de transporte de disolvente y sales a través de la membrana dependen de las diferencias de salinidad y presiones, las cuales se pueden considerar como condiciones de operación, y de la permeabilidad de la membrana a cada sustancia, la cual se puede considerar como propiedad inherente a la membrana. Sin embargo, algunos de esos factores pueden verse afectados, a su vez, por el fenómeno de polarización de concentración. Las ecuaciones de transporte tendrían la siguiente forma:

$$q_{V,w} = L_w A [(p_{F-BD} - p_P) - (\Pi_{F-BD}^* - \Pi_P)] \quad (5.1)$$

$$q_S = L_S A (S_{F-BD}^* - S_P) \quad (5.2)$$

A dichas ecuaciones se puede aplicar la hipótesis de permeado puro ($\Pi_P \approx 0$; $q_{V,w} = q_{V,P}$), así como es posible asumir una presión media para el canal de alimentación-rechazo, quedando como:

$$L_w = \frac{q_{V,P}}{A \left(p_{F,HPP} - \frac{\Delta p_{loss}}{2} - \Pi_{F-BD}^* \right)} \quad (5.3)$$

$$L_S = \frac{q_S}{A (S_{F-BD}^* - S_P)} \quad (5.4)$$

En las membranas el efecto de la polarización de concentración es importante. Debido a la transferencia de disolvente a través de la membrana, en la superficie de la misma la salinidad aumenta respecto a la que se puede medir a cierta distancia de la pared de membrana. Este fenómeno es relevante en el lado del canal de alimentación-concentrado y despreciable en el canal del permeado. Para cuantificar el efecto de la polarización existe un factor que relaciona la salinidad en la superficie de la membrana y lejos de la misma, denominado factor de polarización de concentración (*CPF*, por sus siglas en inglés).

Pese a su importancia, en el control de operación de los equipos de filtración por membrana es un factor difícil de calcular a consecuencia de la bondad en la toma de medidas de concentración en ambos puntos. En este caso, el software Q+ proporciona en la tabla de resultados el CPF obtenido para cada membrana. El factor de polarización se debe aplicar a la concentración media de alimentación medida en canal, la cual viene dada por:

$$C_{F-BD} = \frac{C_F}{r} \cdot \ln \left(\frac{1}{1-r} \right) \quad (5.5)$$

$$C_{F-BD}^* = CPF \cdot C_{F-BD} \quad (5.6)$$

Siendo el superíndice * el que indica que se está considerando la concentración, salinidad o presión osmótica en la superficie de la membrana mediante la aplicación del CPF. Por último, es necesario tener en cuenta la relación entre el flujo de sales y disolvente:

$$C_P = \frac{q_S}{q_{V,w}} \quad (5.6)$$

$$L_S = \frac{C_P \cdot q_{V,w}}{A(S_{F-BD}^* - S_P)} \quad (5.7)$$

Por lo que restaría únicamente aplicar los resultados de los reportes del software para obtener analíticamente las permeabilidades. La Tabla 5-2 y la Tabla 5-3 muestran los valores utilizados para el correspondiente cálculo, tomados de la operación de la primera membrana de la serie, operando con diversas condiciones de operación. Por otra parte, la Figura 5-3 representa los valores obtenidos para las permeabilidades tras dicho cálculo.

Tabla 5-2 Sumario de casos simulados en Q+ y principales resultados del sistema

CONFIGURACIÓN DEL CASO							RESULTADOS DEL CASO			
Conversión	Membrana	1º etapa		2º etapa		C _F mg/L	SISTEMA			
		tubos	memb/tubo	tubos	memb/tubo		ρ _{F,HPP}	Π _{BD}	Δρ _{loss,1tubo}	Δρ _{loss,2tubo}
							bar	bar	bar	bar
30%	LG BW 440 G R2	6	4	6	4	12.000,0	20,11	12,36	2,72	2,01
						8.000,0	15,79	8,22	2,74	2,03
30%	LG BW 440 G R2	7	6	6	4	12.000,0	18,44	12,74	3,00	1,90
						8.000,0	14,23	8,47	3,02	1,91
60%	LG BW 440 G R2	10	8	7	4	12.000,0	26,04	22,78	1,45	0,58
						8.000,0	17,96	14,16	1,60	0,65
60%	LG BW 440 G R2	9	8	6	5	12.000,0	25,60	21,51	1,80	1,01
						8.000,0	18,55	14,00	1,92	1,04
60%	LG BW 440 G R2	12	7	11	3	12.000,0	17,25	13,97	1,08	0,25
						8.000,0				
30%	LG BW 2521 R	38	8	31	8	12.000,0	33,52	12,31	3,31	3,40
						8.000,0	26,95	8,20	3,32	3,41
60%	LG BW 2521 R	38	8	31	8	12.000,0	71,15	18,53	2,68	1,73
						8.000,0	51,19	12,19	2,81	1,86
30%	LG BW 400 AFR	6	4	6	4	12.000,0	22,30	12,27	2,38	1,74
						8.000,0	17,40	8,18	2,39	1,75
60%	LG BW 400 AFR	9	8	6	5	12.000,0	27,84	20,38	1,58	0,86
						8.000,0	20,16	13,35	1,66	0,88
30%	LG BW 4021 ES	36	8	30	8	12.000,0	20,24	12,57	3,39	3,34
						8.000,0	15,61	8,39	3,40	3,34
60%	LG BW 4021 ES	36	8	30	8	12.000,0	32,18	19,01	2,70	1,69
						8.000,0	23,71	12,48	2,81	1,74

Tabla 5-3 Sumario de casos simulados en Q+ y principales resultados relacionados con la primera membrana de la primera etapa

CONFIGURACIÓN DEL CASO						RESULTADOS DEL CASO					
Conversión	Membrana	1º etapa		2º etapa		C _F mg/L	r	CPF	C _P mg/L	Δp _{loss,1memb} bar	q _{v,w} m³/h
		tubos	memb/tub	tubos	memb/tub						
30%	LG BW 440 G R2	6	4	6	4	12.000,0	6,7%	1,08	74,29	0,79	1,11
						8.000,0	6,2%	1,08	45,62	0,79	1,04
30%	LG BW 440 G R2	7	6	6	4	12.000,0	6,5%	1,08	88,40	0,62	0,93
						8.000,0	6,0%	1,07	54,52	0,62	0,86
60%	LG BW 440 G R2	10	8	7	4	12.000,0	16,2%	1,22	62,97	0,35	1,62
						8.000,0	12,4%	1,16	43,86	0,35	1,24
60%	LG BW 440 G R2	9	8	6	5	12.000,0	14,5%	1,19	61,11	0,42	1,61
						8.000,0	11,9%	1,15	40,88	0,42	1,32
60%	LG BW 440 G R2	12	7	11	3	8.000,0	13,7%	1,17	48,95	0,27	1,14
30%	LG BW 2521 R	38	8	31	8	12.000,0	2,8%	1,33	25,56	0,48	0,07
						8.000,0	2,8%	1,32	15,10	0,48	0,07
60%	LG BW 2521 R	38	8	31	8	12.000,0	7,0%	2,04	17,95	0,48	0,18
						8.000,0	5,9%	1,81	10,78	0,48	0,16
30%	LG BW 400 AFR	6	4	6	4	12.000,0	5,7%	1,09	122,56	0,68	0,96
						8.000,0	5,5%	1,09	73,18	0,68	0,92
60%	LG BW 400 AFR	9	8	6	5	12.000,0	11,9%	1,19	104,41	0,35	1,32
						8.000,0	10,2%	1,16	67,50	0,35	1,13
30%	LG BW 4021 ES	36	8	30	8	12.000,0	4,4%	1,12	106,59	0,52	0,12
						8.000,0	4,3%	1,12	63,11	0,52	0,12
60%	LG BW 4021 ES	36	8	30	8	12.000,0	9,2%	1,29	63,02	0,52	0,26
						8.000,0	8,0%	1,24	39,87	0,52	0,22

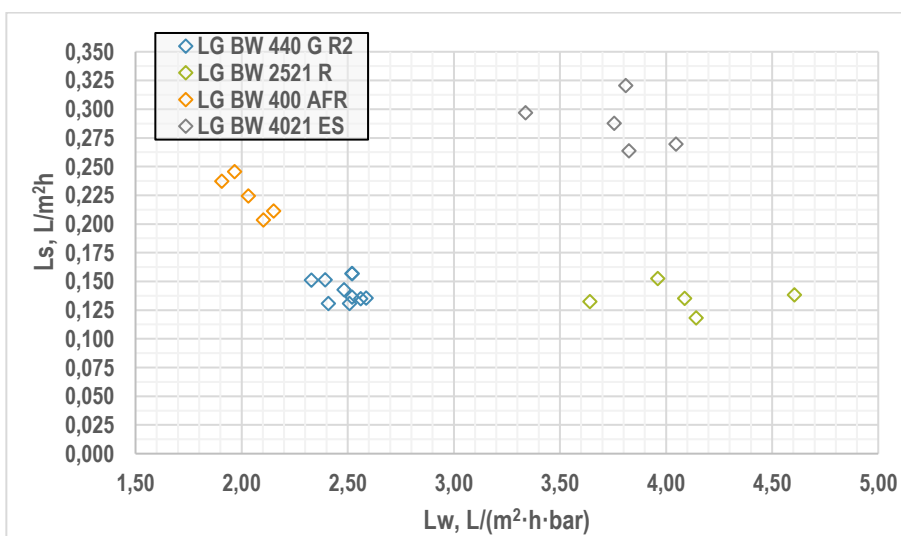


Figura 5-3 Permeabilidad a agua (L_w) y a sales (L_s) de distintos modelos de membranas LG BW calculados a partir de los resultados de simulaciones en el software Q+

Analizando los resultados en la Figura 5-3, se puede observar cierta dispersión en los valores de permeabilidad obtenidos; dándose que dicha propiedad debería presentar un valor único para cada instante y cada membrana, independientemente de las condiciones de operación. Sin embargo, los resultados muestran que tendría cierta utilidad a efectos de realizar una primera estimación de la calidad del producto y del número de elementos de membrana necesarios y de propuestas iniciales de configuraciones posibles.

5.3 Cálculo del consumo específico (SEC)

Como se ha explicado anteriormente, se han estudiado distintos diseños con dos etapas y con diversos valores de operación: presión, conversión y salinidad de la alimentación (ver Tabla 5-4). En la Figura 5-4 puede comprobarse que con independencia del diseño del bastidor hay un comportamiento claramente lineal del SEC respecto a la presión osmótica del concentrado. Esto permite realizar una primera estimación de consumos energéticos en base exclusivamente a este parámetro.

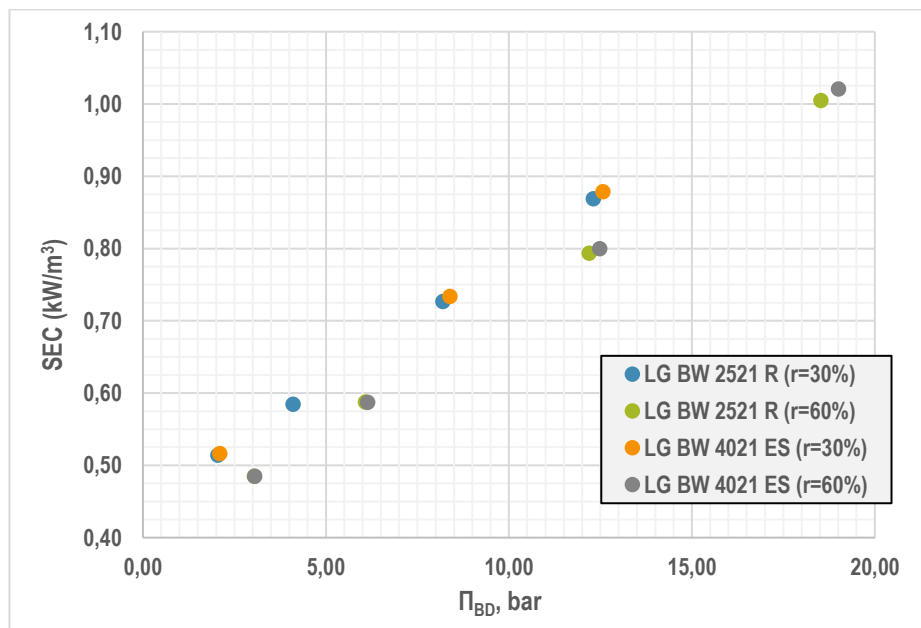


Figura 5-4 Consumo específico de energía para los casos simulados en el software Q+ correspondientes a la serie de membranas 2521 R y 4021 ES citados en la Tabla 5-4

Tabla 5-4 Sumario de casos simulados en Q+ para el cálculo del SEC

CONFIGURACIÓN DEL CASO							RESULTADOS DEL CASO			
Conversión	Membrana	1º etapa		2º etapa		C _F mg/L	P _{F,HPP} bar	Π _{BD} bar	Δp _{loss,1tubo} bar	Δp _{loss,2tubo} bar
		tubos	memb/tub	tubos	memb/tub					
30%	LG BW 440 R G2	6	4	6	4	12.000,0	20,11	12,36	2,72	2,01
						8.000,0	15,79	8,22	2,74	2,03
						2.000,0	9,68	2,05	2,77	2,07
						12.000,0	18,44	12,74	3,00	1,90
30%	LG BW 440 R G2	7	6	6	4	8.000,0	14,23	8,47	3,02	1,91
						2.000,0	8,18	2,10	3,07	1,93
						12.000,0	26,04	22,78	1,45	0,58
						8.000,0	17,96	14,16	1,60	0,65
60%	LG BW 440 R G2	10	8	7	4	4.000,0	11,58	6,77	1,75	0,69
						2.000,0	8,64	3,28	1,84	0,72
						12.000,0	25,60	21,51	1,80	1,01
						8.000,0	18,55	14,00	1,92	1,04
60%	LG BW 440 R G2	9	8	6	5	4.000,0	12,19	6,67	2,10	1,10
						2.000,0	9,27	3,25	2,19	1,16
						8.000,0	17,25	13,97	1,08	0,25
						4.000,0	10,81	6,64	1,19	0,27
60%	LG BW 440 R G2	12	7	11	3	2.000,0	7,84	3,22	1,25	0,28
						12.000,0	33,52	12,31	3,31	3,40
						8.000,0	26,95	8,20	3,32	3,41
						4.000,0	20,81	4,10	3,32	3,42
30%	LG BW 2521 R	38	8	31	8	2.000,0	17,84	2,05	3,33	3,43
						12.000,0	71,15	18,53	2,68	1,73
						8.000,0	51,19	12,19	2,81	1,86
						4.000,0	37,67	6,08	2,89	1,95
60%	LG BW 2521 R	38	8	31	8	2.000,0	31,71	3,04	2,93	2,00
						12.000,0	22,30	12,27	2,38	1,74
						8.000,0	17,40	8,18	2,39	1,75
						4.000,0	12,69	4,09	2,40	1,76
30%	LG BW 400 AFR	6	4	6	4	2.000,0	10,41	2,04	2,40	1,77
						12.000,0	27,84	20,38	1,58	0,86
						8.000,0	20,16	13,35	1,66	0,88
						4.000,0	13,26	6,49	1,76	0,93
60%	LG BW 400 AFR	9	8	6	5	2.000,0	10,04	3,19	1,83	0,97
						12.000,0	20,24	12,57	3,39	3,34
						8.000,0	15,61	8,39	3,40	3,34
						2.000,0	8,86	2,10	3,42	3,35
30%	LG BW 4021 ES	36	8	30	8	12.000,0	32,18	19,01	2,70	1,69
						8.000,0	23,71	12,48	2,81	1,74
						4.000,0	16,25	6,14	2,93	1,84
						2.000,0	12,78	3,05	3,01	1,91
60%	LG BW 4021 ES	36	8	30	8	12.000,0	32,18	19,01	2,70	1,69
						8.000,0	23,71	12,48	2,81	1,74
						4.000,0	16,25	6,14	2,93	1,84
						2.000,0	12,78	3,05	3,01	1,91

6 CONCLUSIONES

Como finalización del presente trabajo, se recogen, a modo resumen, las siguientes conclusiones:

- Latinoamérica es una de las áreas con mayor cantidad de recursos de nuestro planeta, destacando entre ellos los minerales y los hídricos. La extracción de los primeros está poniendo en grave peligro a la disponibilidad, consumo y conservación de los segundos. Es por ello que es necesario abordar el estudio de tecnologías que permitan el desarrollo de dichas actividades extractivas en estas zonas y que a la vez eviten o, al menos, reduzcan al mínimo los problemas creados en sus reservas de agua.
- En Chile el sector minero es responsable de una décima parte del PIB y de algo más de la mitad de las exportaciones nacionales. Lo constituyen principalmente empresas de gran escala, responsables de la práctica totalidad de la producción y dedicadas principalmente a la extracción de cobre, siendo este país su productor líder a nivel mundial. Sin embargo, las instalaciones de menor tamaño son las principales causantes de los problemas ambientales en cuanto a contaminación del agua.
- La minería chilena presenta una tendencia al alza en relación al uso de nuevas fuentes de agua. El empleo de agua marina se lleva realizando de manera equilibrada tanto en su estado salobre como desalada en la última década, paralelamente a las medidas que sitúan la recirculación de agua en los procesos en tasas de en torno al 70%. Claro reflejo de ello son los 36 proyectos e instalaciones desaladoras existentes a fecha de 2016. A eso hay que sumar una proyección de crecimiento anual sostenido de un 1% en el consumo de agua de mar para minería que se prevé hasta el año 2029. En referencia a consumo energético, un mayor tamaño de empresa es sinónimo de un aumento en la eficiencia.
- En Ecuador el sector minero es un sector en desarrollo: se le atribuye menos del 1% del PIB y de las exportaciones nacionales. A pesar de los esfuerzos por convertirlo en un sector de gran escala, históricamente ha sido gobernado por explotaciones artesanales y de pequeña escala. No obstante, actualmente están en desarrollo nueve proyectos mineros de gran escala que pretenden revertir la situación. El hasta ahora carácter artesanal de las minas ecuatorianas, principalmente destinadas a la producción de metales preciosos como el oro, ha desembocado en numerosas controversias e irregularidades, tales como la contaminación de los ríos, el comercio desleal e ilegal o los conflictos legales.
- Dentro del proceso minero, la etapa de concentración, la cual involucra tareas como la molienda, flotación o espesado, es la de mayor consumo de agua y una de las de mayor consumo energético. Desde esta etapa parte o la totalidad de los efluentes pasan a formar parte de los relaves. Dichos relaves constituyen una de las fuentes de contaminación del agua más importante debido a la gran acumulación de metales en ellos presente y la acidificación que se genera. En el proceso de extracción del oro y el cobre destacan como contaminantes el mercurio, el cianuro y el arsénico.

- Tras revisar alrededor de 60 publicaciones, en el presente trabajo se han incluido reportes de análisis de composición de muestras y efluentes correspondientes a 26 de las mismas, los cuales barren escenarios con aguas de distinta índole afectadas por la actividad minera alrededor del mundo, en las que se incluyen explotaciones auríferas y cupríferas entre otras. Estas tablas de datos no son más que un pequeño sumario que, mediante ejemplos reales, pone de manifiesto cuantitativamente la problemática de contaminación metálica que genera el sector minero. De hecho, comparando las concentraciones de estudios realizados en Chile y Ecuador con los correspondientes límites que marcan sus normativas, queda patente como se comete repetidamente infracción, y en algunos casos de manera amplia e involucrando metales como el propio cobre o el mercurio.
- La tecnología de filtración de agua mediante ósmosis inversa (RO) comprende una alternativa válida, en principio, para el tratamiento del efluente minero que requiera un cierto estándar de calidad, ya sea antes de devolverlo a proceso o de su vertido. En el catálogo de efluentes mineros encontramos valores de TDS dentro de un rango similar al del agua de tipo salobre, hecho que sugiere más adecuado un tratamiento mediante BWRO.
- Se ha implementado un modelo de cálculo para analizar el consumo específico (SEC) de un sistema de RO de manera que, con independencia de los módulos de membranas y la configuración elegida, se pueda realizar una primera estimación de dicho consumo solo a partir de la presión osmótica de entrada y la conversión del sistema. Como resultado al análisis de varios sistemas de dos etapas se ha observado un comportamiento lineal del consumo específico frente a la presión osmótica del concentrado, el cual es independiente del diseño y configuración del sistema.
- Se ha implementado un modelo de cálculo de la permeabilidad de distintos módulos de membrana. Pese a que los resultados muestran cierta dispersión, estos tendrían cierta utilidad a efectos de realizar una primera estimación de la calidad del producto, del número de elementos de membrana necesarios y de propuestas iniciales de configuraciones posibles.

REFERENCIAS

- [1] C. Mongue, F. Patzy y C. Viale, «Minería, energía, agua y cambio climático en América Latina,» 2013.
- [2] Lewinsohn, J. L.; Salgado, R.; (CEPAL), «La eficiencia en el uso del agua y la energía en los procesos mineros: casos de buenas prácticas en Chile y el Perú,» Naciones Unidas, Santiago, Chile, 2017.
- [3] EJOLT, «Environmental Justice Atlas,» [En línea]. Available: <https://ejatlas.org/>.
- [4] International Council on Mining & Metals, «Water management in mining: a selection of case studies,» 2012.
- [5] «Sitio web del Proyecto SOLMIDIFF,» [En línea]. Available: <http://institucional.us.es/solmidiff/>.
- [6] «Sitio web del Proyecto REMIND,» [En línea]. Available: <http://www.remindproject.eu>.
- [7] SONAMI, «Mapa minero de Chile,» [En línea]. Available: sonami.cl/mapaminero/.
- [8] G. Hilson y R. Maconachie, «Formalising artisanal and small-scale mining: insights, contestations and clarifications,» *Area*, vol. 47, n° 4, pp. 443-451, 2017.
- [9] S. H. Castro y M. Sánchez, «Environmental viewpoint on small-scale copper, gold and silver mining in Chile,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 11, n° 2, pp. 207-213, 2003.
- [10] COCHILCO, «Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana minería chilena,» 2017.
- [11] Comisión Nacional de Productividad de Chile, «Productividad de la Gran Minería del Cobre,» Santiago, Chile, 2017.
- [12] COCHILCO, «Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales, 1999-2018,» 2019.
- [13] COCHILCO, «Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2018-2029,» 2018.
- [14] Montes, C.; González, A.; (COCHILCO), «Consumo de energía y recursos hídricos en la minería del cobre al 2017,» 2018.
- [15] M. E. Ramírez Requelme, J. F. Ramos, R. S. Angélica y E. S. Brabo, «Assessment of Hg-contamination in soils and stream sediments in the mineral district of Nambija, Ecuadorian Amazon (example of an impacted area affected by artisanal gold mining),» *Applied Geochemistry*, vol. 18, n° 3, pp. 371-381, 2003.
- [16] V. González Carrasco, P. C. Velásquez López, J. Olivero Verbel y N. Pájaro Castro, «Air mercury contamination in the gold mining town of Portovelo, Ecuador,» *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, vol. 87, n° 3, pp. 250-253, 2011.
- [17] Vandegrift, R.; Thomas, D. C.; Roy, B. A.; Levy, M.; (Rainforest Information Centre), «Alcance de las concesiones mineras recientes en Ecuador,» 2018.

- [18] R. J. Oviedo Anchundia y J. A. Naranjo Morán, «Contaminación por metales pesados en el sur de Ecuador asociada a la actividad minera,» *Bionatura*, vol. 2, n° 4, pp. 437-441, 2017.
- [19] L. Sánchez Vázquez, M. G. Espinosa Quezada y M. B. Eguiguren Riofrío, «"Golden reality" or the "reality of gold": artisanal mining and socio-environmental conflict in Chinapintza, Ecuador,» *The extractive industries and society*, vol. 3, n° 1, pp. 124-128, 2016.
- [20] G. Fraekaland Vangsnes, «The meanings of mining: a perspective on the regulation of artisanal and small-scale gold mining in southern Ecuador,» *The extractive industries and society*, vol. 5, n° 2, pp. 317-326, 2018.
- [21] Banco central del Ecuador, «Reporte de minería,» 2019.
- [22] M. Omotola Fashola, V. Mpode Ngole-Jeme y O. Oluranti Babalola, «Heavy metal pollution from gold mines: environmental effects and bacterial strategies for resistance,» *International journal of environmental research and public health*, vol. 13, n° 11, 2016.
- [23] R. N. Hansen, «Contaminant leaching from gold mining tailings dams in the Witwatersrand Basin, South Africa: A new geochemical modelling approach,» *Applied geochemistry*, vol. 61, pp. 217-223, 2015.
- [24] K. Naicker, E. Cukrowska y T. S. McCarthy, «Acid mine drainage arising from gold mining activity in Johannesburg, South Africa and environs,» *Environmental pollution*, vol. 122, pp. 29-40, 2003.
- [25] H. Tutu, T. S. McCarthy y E. Cukrowska, «The chemical characteristics of acid mine drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: The Witwatersrand Basin, South Africa as a case study,» *Applied geochemistry*, vol. 23, pp. 3666-3684, 2008.
- [26] M. Agbesi Acheampong, J. Adiyiah y E. D. Okwaning Ansa, «Physico-chemical characteristics of a gold mining tailings dam wastewater,» *Indian journal of environmental health*, vol. 2, pp. 469-475, 2013.
- [27] M. A. Acheampong, R. J. Meulepas y P. N. Lens, «Removal of heavy metals and cyanide from gold mine wastewater,» *Journal of technology and biotechnology*, vol. 85, pp. 590-613, 2010.
- [28] M. A. Acheampong, K. Paksirajan y P. N. Lens, «Assessment of the effluent quality from a gold mining industry in Ghana,» *Environmental science and pollution research*, vol. 20, pp. 3799-3811, 2013.
- [29] Secretaría Nacional del Agua de Ecuador, «Informe técnico. Muestreo de la calidad del agua en la cuenca del río Cayapas, provincia de Esmeraldas, en los cantones Eloy Alfaro y San Lorenzo,» 2010.
- [30] G. T. Carling, X. Díaz y et al., «Particulate and Dissolved Trace Element Concentrations in Three Southern Ecuador Rivers Impacted by Artisanal Gold Mining,» *Water, air & soil pollution*, vol. 224, 2013.
- [31] J. Pizarro, P. M. Vergara, J. A. Rodríguez y M. A. Valenzuela, «Heavy metals in northern Chilean rivers: spatial variation and temporal trends,» *Journal of hazardous materials*, vol. 181, pp. 747-754, 2010.
- [32] A. Boularbah, C. Schwartz, G. Bitton y J. L. Morel, «Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils,» *Chemosphere*, vol. 63, pp. 802-810, 2006.
- [33] G. Lee, J. M. Bigham y G. Faure, «Removal of trace metals by coprecipitation with Fe, Al and Mn from natural waters contaminated with acid mine drainage in the Ducktown Mining District, Tennessee,» *Applied geochemistry*, vol. 17, pp. 569-581, 2002.

- [34] C. M. Zhong, Z. L. Xu, X. H. Fang y L. Cheng, «Treatment of acid mine drainage (AMD) by ultra-low-pressure reverse osmosis and nanofiltration,» *Environmental engineering science*, vol. 24, n° 9, pp. 1297-1306, 2007.
- [35] D. Banks, P. L. Younger, R. T. Arnesen, E. R. Iversen y S. B. Banks, «Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly,» *Environmental geochemistry*, vol. 32, n° 3, pp. 157-174, 1997.
- [36] G. R. Nabi Bidhendi, A. R. Karbassi, T. Nasrabadi y H. Hoveidi, «Influence of copper mine on surface water quality,» *International journal of environmental science and technology*, vol. 4, n° 1, pp. 85-91, 2007.
- [37] J. Narváez, P. Richter y M. I. Toral, «Preliminary physical chemical characterization of river waters and sediments affected by copper mining activity in central Chile. Application of multivariable analysis,» *Journal of Chilean chemical society*, vol. 52, n° 3, pp. 1261-1265, 2007.
- [38] D. K. Nordstrom, J. W. Ball, R. J. Donahoe y D. Whittemore, «Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa,» *Geochimica et Cosmochimica Acta - Journal*, vol. 53, pp. 1727-1740, 1989.
- [39] M. Nasirian, «A new water quality index for environmental contamination contributed by mineral processing: a case study of amang (tin tailing) processing activity,» *Journal of applied sciences*, vol. 7, n° 20, pp. 2977-2987, 2007.
- [40] T. M. Valente y C. Leal Gomes, «Occurrence, properties and pollution potential of environmental minerals in acid mine drainage,» *Science of the total environment*, vol. 407, pp. 1135-1152, 2009.
- [41] D. K. Nordstrom, D. W. Blowes y C. J. Ptacek, «Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: an update,» *Applied geochemistry*, vol. 57, pp. 3-16, 2015.
- [42] C. Lin, Y. Wu, W. Lu, A. Chen y Y. Liu, «Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event,» *Journal of hazardous materials*, vol. 142, pp. 199-207, 2007.
- [43] L. Ribeiro, N. Kretschmer, J. Nascimento, A. Buxo, T. S. Rötting, G. Soto, M. Soto, J. Oyarzún, H. Maturana y R. Oyarzún, «Water quality assessment of the mining-impacted Elqui river basin, Chile,» *Mine water and the environment*, vol. 33, pp. 165-176, 2014.
- [44] C. Candeias, P. Freire Ávila, E. Ferreira da Silva, A. Ferreira, A. R. Salgueiro y J. P. Teixeira, «Acid mine drainage from the Panasqueira mine and its influence on Zêzere river (Central Portugal),» *Journal of African Earth sciences*, vol. 99, pp. 705-712, 2014.
- [45] M. E. P. Gomes y P. J. Favas, «Mineralogical controls on mine drainage of the abandoned Ervedosa tin mine in north-eastern Portugal,» *Applied geochemistry*, vol. 21, pp. 1322-1334, 2006.
- [46] M. Olías, J. M. Nieto, A. M. Sarmiento, J. C. Cerón y C. R. Cánovas, «Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel river (South-west Spain),» *Science of the total environment*, vol. 333, pp. 267-281, 2004.
- [47] A. Sainz, J. A. Grande y M. L. de la Torre, «Characterisation of heavy metal discharge into the Ria of Huelva,» *Environment international*, vol. 30, pp. 557-566, 2004.
- [48] T. Valente, M. J. Rivera, S. F. Almeida, C. Delgado, P. Gomes, J. A. Grande, M. L. de la Torre y M. Santisteban, «Characterization of water reservoirs affected by acid mine drainage: geochemical,

- mineralogical, and biological (diatoms) properties of the water,» *Environmental science and pollution research*, vol. 23, pp. 6002-6011, 2016.
- [49] Congreso Nacional de Chile, «Marco regulatorio en Chile y algunas experiencias internacionales en materia de descarga de residuos líquidos a distintos cuerpos receptores,» 2018.
- [50] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, «Decreto N° 90,» Chile, 2001.
- [51] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, «Decreto N° 46,» Chile, 2003.
- [52] Presidencia de la República de Ecuador, «Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua».
- [53] M. H. Sharqawy, J. H. Lienhard y S. M. Zubair, «Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlation and data,» *Desalination and water treatment*, vol. 16, pp. 354-380, 2010.
- [54] A. Buenaventura Pouyfaucou y L. García Rodríguez, de *Seawater reverse osmosis desalination technology: comprehensive assesment of energy consumption*, 2018, pp. 59-138.
- [55] F. J. Millero, R. Feistel, D. G. Wright y T. J. McDougall, «The composition of standard seawater and the definition of the reference-composition salinity scale,» *Deep sea research Part I: Oceanographic research papers*, vol. 55, pp. 50-72, 2008.
- [56] K. L. Tu, L. D. Nghiem y A. R. Chivas, «Boron removal by reverse osmosis membranes in seawater desalination applications,» *Separation and Purification Technology*, vol. 75, pp. 87-101, 2010.
- [57] LG Chem Water Solutions, «Q+ Projection Software v.3.1 (EN),» 2020. [En línea]. Available: <http://www.lgwatersolutions.com/en/tools>.
- [58] LG Chem Water Solutions, «Brackish Water RO Data Sheets,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.lgwatersolutions.com/en/technical-document/data-sheets/brackish-water-ro>.