



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

---

**ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD  
TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN SISTEMA DE  
RECUPERACIÓN DE AGUA, EN LA ETAPA DE  
DRAGADO MINERO DE LA EMPRESA NEXXO S.A.,  
PARA SU REUTILIZACIÓN EN LA MINERÍA DEL  
COBRE Y DEL MOLIBDENO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: Valentina Andrea Gallardo Cáceres**

**PROFESOR GUÍA: Romina Álvarez**

---

**Valparaíso, Chile**

**2022**

## RESUMEN

La escasez hídrica es un problema que afecta directamente a la minería en Chile, ya que el agua es fundamental para que se lleven a cabo todos procesos que en ella se desarrollan, además es por esta misma razón que se generan problemas socioambientales con las comunidades aledañas, por lo que es de suma importancia implementar medidas para poder utilizar el recurso hídrico de una forma mucho más eficiente.

Para dar solución a esta problemática es que se propuso analizar la factibilidad técnico-económica para implementar un sistema de recuperación de agua, en la etapa de dragado que lleva a cabo la empresa Nexxo S.A. en distintas piscinas de emergencias presentes en las faenas mineras del país, para su posterior reutilización como agua para riego. Para llevar a cabo este objetivo se hizo una caracterización del agua a tratar, se seleccionaron las tecnologías idóneas y se realizó el diseño conceptual de la solución, además de estimar la factibilidad económica. Se llevó a cabo un análisis de la composición del agua de las piscinas en la etapa post dragado y se compararon con la Norma Chile 1333.Of 78, que establece los requisitos que deben tener el agua destinada para riego. De este muestreo se obtuvieron que 14 parámetros se encontraban por sobre los límites máximos de esta Norma, los cuales fueron, Aluminio, Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo total, Hierro, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Sodio porcentual, Sulfatos y Zinc.

Con esta información se diseñó un sistema para tratar un caudal de 1800 m<sup>3</sup>/día, que luego de la etapa de dragado contempla una separación de sólidos utilizando una centrífuga decantadora y posteriormente un proceso de ultrafiltración para retirar los elementos químicos que están en concentraciones sobre la Norma. La selección de esta última tecnología se hizo en función de algunos criterios, como la facilidad de transporte, cumplimiento con el caudal requerido, calidad de agua post-proceso, facilidad de manipulación, entre otros.

Por último, el análisis económico indica que esta propuesta resulta ser rentable ya que se obtiene un valor del VAN positivo (1.279 UF) y la Tasa Interna de Retorno (18%) es mayor a la rentabilidad exigida (15%), por lo que se concluye que este proyecto es factible de implementar tanto técnica como económicamente.

---

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. AGUA .....	1
1.2. MINERÍA DEL COBRE .....	4
1.2.1. Exploración geológica.....	4
1.2.2. Extracción.....	4
1.2.3. Chancado .....	5
1.2.4. Proceso Pirometalúrgico.....	5
1.2.5. Proceso Hidrometalúrgico.....	7
1.3. MINERÍA DEL MOLIBDENO .....	8
1.4. RELAVES .....	9
1.4.1. Códigos, reglamentos, regulación y legislación aplicable en Chile.....	10
1.4.2. Tipos de depósito de relaves .....	11
1.5. EMPRESA NEXXO S.A. ....	14
1.6. DRAGADOS MINEROS.....	15
1.6.1. Etapas del proceso .....	15
1.6.2. Equipos utilizados en el servicio .....	17
1.7. PISCINAS ILS ( <i>INTERMEDIATE LIQUID SOLUTION</i> ) .....	20
1.8. NORMATIVA APLICABLE .....	21
1.8.1. Norma Chilena 1333. Of78 .....	21
1.8.2. Norma Chilena 409/1. Of2005 .....	25
2. PROBLEMA.....	31
3. OBJETIVOS .....	33
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	33
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
4. METODOLOGÍA.....	34
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA A TRATAR .....	34

---

4.1.1.	Definir el flujo de agua a tratar .....	34
4.1.2.	Definir los componentes del depósito de relaves y piscina de emergencia .	35
4.2.	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS .....	36
4.2.1.	Vigilancia tecnológica .....	36
4.2.2.	Evaluación comparativa.....	36
4.2.3.	Metodología de selección .....	36
4.3.	DISEÑO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN .....	38
4.4.	FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	38
4.4.1.	Flujo de caja .....	38
4.4.2.	Cálculo de VAN y TIR.....	38
5.	RESULTADOS .....	39
5.1.	CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA .....	39
5.1.1.	Cálculo del flujo de agua a tratar .....	39
5.1.2.	Componentes analizados de los depósitos de relaves y piscina de emergencia 40	
5.2.	SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS .....	45
5.2.1.	Tecnologías estudiadas.....	45
5.2.2.	Evaluación comparativa.....	46
5.2.3.	Tecnología seleccionada .....	49
5.3.	DISEÑO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN .....	55
5.4.	FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	60
5.4.1.	Flujo de caja .....	60
5.4.2.	Cálculo de VAN y TIR.....	63
6.	DISCUSIÓN.....	64
7.	CONCLUSIONES .....	67
	BIBLIOGRAFÍA.....	69
	ANEXO .....	78

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Proyección de consumo de agua total en la minería del cobre periodo 2020-2031 (m <sup>3</sup> /s). Comisión Chilena del Cobre, 2020.....	2
<b>Figura 1.2:</b> Consumo de agua estimado en la minería del cobre según tipo de proceso, periodo 2020-2031. Comisión Chilena del Cobre, 2020. ....	3
<b>Figura 1.3:</b> Proceso Pirometalúrgico. Elaborado a partir de proceso publicado en Codelco Educa. Codelco, 2018.....	5
<b>Figura 1.4:</b> Proceso Hidrometalúrgico. Elaborado a partir de proceso publicado en Codelco Educa. Codelco, 2018.....	7
<b>Figura 1.5:</b> Tranque de Relaves Carén. Extraído de Codelco,2011. ....	12
<b>Figura 1.6:</b> Diseño de planta de embalse de Relaves. Extraído de tetrattech.com.....	12
<b>Figura 1.7:</b> Relave espesado. Ministerio de Minería,2021.....	13
<b>Figura 1.8:</b> Relave Filtrado. Ministerio de Minería, 2021. ....	13
<b>Figura 1.9:</b> Relave en pasta. Ministerio de Minería, 2021. ....	14
<b>Figura 1.10:</b> Dragas con cables de acero. Dragflow Latin America (2021), dragflowpumps.com.....	16
<b>Figura 1.11:</b> Dibujo 3D de Draga eléctrica Mud Cat 20E. Extraída de Mud Cat <sup>TM</sup> , mudcatdredge.com.....	16
<b>Figura 1.12:</b> Bomba Dragflow. Extraída de dragflowpumps.com, 2021. ....	17
<b>Figura 1.13:</b> Balsa con Bomba Dragflow. Extraído de dragflowpumps.com, 2021.....	18
<b>Figura 1.14:</b> Draga Pit Hog. Mud Cat <sup>TM</sup> . mudcatdredge.com.....	19
<b>Figura 1.15:</b> Draga Dragflow. Dragflow Latin America (2021). dragflowpumps.com. ....	19
<b>Figura 1.16:</b> Draga anfibia. Dragflow Latin America (2021). Dragflowpumps.com.....	20
<b>Figura 1.17:</b> Piscina de drenes Tranque Quillayes, Dirección General de Aguas, 2015. .	21
<b>Figura 4.1:</b> Diagrama de realización de actividades. ....	34
<b>Figura 5.1:</b> Explicación del proceso de filtración tangencial. SEFILTRA S.A. (2019).....	47
<b>Figura 5.2:</b> Membrana espiral. SEFILTRA S.A. (2019).....	47
<b>Figura 5.3:</b> Membrana de fibra hueca. SEFILTRA S.A. (2019).....	47
<b>Figura 5.4:</b> Membrana tubular. SEFILTRA S.A. (2019) .....	48
<b>Figura 5.5:</b> Diagrama representativo de "Centrífuga Decantadora". Alfa Laval S.A. (2021). .....	48
<b>Figura 5.6:</b> Diagrama explicativo de funcionamiento de "Filtro Prensa". Chamorro (2016). .....	49

<b>Figura 5.7:</b> Diseño conceptual con todas las etapas de la solución.....	55
<b>Figura 5.8:</b> Diagrama de bloque etapa 1 de proceso.....	55
<b>Figura 5.9:</b> Diagrama de bloque etapa 2 de proceso.....	57
<b>Figura 5.10:</b> Diagrama de bloque etapa 3 de proceso.....	58
<b>Figura 5.11:</b> Diagrama de bloque etapa 4 de proceso.....	59
<b>Figura 5.12:</b> Diagrama de flujo de solución propuesta. ....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. Fuente: NCh 1333/78. ....	22
<b>Tabla 1.2:</b> Clasificación de aguas para riego según su salinidad. Fuente: NCh 1333. Of78. ....	23
<b>Tabla 1.3:</b> Requisitos generales de aguas destinadas a vida acuática. Fuente: NCh 1333. Of78.....	24
<b>Tabla 1.4:</b> Factores de seguridad para diferentes tóxicos. Fuente: NCh1333/78.....	25
<b>Tabla 1.5:</b> Elementos esenciales. Fuente: NCh 409/1. Of2005. ....	27
<b>Tabla 1.6:</b> Elementos o sustancias no esenciales. Fuente: NCh 409/1. Of2005. ....	27
<b>Tabla 1.7:</b> Sustancias orgánicas. Fuente: NCh 409/1. Of2005. ....	27
<b>Tabla 1.8:</b> Plaguicidas. Fuente: NCh 409/1. Of2005.....	28
<b>Tabla 1.9:</b> Productos secundarios de la desinfección. Fuente: NCh 409/1. Of2005.....	28
<b>Tabla 1.10:</b> Límites máximos para elementos radiactivos. Fuente: NCh 409/1. Of2005. .	28
<b>Tabla 1.11:</b> Parámetros relativos a características organolépticas. Fuente: NCh 409/1. Of2005.....	29
<b>Tabla 4.1:</b> Parámetros a considerar para relaves y piscinas de emergencia. ....	35
<b>Tabla 4.2:</b> Explicación y ponderación de cada uno de los criterios a evaluar. ....	37
<b>Tabla 4.3:</b> Explicación de la puntuación para cada criterio según escala Likert.....	37
<b>Tabla 5.1:</b> Bombas disponibles para realizar el servicio. Elaboración propia.....	39
<b>Tabla 5.2:</b> Depósitos de relaves que cumplen con criterios. Elaborado a partir de planilla excel de SERNAGEOMIN (2020).....	40
<b>Tabla 5.3:</b> Depósitos de relaves seleccionados.....	40
<b>Tabla 5.4:</b> Datos obtenidos de caracterización de agua clara de relave de estero Carén. Elaborada a partir de información publicada por Zbinden (2011). ....	42

---

<b>Tabla 5.5:</b> Caracterización de agua clara de tranque de relaves Pampa Austral. Elaborada a partir de los datos publicados por Ginocchio (2012).....	43
<b>Tabla 5.6:</b> Caracterización de líquido obtenido de PE1. ....	44
<b>Tabla 5.7:</b> Tecnologías estudiadas.....	45
<b>Tabla 5.8:</b> Ventajas y desventajas de las posibles tecnologías a implementar. ....	46
<b>Tabla 5.9:</b> Total obtenido para la tecnología "Ultrafiltración".....	50
<b>Tabla 5.10:</b> Total obtenido para la tecnología "Nanofiltración".....	51
<b>Tabla 5.11:</b> Total obtenido para la tecnología "Osmosis Inversa". ....	52
<b>Tabla 5.12:</b> Total obtenido para la tecnología "Centrífuga Decantadora".....	53
<b>Tabla 5.13:</b> Total obtenido para la tecnología "Filtro Prensa". ....	54
<b>Tabla 5.14:</b> Total obtenido de cada tecnología. ....	55
<b>Tabla 5.15:</b> Características técnicas de bomba DragFlow EL604. Elaborada a partir de información extraída de DragFlow Ultimate Efficiency (2021d). ....	56
<b>Tabla 5.16:</b> Flujo de caja de proyecto propuesto, periodo 0 al 5 expresado en UF.....	61
<b>Tabla 5.17:</b> Flujo de caja de proyecto propuesto, periodo 6 al 11 expresado en UF.....	62
<b>Tabla 5.18:</b> Flujo de caja de proyecto propuesto, periodo 12 al 15 expresado en UF.....	62
<b>Tabla 5.19:</b> Datos utilizados para cálculo del VAN y TIR en UF. ....	63

# 1. INTRODUCCIÓN

La escasez hídrica es un problema que afecta directamente a la minería en Chile, ya que el agua es fundamental para que se lleven a cabo todos los procesos que en ella se desarrollan. Por lo que, se hace necesario implementar medidas o bien acciones para poder hacer un uso más eficiente del agua.

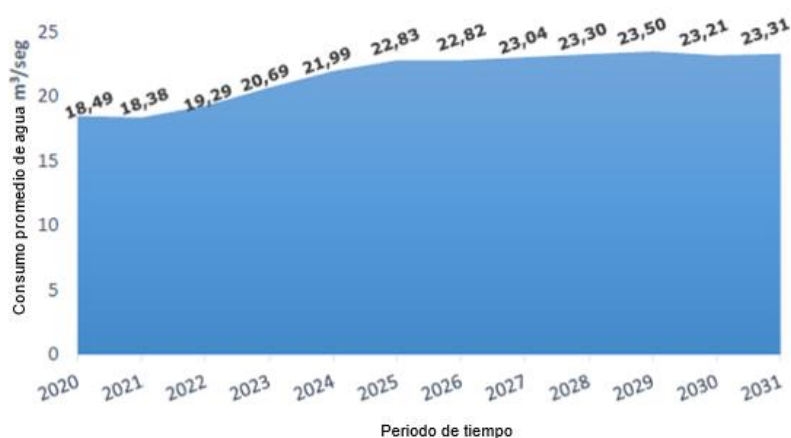
## 1.1. AGUA

El agua cubre el 71% de la superficie del planeta y es matriz de la vida. El 97,5% del total de agua que existe se encuentra principalmente en océanos con una constitución salina que no la hace utilizable para su consumo directo. El 2,5% restante corresponde a agua dulce. De esta cifra, el 75% está presente en estado sólido en glaciares y casquetes polares, considerados como grandes reservas hídricas prácticamente inaccesibles para el hombre, aunque, debido al factor cambio climático, estos depósitos están sufriendo una disminución constante de sus reservas. El agua fresca disponible para uso humano, agrícola, industrial y otros, que está presente en ríos, lagos y acuíferos subterráneos, sólo equivale al 0,62% del total. Se trata de un bien escaso que enfrenta una creciente presión demográfica sobre el recurso, resultando fácil concluir que la competencia por el acceso a éste será de grandes proporciones. Un desafío que obliga a las naciones a implementar nuevas herramientas para lograr un acceso universal y equitativo al recurso, poner en práctica la gestión integrada de las aguas para garantizar calidad de vida a la población mundial y a su vez, proteger los ecosistemas relacionados con este vital elemento (Ministerio de Obras Públicas & Dirección General de Aguas, 2016).

En nuestro país la situación de los recursos hídricos durante las tres últimas décadas se ha visto fuertemente influenciada por la estrategia de desarrollo nacional, por las políticas macroeconómicas y otros sectores. El papel fortalecedor del mercado y el fomento de una economía orientada a la exportación basada principalmente en productos como el cobre, la madera y otros, los cuales utilizan agua en su proceso de producción han llevado a un aumento del uso del agua, principalmente en la parte norte y centro del país, siendo muy probable que estas tendencias continúen en el corto a medio plazo (Banco Mundial, 2011).

En particular, el abastecimiento de agua de la minería proviene en un 30% de fuentes superficiales, 41% de fuentes subterráneas, 23% es extraída del mar y 6% es utilizada por parte de terceros. Actualmente  $\frac{3}{4}$  del agua usada en el proceso de producción corresponde a agua recirculada (Consejo Minero, 2020).

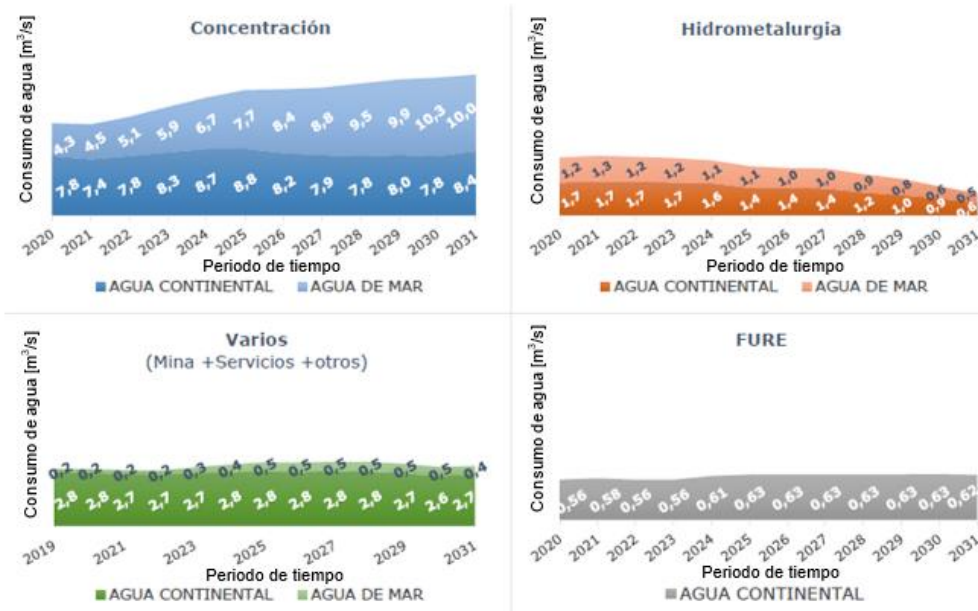
A nivel nacional, como resultado de las estimaciones que fueron realizadas, se espera que al año 2031 exista un consumo promedio de agua de 23,3 m<sup>3</sup>/s, con una tasa de crecimiento de un 2,1%, (Comisión Chilena del Cobre, 2020) tal como se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1:** Proyección de consumo de agua total en la minería del cobre periodo 2020-2031 (m<sup>3</sup>/s).  
Comisión Chilena del Cobre, 2020.

Si bien la minería a nivel nacional representa un 3% de los usos consuntivos del agua, sus actividades se concentran en zonas secas o cuencas donde se encuentran las nacientes de las aguas. Por su ubicación en la zona centro y norte del país su incidencia regional y local puede ser mayor que la reflejada a escala nacional (Comisión Chilena del Cobre, 2020).

En la figura 1.2 es posible observar los diferentes consumos de agua que existen en el proceso de obtención del cobre, donde “FURE” se refiere a las etapas de fundición y refinación.



**Figura 1.2:** Consumo de agua estimado en la minería del cobre según tipo de proceso, periodo 2020-2031. Comisión Chilena del Cobre, 2020.

Es posible concluir que en la etapa de concentración se demanda la mayor parte del agua en la minería del cobre, debido tanto a la proyección de producción de concentrados por el natural agotamiento de los recursos oxidados y su reemplazo por los recursos sulfurados, como también a lo intensivo en consumo de agua en el proceso de concentración.

Cabe destacar que las etapas nombradas del proceso productivo serán explicadas en la sección 1.2.

Según el documento de Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020-2031 (Comisión Chilena del Cobre, 2020), se espera que para el año 2031 el consumo de agua continental por concepto de procesamiento de minerales vía concentración alcance el 68%, para la producción de cátodos sea de 5%, el agua en varios sea del 22% y para FURE sea del 5%.

## **1.2. MINERÍA DEL COBRE**

La minería es el sector más activo en el desarrollo de la economía nacional, de hecho, esta actividad representa el 10% del PIB de Chile, esto se debe fundamentalmente al monto de sus inversionistas y la magnitud alcanzada en la producción de cobre. Chile es el país que más invierte en exploración minera por superficie de territorio, la cifra es de US\$ 762/ km<sup>2</sup>. Más del 90% de las exportaciones del país corresponden a cobre, el cual puede ser exportado de dos formas: Refinado, lo que corresponde a cátodos con una pureza del 99,99% de cobre, esta forma de exportación corresponde al 53% total de las exportaciones del país; y, el otro 47% corresponde a Concentrado de cobre, el cual tiene una pureza del 30% de cobre (Consejo Minero, 2020).

Cabe destacar que 6 de las 10 minas más importantes del mundo se encuentran en Chile, las cuales corresponden a Escondida, Collahuasi, El Teniente, Pelambres, Rodomiro Tomic y Los Bronces (Consejo Minero, 2020).

Dentro del proceso productivo es posible identificar las etapas descritas a continuación.

### **1.2.1. Exploración geológica**

La exploración geológica es la primera etapa del proceso productivo del cobre, en esta es posible verificar los tipos de rocas presentes en el subsuelo y verificar si existen minerales o no en el sector. El cobre se encuentra diseminado en ciertos sectores de la corteza terrestre y su ubicación está determinada por los diferentes procesos geológicos que han ocurrido en la historia del planeta. El origen de este mineral está asociado a la introducción de magma a gran temperatura y con gran presión en la corteza terrestre (Corporación Nacional del Cobre, 2018b).

### **1.2.2. Extracción**

Para la extracción del mineral es necesario desarrollar una serie de etapas, entre ellas, perforación de las rocas, tronaduras y estudio de los explosivos a utilizar. Una vez finalizadas estas etapas, se debe realizar el carguío y transporte del mineral obtenido (Corporación Nacional del Cobre, 2019a).

### 1.2.3. Chancado

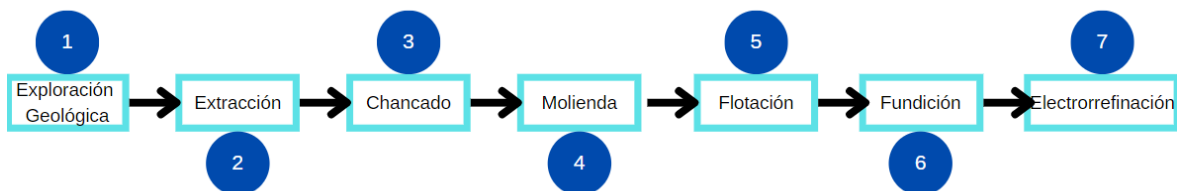
El propósito de este proceso es reducir el tamaño de las rocas hasta obtener un producto de granulometría adecuada que permita el desarrollo de la lixiviación en pilas o depósitos en forma eficiente, además para que permita un buen coeficiente de permeabilidad de la solución. El mineral se suele triturar a tamaños inferiores a 1 mm (Corporación Nacional del Cobre, 2018c).

Independientemente de las variables que existan, el tamaño de partícula del mineral o metal a lixiviar define la velocidad de disolución y, por consiguiente, el porcentaje de recuperación en un tiempo determinado (Corporación Nacional del Cobre, 2018c).

Luego de la etapa de chancado el proceso productivo del cobre puede seguir dos caminos, el proceso productivo del cobre sulfurado (Proceso Pirometalúrgico) o bien, el proceso productivo del cobre oxidado (Proceso Hidrometalúrgico), los que son descritos en las secciones 1.2.4 y 1.2.5 respectivamente.

### 1.2.4. Proceso Pirometalúrgico

Luego de la etapa de chancado se realizan las etapas 4 a la 7 señaladas en la Figura 1.3.



**Figura 1.3:** Proceso Pirometalúrgico. Elaborado a partir de proceso publicado en Codelco Educa. Codelco, 2018.

#### 1.2.4.1. Molienda

En el proceso de Molienda se continúa reduciendo el tamaño de las partículas obtenidas en el proceso de Chancado, hasta obtener una granulometría máxima de unos 180 micrones, la que permite la liberación de la mayor parte de minerales de cobre en forma de partículas individuales (Corporación Nacional del Cobre, 2019b).

#### 1.2.4.2. Flotación

La flotación es definida como un proceso físico-químico de tensión superficial, mediante el cual se separan los minerales sulfurados del metal de otros minerales y especies que componen la mayor parte de la roca original (Corporación Nacional del Cobre, 2019c).

Durante este proceso el mineral molido se adhiere superficialmente a burbujas de aire previamente insufladas, lo que determina la separación del mineral de interés (puede ser cobre u otros). La adhesión del mineral a estas burbujas de aire dependerá de las propiedades hidrofílicas (afinidad con el agua) y aerofílicas (afinidad con el aire) de cada especie mineral que se requiera separar de aquellas que carecen de valor comercial (Corporación Nacional del Cobre, 2019c).

#### 1.2.4.3. Fundición

El proceso de fundición tiene asociada las siguientes etapas:

- Recepción y manejo de materias primas e insumos.
- Secado de concentrados.
- Alimentación de concentrados al horno de fusión.
- Fusión de concentrados.
- Limpieza de escorias.
- Granallado de eje alta ley y escorias.
- Preparación y manejo de eje de alta ley.
- Conversión de eje de alta ley.
- Refinación y moldeo de ánodos.
- Plantas de limpieza de gases.

Luego de que el material pasa por todas estas etapas, logra aumentar su pureza desde un 30% a un 40%, en un inicio en el concentrado de cobre, hasta un 99,5% en el ánodo (Corporación Nacional del Cobre, 2019d).

De las etapas mencionadas anteriormente, la fusión y la conversión son las más importantes debido a que resultan ser muy determinantes en el proceso general. Por un lado, la fusión tiene el objetivo de concentrar el metal a recuperar, mediante una separación de fases de alta temperatura, una sulfurada rica en el metal y otra oxidada o pobre en él. La conversión por su parte elimina el azufre y el hierro presentes en la fase sulfurada,

mediante oxidaciones del baño fundido para obtener un cobre final relativamente puro (Corporación Nacional del Cobre, 2019d).

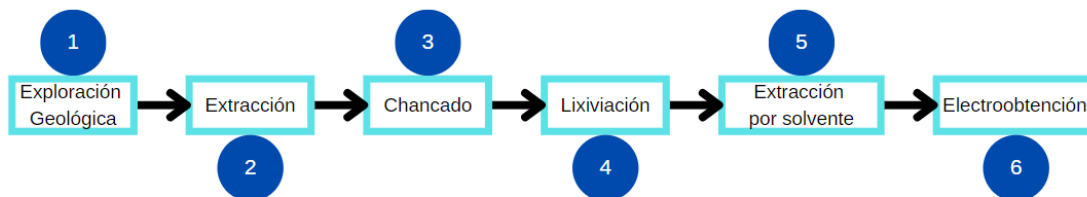
#### 1.2.4.4. Electrorefinación

La electrorefinación a grandes rasgos es la disolución electroquímica de los ánodos impuros de cobre, para permitir que el metal se deposite en forma selectiva y máxima pureza sobre cátodos de cobre (Corporación Nacional del Cobre, 2019e).

Este proceso tiene como principales objetivos, eliminar las impurezas que dañan las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre y separar las impurezas valiosas del cobre, las que pueden ser recuperadas después como subproductos metálicos (Corporación Nacional del Cobre, 2019e).

#### 1.2.5. Proceso Hidrometalúrgico

El proceso hidrometalúrgico comprende las etapas 4 a la 6 señaladas en la figura 1.4, las que serán explicadas a continuación.



**Figura 1.4:** Proceso Hidrometalúrgico. Elaborado a partir de proceso publicado en Codelco Educa. Codelco, 2018.

##### 1.2.5.1. Lixiviación

Luego de la etapa de chancado el cobre oxidado pasa por el proceso de lixiviación, que consiste en recuperar los metales presentes en el mineral mediante la aplicación de agua y ácido sulfúrico (Corporación Nacional del Cobre, 2019f). Para poder realizar este proceso es necesario contar con una superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Una vez que el material ya es preparado, se coloca en cúmulos para poder proceder a su riego con una solución preparada. Posterior a percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (Corporación Nacional del Cobre, 2019f).

#### 1.2.5.2. *Extracción por solvente*

Para poder extraer el cobre de la solución de sulfato de cobre obtenida en la lixiviación, es necesario mezclarla con una solución de parafina y resina orgánica. La resina captura los iones de cobre en forma selectiva, donde de la reacción que se produce se obtiene un complejo de resina-cobre y, por otro lado, una solución denominada refino. El compuesto de resina-cobre es tratado en forma independiente con un electrolito rico en ácido, que descarga el producto del cobre desde la resina hacia el electrolito, mejorando así la concentración del cobre (Corporación Nacional del Cobre, 2019f).

#### 1.2.5.3. *Electroobtención*

La electroobtención se define como la precipitación por reducción electrolítica y es un procedimiento bastante interesante a nivel industrial, ya que a través de este se obtiene un alto grado de pureza, además por su gran importancia económica, debido a que permite recuperar metales a partir de recursos lixiviables que, tratándose de otro proceso no sería posible realizar.

Según la información señalada en los documentos publicados por la Corporación Nacional del Cobre (2019g) este proceso consta de 4 etapas:

- a. La solución electrolítica proveniente de la Lixiviación, que contiene el sulfato de cobre, se traslada a las denominadas “celdas electrolíticas” o de “electroobtención”.
- b. En estas celdas se disponen en su interior ánodos (+) por donde entra la corriente eléctrica y cátodos (-) por donde sale la corriente eléctrica.
- c. En las celdas se hace circular una corriente eléctrica de muy baja intensidad entre el ánodo (polo positivo) y el cátodo (polo negativo).
- d. Mediante la electrólisis, los iones de cobre (cationes) presentes en la solución de sulfato de cobre son atraídos por la carga negativa del cátodo y se depositan en él.

### **1.3. MINERÍA DEL MOLIBDENO**

En el proceso productivo del cobre, cuando se desarrolla el proceso pirometalúrgico, en la etapa de flotación se obtiene también el Molibdeno, cuya ley o pureza alcanza un 49% (Corporación Nacional del Cobre, 2018a). Este subproducto de la industria del cobre no existe en su forma pura en la naturaleza, sino que se asocia a otros minerales.

Este es un metal plateado que posee el sexto más alto punto de fusión de todos los elementos, por lo que se utiliza con frecuencia en operaciones de alta temperatura y presión. Sus características principales son la durabilidad, resistencia y capacidad para soportar la corrosión agresiva y altas temperaturas. Es utilizado como materia prima para la obtención de aleaciones, entre las que destacan los aceros más resistentes, según lo señalado en la información publicada por la Corporación Nacional del Cobre (2018a).

Las mayores reservas de molibdeno se encuentran en China, siendo que Chile ocupa el tercer lugar, luego de Estados Unidos (Corporación Nacional del Cobre, 2018a).

En el periodo 2017-2020 la producción chilena de molibdeno mostraría un grado importante de estabilización alcanzando un promedio anual de 62 mil Toneladas Métricas (Comisión Chilena del Cobre, 2017).

Es posible obtener este elemento a través de dos tipos de minas existentes, las primarias, donde se abocan directamente a explotar la molibdenita y, las secundarias, en donde se consigue el molibdeno a partir de otro mineral, en este caso el cobre (Corporación Nacional del Cobre, 2018a).

#### **1.4. RELAVES**

Según lo señalado por Moya (2019), el relave se define como el residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación, siendo almacenados en depósitos que cumplen con la función de acopiar los residuos mineros finos dentro de un sitio seleccionado, que permite satisfacer las exigencias legales nacionales y también para mantenerlos estables, sin causar efectos negativos tanto a la salud de las personas como al medio ambiente. El diseño, construcción, operación y cierre de un depósito se ejecutan para poder asegurar su estabilidad en todos los aspectos estructurales, hidráulicos, químicos y ambientales durante toda su existencia, y en todos los escenarios previsibles de cargas y solicitaciones.

Actualmente Chile es el tercer país con mayor número de depósitos en el mundo, con un total de 740 depósitos, de los cuales 101 se encuentran en estado activo, 469 inactivos y 170 abandonados. Cabe destacar que estos depósitos se encuentran en 9 de las 16 regiones del país, siendo que la mayor cantidad se concentra entre la III y IV región, de los cuales 60 se encuentran activos, 358 están inactivos y 129 abandonados (Moya, 2019).

Debido a todos los riesgos que tienen asociados estos depósitos, se hace necesario incorporar nuevas tecnologías en la gestión de los depósitos de relaves, lo que promoverá fuertemente la innovación y desarrollo de nuevas ideas relacionadas con la remediación de estos, el reprocesamiento o también nuevos usos (Ministerio de Minería, 2021).

#### **1.4.1. Códigos, reglamentos, regulación y legislación aplicable en Chile**

Entre las exigencias legales con las que deben cumplir los relaves en Chile, se encuentran:

- a. Código de Minería: Este Código regula en más detalle aspectos cubiertos por la Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras, estableciendo el procedimiento para obtener concesiones de exploración y explotación, la protección de dichas concesiones, y el marco regulatorio aplicable a los contratos vinculados a operaciones mineras (Consejo Minero, 2019).
- b. Decreto Supremo N°248/2007, Ministerio de Minería, Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierres de los depósitos de relaves: Este Decreto precisa las exigencias técnicas para obtener aplicación de los conceptos más avanzados en la construcción de depósito de relaves de la minería chilena, fija las normas de los procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves mineros, y da a conocer los requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros, junto con la disposición de sus obras anexas, las que garantizan la seguridad de las personas y de los bienes. Toda faena minera que genere y deba depositar relaves como parte del proceso productivo, está obligada a cumplir las disposiciones del reglamento (Consejo Minero, 2019).
- c. Decreto Supremo N°132/2004, Ministerio de Minería, Reglamento de seguridad minera: Este reglamento tiene por objetivo establecer el marco regulatorio general al que se deben someter las faenas de la Industria Extractiva Minera Nacional para proteger la vida e integridad física de las personas que se desempeñan en dicha industria, y de aquellas que bajo circunstancias específicas definidas están ligadas a ella (Consejo Minero, 2019).
- d. Ley 20.551/2011, Ministerio de Minería, Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras: Esta ley obliga a que todas las faenas mineras cuenten con un plan de cierre aprobado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), previo al inicio de las operaciones mineras, esto con el objetivo de integrar y ejecutar el conjunto de medidas y acciones destinadas a mitigar los efectos que se derivan

- 
- e. del desarrollo de la industria extractiva minera, en los lugares en que ésta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de los mismos, en conformidad a la normativa ambiental aplicable. Además, establece garantías para el cierre efectivo de las faenas e instalaciones mineras, y crea un fondo post-cierre para el monitoreo de faenas cerradas (Consejo Minero, 2019).
  - f. Ley 20.819/2015, Modifica la ley 20.551/2011: Los cambios que realiza esta ley a la explicada anteriormente es en particular a lo referido a la definición de vida útil y la constitución de garantías, con especial referencia a la mediana y pequeña minería (Consejo Minero, 2019).
  - g. Decreto N°41/2012, Ministerio de Minería, Reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras.
  - h. Código de Aguas: Específicamente los artículos 294 y siguientes del Código de Aguas regulan la construcción de obras hidráulicas (Consejo Minero, 2019).
  - i. Decreto 50/2015, Ministerio de Obras Públicas, Reglamento obras hidráulicas mayores: Este reglamento fija las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del Código de Aguas (Consejo Minero, 2019).
  - j. Ley 19.300/1994, Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Sobre Bases Generales del Medio Ambiente: Esta ley establece el derecho a vivir en un medio ambiente descontaminado, donde serán medidos los impactos ambientales de los proyectos y se promoverá un desarrollo sustentable (Consejo Minero, 2019).
  - k. Decreto 40/2013, Ministerio de Medio Ambiente, Aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental: Este reglamento establece las disposiciones por las cuales se regirá el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y la participación de la comunidad en este proceso, de conformidad con los preceptos de la Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Consejo Minero, 2019).

#### **1.4.2. Tipos de depósito de relaves**

Cabe destacar que existen diferentes tipos de depósitos de relaves, como por ejemplo tranque de relave (figura 1.5), los depósitos en minas subterráneas, en rajos abandonados, entre otros.

A continuación, se detallarán los de depósitos de relaves que tienen mayor presencia en las mineras del país.

#### 1.4.2.1. *Tranque de Relave*

Es un depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave, compactado, proveniente de un hidrociclón, operación que se encarga de separar los sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua. La parte fina que es denominada “Lama” es depositada en la cubeta del depósito (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).



**Figura 1.5:** Tranque de Relaves Carén. Extraído de Codelco,2011.

#### 1.4.2.2. *Embalse de Relave*

En los depósitos de este tipo los muros de contención están contruidos de material de empréstito, tierra y rocas aledañas, y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. También se llaman embalses de relaves aquellos depósitos que se encuentran ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere construcción de un muro de contención (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018). En la figura 1.6 es posible observar un ejemplo de este.



**Figura 1.6:** Diseño de planta de embalse de Relaves. Extraído de tetrattech.com.

#### 1.4.2.3. *Relave Espesado*

Depósitos en el que la superficie es previamente sometida a un proceso de sedimentación, en un equipo denominado “espesador”, que favorece la sedimentación de los sólidos, con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida, la que puede ser reutilizada con el fin de reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia. El depósito de relave espesado se construye de forma tal que impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del sitio autorizado, y contar con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente que pudiese fluir fuera del depósito (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018). En la figura 1.7 es posible ver un ejemplo de este tipo de relave.



**Figura 1.7:** Relave espesado. Ministerio de Minería, 2021.

#### 1.4.2.4. *Relave Filtrado*

Este tipo de depósito es similar al espesado, el cual fue definido anteriormente. Se trata de un depósito en que el material contiene aún menos agua, gracias al proceso de filtrado, para asegurar así una humedad menor a 20% (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018). En la figura 1.8 se puede apreciar un ejemplo de este.



**Figura 1.8:** Relave Filtrado. Ministerio de Minería, 2021.

#### 1.4.2.5. *Relave en Pasta*

Corresponden a una mezcla de agua con sólidos (figura 1.9) que contiene abundantes partículas finas y un bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2018).



**Figura 1.9:** Relave en pasta. Ministerio de Minería, 2021.

### **1.5. EMPRESA NEXXO S.A.**

Los Dragados Mineros realizados por la empresa Nexxo S.A, tienen el objetivo de dar solución al problema de embancamiento de residuos de lodos y lagunas, que puede aplicarse en sistemas de lixiviación, lagunas de decantación y captación, piscinas de plantas concentradoras, estanques de proceso, reactores biológicos, etc. (Nexxo S.A.,2017)

Esta empresa es una compañía de servicios industriales de alta especialización enfocada en seis áreas de trabajo: Obras y Montajes Industriales; Limpiezas Químicas y Flushing; Limpieza con Agua a Alta Presión; Cambio de Catalizadores; Servicios Industriales y Contratos de Mantenimiento Industrial, estos trabajos se llevan a cabo en industrias de Chile, Argentina, Brasil, Bolivia, Colombia y Perú (Nexxo S.A.,2017).

Dentro de los Servicios Industriales que realizan se encuentran:

- Decoking e inspecciones de hornos.
- Servicio de Limpieza y Precomisionamiento de Ductos, análisis de integridad mecánica.
- Manejo de sólidos por medio de camiones de alto vacío.
- Intervención de torres de destilación.
- Dragados y separación de sólidos.

Este último es en el que se enfoca este trabajo. La realización de este servicio trae consigo importantes beneficios para la minera que lo solicita, entre los cuales destacan la recuperación de valor, ya que, en lugar de eliminar los sólidos contenidos en la piscina, los recuperan y pueden ser reutilizados en los procesos de la mina, y por otro lado, el desempeño ambiental, al convertir los desechos en materias primas y posteriormente en productos (Pump & Slurry, 2022).

## **1.6. DRAGADOS MINEROS**

El proceso de Dragado es realizado en un ambiente acuático, donde se genera la disgregación y extracción de suelo de un lugar, su elevación, transporte y finalmente su deposición en otro lugar respetando en todo el proceso las limitaciones ambientales (Escalante, 2017).

### **1.6.1. Etapas del proceso**

Las dos principales etapas del proceso de Dragado son las siguientes:

#### *1.6.1.1. Extracción del material*

Esta etapa es llevada a cabo directamente en la piscina, donde el equipo principal utilizado en esta acción son las bombas de extracción. El material extraído es denominado como pulpa, la cual tiene un porcentaje de sólido, aproximadamente un 30% y el resto se supone de líquido con diferentes contenidos. Luego, la pulpa debe ser transportada para ser sometida a una serie de procesos con el fin de obtener el sólido contenido en esta (Nexxo S.A., 2019) <sup>1</sup>.

El transporte puede ser realizado de dos formas:

- *Dragado Vertical*  
Su objetivo es lograr el mayor retiro de masa posible. Para esto se utilizan Dragas Verticales con aditamentos, ya que estas poseen dimensiones reducidas y una alta profundidad de dragado (Dragflow, 2021). Los resultados obtenidos son mayor extracción y generación de cráteres. En la figura 1.10 se muestra el equipo utilizado para llevar a cabo el dragado vertical.

---

<sup>1</sup>Nexxo S.A.,2019. Información facilitada por la empresa.



**Figura 1.10:** Dragas con cables de acero. Dragflow Latin America (2021), dragflowpumps.com.

- *Dragado Horizontal*

En el Dragado Horizontal se lleva a cabo la extracción y allanamiento del piso. El equipo utilizado son Dragas Horizontales (Figura 1.11), las que se aplican en lugares donde existen flujos más bajos que requieren una limpieza completa y que poseen un fondo sin un perfil uniforme (Mud Cat, 2022). Los resultados que se esperan obtener son fondos planos y evitar el rompimiento de las carpetas de las piscinas.



**Figura 1.11:** Dibujo 3D de Draga eléctrica Mud Cat 20E. Extraída de Mud Cat™, mudcatdredge.com

Para el manejo del material existen dos procesos posibles, por un lado, la filtración y, por otro, la utilización de geotubos (Nexxo S.A.,2019)<sup>2</sup>. El circuito normal del proceso de Geo Tubos es la deshidratación de la pulpa obtenida, una vez que se encuentran llenos los geotubos se deja reposar para que filtren todo el líquido contenido en el material, luego viene el secado y la cosecha, donde se procede a compactar el material sólido (los residuos se pueden llegar a reducir en un 80% a través de la aplicación de grandes presiones) (Innovación en Geosintéticos y Construcción, 2020). Finalmente se despacha el material sólido a donde lo desee la minera con la que se trabaje.

Cabe destacar que ambos procesos cumplen la función de separar los sólidos, que posteriormente serán cosechados de los líquidos, estos últimos serán devueltos a las piscinas de donde fueron previamente extraídos. Es importante mencionar que los sólidos que no tienen valor son enviados a disposición final (Nexxo S.A., 2019)<sup>3</sup>.

## 1.6.2. Equipos utilizados en el servicio

### 1.6.2.1. Bombas

Durante el proceso de Dragado se utilizan diferentes bombas, las que dependiendo de la naturaleza del material que se encuentre en la piscina tendrán diferentes potencias para poder lograr el servicio solicitado de la manera más eficiente posible.

En la figura 1.12 se puede observar una de las bombas que es utilizada para realizar el servicio de dragado.



**Figura 1.12:** Bomba Dragflow. Extraída de dragflowpumps.com, 2021.

<sup>2</sup> Nexxo S.A.,2019. Información facilitada por la empresa.

<sup>3</sup> Nexxo S.A.,2019. Información facilitada por la empresa.

#### 1.6.2.2. Muelles de Acercamiento

Estos muelles tienen el objetivo de facilitar el ingreso y ubicación de las instalaciones necesarias para el servicio.

#### 1.6.2.3. Balsa con Bomba DRAGFLOW

Esta balsa posee una bomba, la cual opera a bajas revoluciones por minuto (rpm), posee motores sobredimensionados y proporciona una excelente capacidad de manejo de sólidos, pero con un desgaste reducido y un tamaño de sólidos de hasta 120 mm (Dragflow, 2021). La traslación es mediante cable de acero, sistema motriz propio en base a poleas. El control de esta es a distancia mediante una botonera.

En la figura 1.13 es posible observar un ejemplo de una bomba Dragflow inserta en una laguna.



**Figura 1.13:** Balsa con Bomba Dragflow. Extraído de dragflowpumps.com, 2021.

#### 1.6.2.4. Dragas

Los tipos de dragas utilizadas son:

- *Draga tipo Pit Hog (PH)*

Estas Dragas, dependiendo del modelo que se trate, tienen una potencia de 15 kW (en el caso de la presentada en la figura 1.14), la profundidad de dragado que alcanza es de 4,3 metros. Se traslada a través de un cable de acero, posee un sistema motriz propio en base a poleas. El control de esta se realiza a distancia mediante botonera (Mud Cat, 2022).

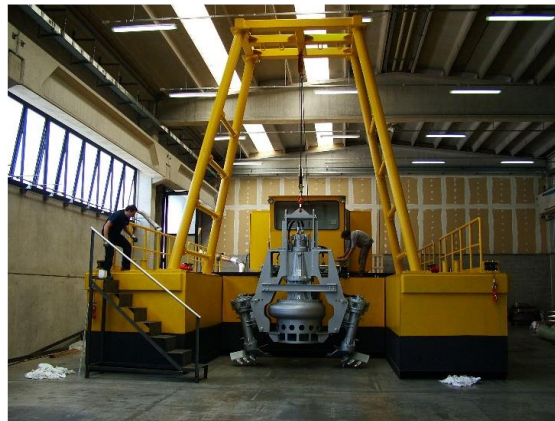


**Figura 1.14:** Draga Pit Hog. Mud Cat <sup>TM</sup>. [mudcatdredge.com](http://mudcatdredge.com).

- *Draga Dragflow*

Estas dragas poseen dimensiones reducidas y logran altas profundidades de dragado, es completamente modular, fácil de transportar y también de ensamblar. Es utilizada en estanques de relaves de minas, destaca por su capacidad de trabajar con lodo pesado, a cualquier profundidad e incluso en presencia de pH bajo (Dragflow Latin America, 2021).

En la figura 1.15 es posible observar un ejemplo de este tipo de dragas.



**Figura 1.15:** Draga Dragflow. Dragflow Latin America (2021). [dragflowpumps.com](http://dragflowpumps.com).

- *Draga Anfibia*

Este tipo de draga destaca por su movilidad extrema en cualquier tipo de pantano y la flotabilidad total (ver figura 1.16) lo que permite llegar a la ubicación más remota imposible de alcanzar con cualquier otro equipo. Alcanza una capacidad de bombeo de hasta 400 m<sup>3</sup>/h con una distancia de entrega de hasta 500 metros permite realizar trabajos con la mayor productividad posible (Dragflow Latin America, 2021).



**Figura 1.16:** Draga anfibia. Dragflow Latin America (2021). Dragflowpumps.com.

### **1.7. PISCINAS ILS (*INTERMEDIATE LIQUID SOLUTION*)**

En la minería existen diferentes tipos de piscinas, entre ellas encontramos las denominadas PLS (*Pregnant Leaching Solution*), de emergencia e ILS (*Intermediate Liquid Solution*), las que cumplen con la función de almacenar la solución intermedia proveniente del segundo ciclo de lixiviación (Servicio de Evaluación Ambiental, 2008).

En la figura 1.17 es posible observar uno de estos tipos de piscinas. Cabe destacar que la limpieza de estas se hace a través de equipos dragadores ya descritos en la sección 1.6.2.



**Figura 1.17:** Piscina de drenes Tranque Quillayes, Dirección General de Aguas, 2015.

## **1.8. NORMATIVA APLICABLE**

En nuestro país existen una serie de normas en las que se detallan los parámetros que deben poseer estas aguas dependiendo del uso que se defina.

Entre los usos convencionales que se les da a las aguas recuperadas en la minería se encuentran el uso para riego, ya sea de caminos o bien plantaciones que realizan las mismas mineras como medida de mitigación, otro de los usos más típicos es la recirculación de esta al proceso productivo del cobre.

A continuación, se presenta una breve descripción de dos de las normas consideradas para poder definir el uso que se le dará al agua recuperada.

### **1.8.1. Norma Chilena 1333. Of78**

En la NCh 1333. Of78 se detallan los requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Estos criterios tienen por objeto proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a usos específicos, de la degradación producida por contaminación con residuos de cualquier tipo u origen.

A continuación, se detallan algunos de los usos señalados en esta norma con sus respectivos requisitos.

#### *1.8.1.1. Requisitos del agua para consumo humano*

Los requisitos con los que debe contar el agua para consumo humano se detallan en la Norma Chilena 409, la que será detallada en la sección 1.8.2.

### 1.8.1.2. Requisitos del agua para riego

#### Requisitos químicos

- pH

El agua para riego debe tener un pH comprendido entre 5,5 y 9,0.

- Elementos químicos

En la tabla 1.1 se indican los valores máximos permisibles de algunos elementos químicos en agua de riego.

**Tabla 1.1:** Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. Fuente: NCh 1333/78.

Elemento	Unidad	Límite máximo
Aluminio (Al)	mg/l	5,00
Arsénico (As)	mg/l	0,10
Bario (Ba)	mg/l	4,00
Berilio (Be)	mg/l	0,10
Boro (B)	mg/l	0,75
Cadmio (Cd)	mg/l	0,010
Cianuro (CN <sup>-</sup> )	mg/l	0,20
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	200,00
Cobalto (Co)	mg/l	0,050
Cobre (Cu)	mg/l	0,20
Cromo (Cr)	mg/l	0,10
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	mg/l	1,00
Hierro (Fe)	mg/l	5,00
Litio (Li)	mg/l	2,50
Litio (cítricos) (Li)	mg/l	0,075
Manganeso (Mn)	mg/l	0,20
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,010
Níquel (Ni)	mg/l	0,20
Plata (Ag)	mg/l	0,20
Plomo (Pb)	mg/l	5,00
Selenio (Se)	mg/l	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	mg/l	250,00
Vanadio (V)	mg/l	0,10
Zinc (Zn)	mg/l	2,00

El ministerio de Obras Públicas podrá autorizar valores mayores o menores para los límites máximos de cada uno de los elementos de la tabla anteriormente presentada, mediante Resolución fundada en aquellos casos calificados que así lo determinen.

- *Razón de adsorción de sodio (RAS)*

La Autoridad Competente debe establecerla en cada caso específico.

- *Conductividad específica y sólidos disueltos totales*

En la tabla 1.2 se da una clasificación de aguas para riego de acuerdo con sus condiciones de salinidad, en base a las características de conductividad específica y concentración de sólidos disueltos totales.

**Tabla 1.2:** Clasificación de aguas para riego según su salinidad. Fuente: NCh 1333. Of78.

<b>Clasificación</b>	<b>Conductividad específica, <math>c</math>, <math>\mu</math> mhos/cm a 25°C</b>	<b>Sólidos disueltos totales, <math>s</math>, mg/l a 105°C</b>
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales	$c \leq 750$	$s \leq 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles	$750 < c \leq 1500$	$500 < s \leq 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1500 < c \leq 3000$	$1000 < s \leq 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3000 < c \leq 7500$	$2000 < s \leq 5000$

Los valores de conductividad específica de un curso o masa de agua en particular no deben ser incrementados más allá de los límites que la Autoridad Competente determine, de acuerdo con el tipo de cultivo, manejo del agua y calidad excepcional del suelo.

- *Pesticidas*
  - *Herbicidas*

La Autoridad Competente se debe pronunciar en cada caso específico.

➤ *Insecticidas*

No se considera que tengan efectos perniciosos en agua para riego.

Requisitos bacteriológicos

El contenido de coliformes fecales en aguas de riego destinadas al cultivo de verduras y frutas que se desarrollen a ras de suelo y que habitualmente se consumen en estado crudo, debe ser menor o igual a 1000 coliformes fecales/100 ml.

1.8.1.3. *Requisitos para aguas destinadas a vida acuática*

En cuanto a las aguas dulces, se señalan los siguientes requisitos.

Requisitos generales

Las aguas dulces destinadas a ser usadas para vida acuática deben cumplir con los requisitos generales que se indican en la tabla 1.3.

**Tabla 1.3:** Requisitos generales de aguas destinadas a vida acuática. Fuente: NCh 1333. Of78.

Características	Requisito
Oxígeno disuelto, mg/l	5 mínimo
pH	6,0 a 9,0
Alcalinidad total, mg/l de CaCO <sub>3</sub>	20 mínimo
Turbiedad debido a descarga, unidades Escala Sílice	No debe aumentar el valor natural en más de 30 unidades
Temperatura	En flujos de agua corriente, no debe aumentar el valor natural en más de 3 °C
Color	Ausencia de colorantes artificiales
Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales	Ausentes
Sólidos sedimentables	No deben exceder del valor natural
Petróleo o cualquier tipo de hidrocarburo	No debe haber detección visual. No debe haber cubrimiento de fondo, orilla o ribera. No debe haber olor perceptible.

- *Quistes, protozoos o huevos*

La Autoridad Competente se debe pronunciar en cada caso específico.

- *Sustancias tóxicas*

El límite máximo de sustancias tóxicas debe estudiarse mediante bioensayo para cada caso específico. El valor obtenido se expresa en LTm96, debiendo aplicarse los factores de seguridad que se indican en la tabla 1.4, según el tipo tóxico.

**Tabla 1.4:** Factores de seguridad para diferentes tóxicos. Fuente: NCh1333/78.

Tóxica	Factor de seguridad
Pesticidas	1/100 de la LTm96
Metales pesados	1/100 de la LTm96
Cianuros	1/10 de la LTm96
Tóxico no acumulativo	1/10 de la LTm96
Tóxico acumulativo y persistente	1/100 de la LTm96
Detergentes	1/10 de la LTm96

- *Nutrientes (N y P)*

La Autoridad Competente se debe pronunciar en cada caso específico.

### 1.8.2. Norma Chilena 409/1. Of2005

Esta norma establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio nacional.

#### 1.8.2.1. Criterios para parámetros microbiológicos y turbiedad

##### Microorganismos indicadores de contaminación microbiológica

El agua potable debe cumplir simultáneamente con las condiciones siguientes:

- De todas las muestras que sean analizadas mensualmente en un servicio de agua potable, se acepta la presencia de coliformes totales en:
  - Una muestra, cuando se hayan analizado menos de 10 muestras en el mes.
  - El 10% de las muestras, cuando se hayan analizado 10 o más muestras en el mes.
- De las muestras mensuales que se analicen se permite la presencia de coliformes totales en una concentración mayor o igual a 5 UFC o NMP por 100 ml en:

- Una muestra, cuando se hayan analizado menos de 20 muestras en el mes.
- El 5% de las muestras, cuando se hayan analizado 20 o más muestras en el mes.
- En cada uno de los sectores de un servicio de agua potable, se acepta la presencia de coliformes totales en:
  - Una muestra, cuando se hayan analizado menos de cuatro muestras en el sector.
  - El 25% de las muestras del sector, cuando se hayan analizado cuatro o más muestras en el mes de dicho sector.
- Todas las muestras que sean analizadas mensualmente deben estar exentas de *Escherichia coli*.

#### Turbiedad

El agua potable en cada servicio debe cumplir simultáneamente con las condiciones siguientes y además el porcentaje final que se obtenga debe ser expresado con dos cifras decimales:

- La turbiedad media mensual debe ser menor o igual a 2 UNT, obtenida como promedio aritmético de todas las muestras puntuales analizadas en el mes.
- De todas las muestras que se analicen mensualmente, la turbiedad puede superar el valor de 4 UNT en:
  - Una muestra, cuando se hayan analizado menos de 20 muestras en el mes.
  - El 5% de las muestras, cuando se hayan analizado 20 o más muestras en el mes.
- Ninguna de las muestras puede exceder el valor de 20 UNT.
- De todas las muestras que se analicen mensualmente, las muestras que presenten turbiedades entre 10 UNT y 20 UNT no podrán corresponder a un mismo periodo de 24 h.

#### *1.8.2.2. Criterios para elementos o sustancias químicas de importancia para la salud*

En las tablas 1.5 a la 1.9 se indican las concentraciones totales las que no deben ser superadas en las muestras analizadas.

**Tabla 1.5:** Elementos esenciales. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Elemento	Expresado como elementos totales	Límite máximo mg/l
Cobre	<i>Cu</i>	2,0
Cromo total	<i>Cr</i>	0,05
Fluoruro	<i>F</i>	1,5
Hierro	<i>Fe</i>	0,3
Manganeso	<i>Mn</i>	0,1
Magnesio	<i>Mg</i>	125,0
Selenio	<i>Se</i>	0,01
Zinc	<i>Zn</i>	3,0

**Tabla 1.6:** Elementos o sustancias no esenciales. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Elemento o sustancia	Expresado como elementos o sustancias totales	Límite máximo mg/L
Arsénico	<i>As</i>	0,01
Cadmio	<i>Cd</i>	0,01
Cianuro	<i>CN</i>	0,05
Mercurio	<i>Hg</i>	0,001
Nitrato	<i>NO<sub>3</sub></i>	50
Nitrito	<i>NO<sub>2</sub></i>	3
Razón nitrato + nitrito	-	1
Plomo	<i>Pb</i>	0,05

**Tabla 1.7:** Sustancias orgánicas. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Sustancia	Límite máximo µg/L
Tetracloroetano	40
Benceno	10
Tolueno	700
Xilenos	500

**Tabla 1.8:** Plaguicidas. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Plaguicida	Límite máximo µg/L
DDT + DDD + DDE	2
2,4 – D	30
Lindano	2
Metoxicloro	20
Pentaclorofenol	9

**Tabla 1.9:** Productos secundarios de la desinfección. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Producto	Límite máximo mg/L
Monocloroamina	3
Dibromoclorometano	0,1
Bromodiclorometano	0,06
Tribromometano	0,1
Triclorometano	0,2
Trihalometanos	1

### 1.8.2.3. Criterios para elementos radiactivos

El agua potable no debe contener sustancias radiactivas en concentraciones mayores que las que se indican en la tabla 1.10.

**Tabla 1.10:** Límites máximos para elementos radiactivos. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Elemento	Límite máximo Bq/L
Estroncio 90	0,37
Radio 226	0,11
Actividad base total (excluyendo Sr-90, Ra-226 y otros emisores alfa)	37
Actividad beta total (incluyendo Sr-90, corregida para el K-40 y otros radioemisores naturales)	1,9
Actividad alfa total (incluyendo Ra-226 y otros emisores alfa)	0,55

#### 1.8.2.4. Requisitos de calidad para parámetros organolépticos

El agua potable debe cumplir con los requisitos indicados en la tabla 1.11 y las tolerancias que se indican en la sección 1.8.2.6.

**Tabla 1.11:** Parámetros relativos a características organolépticas. Fuente: NCh 409/1. Of2005.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo
<b>Físicos:</b>			
Color verdadero	-	Unidad Pt-Co	20
Olor	-	-	Inodora
Sabor	-	-	insípida
<b>Inorgánicos:</b>			
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	mg/L	1,5
Cloruro	Cl <sup>-</sup>	mg/L	400
pH	-	-	6,5 < pH < 8,5
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/L	500
Sólidos disueltos totales	-	mg/L	1500
<b>Orgánicos:</b>			
Compuestos fenólicos	Fenol	µg/L	2

#### 1.8.2.5. Criterios para parámetros de desinfección

Se debe cumplir que:

- El agua potable que se distribuye debe ser sometida a un proceso de desinfección.
- La concentración residual máxima de cloro libre debe ser 2,0 mg/L en condiciones normales de operación en cualquier punto de la red.
- La concentración residual mínima de cloro libre debe ser de 0,2 mg/L en cualquier punto de la red.
- De todas las muestras que se analice mensualmente en un servicio de agua potable:
  - Un número menor o igual al 10% de ellas puede tener una concentración residual de desinfectante activo inferior al mínimo establecido;
  - Un número no mayor al indicado a continuación podrá tener ausencia de cloro residual libre:
    - ❖ Una muestra, cuando se analicen hasta 100 muestras;
    - ❖ Tres muestras, cuando se analicen más de 100 muestras.

- El uso de cualquier desinfectante diferente a un generador de cloro activo debe ser autorizado por la Autoridad Competente, la cual debe además establecer la concentración mínima, la concentración máxima, la tolerancia, los controles y el método de determinación de un desinfectante activo residual en la red, así como la forma de muestreo.

#### 1.8.2.6. Tolerancia para parámetros críticos

En términos de tolerancia, se define que:

- De todas las muestras que se analicen mensualmente en un servicio de agua potable, los parámetros críticos pueden exceder los valores establecidos en las tablas de elementos esenciales, elementos o sustancias no esenciales y parámetros organolépticos, en:
  - Una muestra, cuando se hayan analizado menos de 10 muestras.
  - El 10% de las muestras, cuando se hayan analizado 10 o más muestras.
- El promedio aritmético de todas las muestras analizadas en el mes no deberá exceder los límites establecidos en la tabla correspondiente.
- Para el caso de los elementos o sustancias como el cobre, fluoruro, nitrato y nitrito, ninguna muestra puntual podrá exceder dos veces el límite establecido en la misma norma.

## 2. PROBLEMA

El agua cumple con tres roles fundamentales para la sostenibilidad del desarrollo mundial, el aseguramiento de la salud humana, la sustentación de los ecosistemas y, por último, el desarrollo económico.

Debido al calentamiento global, la disponibilidad de este recurso se está viendo fuertemente afectado. Según el informe de políticas de ONU-AGUA (2019) sobre el Cambio Climático y el Agua de la organización Un Water, aproximadamente un 7% de la población mundial estará expuesta a una disminución de al menos un 20% de los recursos hídricos renovables, sin mencionar que la gravedad de este problema aumentará dependiendo de la zona en la que nos encontremos.

En los últimos años, específicamente en la zona centro-norte del país se ha posicionado como un tema relevante, debido a la limitada disponibilidad de este recurso y la demanda creciente que compite con otros sectores de la economía. El uso racional y eficiente del agua es clave para el futuro del negocio minero, debido a su importancia como insumo crítico en el proceso productivo.

En la minería del cobre el agua se utiliza fundamentalmente en los procesos tradicionales de concentración por flotación, en la fusión y electro refinación, o en el proceso hidrometalúrgico, el que consta de lixiviación, extracción por solventes y electro obtención (Comisión Chilena del Cobre, 2008). Se espera que para el año 2031 el consumo del recurso hídrico total a nivel nacional sea de 23,3 m<sup>3</sup>/s, con una tasa de crecimiento anual de 2,1% (Comisión Chilena del Cobre, 2020), por lo que el sector minero ha reaccionado ante el escenario de estrechez hídrica, adoptando diferentes acciones con el fin de optimizar sus consumos a través de mejores prácticas de gestión o la introducción de mejores tecnologías y/o invirtiendo en nuevas alternativas que reduzcan la demanda y aumenten la oferta de agua, todo esto con el fin de llevar a cabo la actividad minera de una manera sustentable para que se pueda seguir desarrollando en el largo plazo.

Algunos ejemplos de acciones que se llevan a cabo son la recirculación del agua utilizada en el proceso, la recuperación de agua para el riego de plantaciones hechas por las mismas mineras o bien el riego de los caminos para evitar el levantamiento de material particulado. No obstante, todo lo ya realizado no es suficiente.

Una potencial alternativa de la cual sería posible la recuperación de agua, es a través de la realización del servicio de Dragado minero, el que actualmente se lleva a cabo en piscinas de emergencia existentes en las diferentes mineras del país, donde los subproductos obtenidos son: aproximadamente un 70% de líquido y un 30% de sólido.

De los cuales sólo este último es recuperado y la fracción líquida es devuelta a las piscinas de donde fue extraída, dándole un nulo uso. Es por esto que se considerará la opción de recuperar el agua de las piscinas de emergencia en las que ya se trabaja y además considerar la recuperación de agua en depósitos de relave. Cabe destacar que se propondrá una solución que aplique para ambos lugares.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar técnica y económicamente la implementación de un sistema de recuperación de agua en la etapa de dragado minero de la empresa Nexxo S.A. para su reutilización en la minería del cobre y del molibdeno.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Caracterizar y definir la cantidad de agua disponible para su recuperación.
2. Seleccionar el proceso más adecuado para la recuperación de las aguas.
3. Establecer un diseño conceptual del sistema de recuperación.
4. Estimar los costos de implementación del sistema propuesto.

## 4. METODOLOGÍA

En la figura 4.1 se pueden observar todas las actividades contempladas para la realización de cada uno de los objetivos específicos propuestos en la sección 3.2.



Figura 4.1: Diagrama de realización de actividades.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA A TRATAR

Las principales actividades por realizar son:

#### 4.1.1. Definir el flujo de agua a tratar

En esta etapa se tomará como referencia la bomba más eficiente que posea la empresa para realizar el servicio de dragado, en cuanto al tiempo se considerará el que normalmente se tarda en llevar a cabo el servicio. A partir de estos datos y de las ecuaciones 4.1 y 4.2 se determinará el flujo volumétrico del líquido que será tratado.

$$Q_T = \text{caudal extraído} * \text{horas de operación}$$

**Ecuación 4.1:** Cálculo de la cantidad total de material extraído por día (m<sup>3</sup>/día).

$$Q_L = \text{cantidad total de material extraído} * \text{porcentaje de líquido extraído}$$

**Ecuación 4.2:** Cálculo de la cantidad total de líquido a tratar por día (m<sup>3</sup>/día).

#### 4.1.2. Definir los componentes del depósito de relaves y piscina de emergencia

Los componentes referidos a los depósitos de relaves serán obtenidos de material bibliográfico, específicamente de los estudios que realiza el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Cabe destacar además que serán seleccionadas tres (3) relaves a través de los siguientes criterios:

- Que se encuentren activos.
- Que posean un tranque o embalse de relave, ya que estos son los depósitos que contienen mayor porcentaje de agua.
- Que el recurso que se obtenga sea cobre y molibdeno.

Para el caso de las piscinas de emergencia, se trabajará con sólo una y los datos se le solicitarán a la empresa. El criterio que se considerará para seleccionar esta piscina será únicamente que la empresa Nexxo S.A. le brinde el servicio de dragado.

Los parámetros analizados serán los presentados en la tabla 4.1, ya que son los definidos por la NCh 1333. Of78 para el agua destinada para riego.

**Tabla 4.1:** Parámetros a considerar para relaves y piscinas de emergencia.

Parámetro	Unidad	Límite máximo según NCh 1333
Aluminio	mg/L	5
Arsénico	mg/L	0,1
Bario	mg/L	4
Berilio	mg/L	0,1
Boro	mg/L	0,75
Cadmio	mg/L	0,01
Cianuro	mg/L	0,2
Cloruros	mg/L	200
Cobalto	mg/L	0,05
Cobre	mg/L	0,2
Cromo total	mg/L	0,1
Fluoruro	mg/L	1
Hierro	mg/L	5
Litio	mg/L	2,5

**Continuación de tabla 4.1:** Parámetros a considerar para relaves y piscinas de emergencia.

Parámetro	Unidad	Límite máximo según NCh 1333
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Molibdeno	mg/L	0,01
Níquel	mg/L	0,2
Plata	mg/L	0,2
Plomo	mg/L	5
Sólidos disueltos totales	mg/L	Ver tabla 1.2
Selenio	mg/L	0,02
Sodio porcentual	%	35
Sulfatos	mg/L	250
Vanadio	mg/L	0,10
Zinc	mg/L	2
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1000
pH	--	5,5 a 9
Conductividad 25°C	(uS/cm)	Ver tabla 1.2

Una vez seleccionados los tres depósitos de relaves y la piscina de emergencia, se seleccionará el o la que posea las concentraciones más altas en comparación con la NCh 1333. Of78, o bien, que posea todos los valores de los parámetros solicitados por la misma, específicamente de la sección de agua para riego.

## 4.2. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

### 4.2.1. Vigilancia tecnológica

Se analizarán las principales técnicas utilizadas para tratamiento de aguas residuales teniendo en consideración los diferentes componentes que puedan tener estos relaves o bien piscina, según lo obtenido en la etapa anterior.

### 4.2.2. Evaluación comparativa

Esta etapa será realizada previa a la selección de la tecnología, ya que mediante esta se compararán todas las que hayan sido estudiadas para poder posteriormente determinar cuál será la que resulte ser más adecuada para el tratamiento del contenido del relave estudiado. Esta etapa llevará consigo la identificación de las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías.

### 4.2.3. Metodología de selección

En cuanto a la metodología de selección se tomarán en cuenta los criterios señalados en la tabla 4.2, para poder añadirlos en las tablas correspondientes. En relación con la ponderación de cada criterio, estas fueron determinadas según las características del servicio que se quiere realizar y fueron confirmadas por un comité de expertos.

Estos criterios serán evaluados según la escala de Likert, de la que se tomarán en cuenta 3 de los hasta 9 puntos que puede llegar a tener (QuestionPro, 2017) donde:

- 1, corresponderá a poco importante.
- 2, corresponderá a neutro.
- 3, corresponderá a importante.

Lo que se observa con más detalle en la tabla 4.3, ya que cada criterio tendrá su respectiva explicación para cada puntuación.

**Tabla 4.2:** Explicación y ponderación de cada uno de los criterios a evaluar.

<b>Criterio</b>	<b>Ponderación</b>	<b>Explicación</b>
<b>Costos de inversión y operación</b>	20%	Se refiere principalmente al costo del o los equipos a utilizar y los gastos asociados a la operación de estos
<b>Efectos medioambientales</b>	15%	Se refiere a que si la utilización de este equipo produce impactos en el medio ambiente
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	10%	Se refiere a que si una vez instalado el equipo su operación es simple y si es que se requiere de mucho personal para su funcionamiento
<b>Facilidad de transporte</b>	15%	Se refiere a que si con las dimensiones que posee la tecnología es fácil su transporte
<b>Cumplimiento con caudal</b>	20%	Se refiere a que si el equipo es capaz de tratar el caudal que se definirá
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	20%	Si a través de la o las tecnologías utilizadas es posible obtener agua en las condiciones estipuladas en la normativa vigente para el agua para riego

**Tabla 4.3:** Explicación de la puntuación para cada criterio según escala Likert.

<b>Criterio</b>	<b>Puntuación</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Costos de inversión y operación</b>	Presenta costos mayores a \$50.000.000	Presenta costos igual a \$50.000.000	Presenta costos menores a \$50.000.000
<b>Efectos medioambientales</b>	Presenta impactos ambientales significativos	Presenta impactos ambientales moderados	No presenta impactos ambientales
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	Compleja, se necesitan más de dos personas para operar	Medianamente compleja, se necesitan dos personas para operar	No es compleja, se necesita sólo una persona para operar
<b>Facilidad de transporte</b>	No es transportable	Posee dificultad para transporte	Es transportable y no posee ninguna dificultad
<b>Cumplimiento con caudal</b>	Se necesitan tres o más equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Se necesitan dos equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Un solo equipo cumple con el caudal volumétrico
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	Más de tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	De uno a tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	Todos los parámetros se encuentran dentro del rango permitido para el agua para riego, según normativa vigente

Una vez obtenido el producto entre la ponderación y la puntuación de cada criterio para cada una de las tecnologías se procederá a analizar los resultados finales obtenidos. La tecnología elegida para la recuperación de agua será la que presente la mayor puntuación.

### **4.3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN**

Se realizará una memoria de cálculo y respectivo diagrama con todos los requerimientos para poder realizar el modelo de la solución, esto involucrará el caudal a tratar, la cantidad de bombas a utilizar, diseño de la planta de tratamiento y la calidad con la que saldrá el agua después de cada proceso, si es que existiese más de uno.

### **4.4. FACTIBILIDAD ECONÓMICA**

#### **4.4.1. Flujo de caja**

Se realizará un flujo de caja, el cual tomará en cuenta 15 periodos, por la vida útil que tienen los equipos y maquinarias en general según la Resolución N° 43, 2002. En este flujo se considerará el valor venta del servicio, el valor de la mano de obra, valor del o los equipos, envío, los materiales que se utilizarán para llevar a cabo la actividad, como bombas, mangueras, válvulas, etc., la depreciación del o los equipos que serán seleccionados y los impuestos.

#### **4.4.2. Cálculo de VAN y TIR**

Una vez obtenidos los valores mencionados anteriormente, valor venta, mano de obra, costo del o los equipos, envío y materiales a utilizar, se calculará el valor total del flujo de caja de cada periodo para poder calcular el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Cabe destacar que se utilizará la tasa de descuento utilizada normalmente por la empresa Nexxo S.A. para la evaluación de proyectos. Posterior a este cálculo se podrá verificar si el proceso propuesto para dar solución al problema es rentable o no.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA

#### 5.1.1. Cálculo del flujo de agua a tratar

Según datos bibliográficos facilitados por la empresa, las bombas más eficientes que poseen para poder realizar el servicio de dragado son las denominadas “Dragflow”, entre las cuales destacan los modelos EL604 y EL60, ya que estas son las que extraen mayor caudal de las piscinas, lugar donde actualmente se lleva a cabo el servicio de dragado. Como se mencionó anteriormente, de este proceso se tiene que el 30% corresponde a material sólido y el 70% restante a líquido. Cabe destacar que el servicio es realizado durante 9 horas continuas.

En la tabla 5.1 es posible observar los diferentes caudales que pueden ser extraídos por los tipos de bombas Dragflow que posee la empresa. Es importante recalcar que estos datos fueron proporcionados por personal de la empresa. Según los datos mostrados, existen dos bombas que extraen el mismo caudal, por lo que cualquiera de estas puede ser utilizada.

**Tabla 5.1:** Bombas disponibles para realizar el servicio. Elaboración propia.

Bomba	Modelo	Caudal (m <sup>3</sup> /h)
Dragflow	EL604	200
Dragflow	EL60	200
Dragflow	EL12,5	60

Ahora bien, considerando el tiempo de operación y el caudal extraído de cada bomba se obtuvo el flujo volumétrico de material extraído por día (según ecuación 4.1), el que fue de 1800 m<sup>3</sup>/día.

$$Q_T = 200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 9 \frac{\text{h}}{1 \text{ día}} = 1800 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$Q_T = 1800 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Reemplazando en la ecuación 4.2 se obtuvo que el caudal volumétrico de líquido a tratar por día es de 1260 m<sup>3</sup>/día.

$$Q_L = 1800 \frac{m^3}{día} * 0,7 = 1260 \frac{m^3}{día}$$

$$Q_L = 1260 \frac{m^3}{día}$$

### 5.1.2. Componentes analizados de los depósitos de relaves y piscina de emergencia

#### 5.1.2.1. Depósitos de relaves

Con la información obtenida del sitio de depósitos de relaves del Servicio Nacional de Geología y Minería (2020) se extrajeron los datos mostrados en la tabla 5.2 y a partir de esta se seleccionaron 3 depósitos de relaves (tabla 5.3) de acuerdo con los criterios de que se encontraran activos, que se traten de un tranque o embalse de relave y que el recurso que se obtenga de la mina a la que pertenecen sea cobre y molibdeno (ver sección 4.1.2).

**Tabla 5.2:** Depósitos de relaves que cumplen con criterios. Elaborado a partir de planilla excel de SERNAGEOMIN (2020).

Empresa o Dueño	Faena	Deposito	Recurso	Masa (t)	Estado	Origen	Región	Comuna
Minera Los Pelambres	Los Pelambres	El Mauro	Cobre-Molibdeno	1700000000	Activo	Cubeta	Coquimbo	Los Vilos
Minera Los Pelambres	Los Pelambres	El Mauro	Cobre-Molibdeno	1700000000	Activo	Cubeta	Coquimbo	Los Vilos
Minera Los Pelambres	Los Pelambres	El Mauro	Cobre-Molibdeno	1700000000	Activo	Cubeta	Coquimbo	Los Vilos
CIA. Minera Doña Inés de Collahuasi	Collahuasi	Pampa Pabellón	Cobre-Molibdeno	1040000000	Activo	Cubeta	Tarapacá	Pica
Codelco	Salvador	Pampa Austral	Cobre-Molibdeno	319780000	Activo	Cubeta	Atacama	Diego de Almagro
Codelco	Salvador	Convertidor Teniente	Cobre-Molibdeno	1200000	Activo	Cubeta	Atacama	Diego de Almagro
Codelco	El Teniente	Caren	Cobre-Molibdeno	1127734790	Activo	Cubeta	Metropolitana	Alhue
Codelco	Chuquicamata	Talabre	Cobre-molibdeno	2103950000	Activo	Cubeta	Antofagasta	Calama

**Tabla 5.3:** Depósitos de relaves seleccionados.

El Mauro
Pampa Pabellón
Talabre

El primer depósito de relave seleccionado fue “El Mauro”, en la faena llamada “Los Pelambres”, ubicado en la región de Coquimbo, comuna de Los Vilos, el cual tiene una masa total de 1.700 millones de toneladas y se encuentra actualmente activo.

El segundo depósito de relave seleccionado fue “Pampa Pabellón”, en la faena llamada “Collahuasi”, ubicado en la región de Tarapacá, comuna de Pica, el cual tiene una masa total de 1000 millones de toneladas y se encuentra actualmente activo.

El tercer y último depósito de relave seleccionado fue “Talabre”, en la faena “Chuquicamata”, ubicado en la región de Antofagasta, comuna de Calama, el cual tiene una masa total de 2000 millones de toneladas y se encuentra actualmente también activo.

Posteriormente, se analizaron los datos publicados de cada uno, pero se determinó que la información facilitada no era suficiente debido a que no existían los detalles de los componentes de la fracción líquida, denominada aguas claras, de los depósitos de relaves seleccionados. Por lo que se procedió a buscar información en tesis publicadas y se obtuvo lo presentado en las tablas 5.4 y 5.5.

#### Caracterización de agua clara de relave de estero Carén

El depósito de relave identificado como Carén también cumplía con los criterios definidos anteriormente (que se encontrara activo, que correspondiera a un tranque o embalse de relave y que el recurso que se obtuviera de la mina fuera cobre y molibdeno). En la tesis publicada por Zbinden (2011), a pesar de los pocos datos que se encontraban publicados, fue posible obtener que dos de los parámetros se encontraban por sobre los límites máximos de la NCh 1333 (señalados en color celeste) que son el molibdeno y los sulfatos tal como se presenta en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4:** Datos obtenidos de caracterización de agua clara de relave de estero Carén. Elaborada a partir de información publicada por Zbinden (2011).

Parámetro	Unidad	Valor obtenido	Límite máximo según NCh 1333
Aluminio	mg/L	--	5
Arsénico	mg/L	--	0,1
Bario	mg/L	--	4
Berilio	mg/L	--	0,1
Boro	mg/L	--	0,75
Cadmio	mg/L	--	0,01
Cianuro	mg/L	--	0,2
Cloruros	mg/L	40,7675	200
Cobalto	mg/L	--	0,05
Cobre	mg/L	--	0,2
Cromo total	mg/L	--	0,1
Fluoruro	mg/L	--	1
Hierro	mg/L	--	5
Litio	mg/L	--	2,5
Manganeso	mg/L	--	0,2
Mercurio	mg/L	--	0,001
Molibdeno	mg/L	0,629	0,01
Níquel	mg/L	--	0,2
Plata	mg/L	--	0,2
Plomo	mg/L	--	5
Sólidos disueltos totales	mg/L	--	Ver tabla 1.2
Selenio	mg/L	--	0,02
Sodio porcentual	%	--	35
Sulfatos	mg/L	3.189,524	250
Vanadio	mg/L	--	0,10
Zinc	mg/L	--	2
Coliformes fecales	NMP/100 ml	--	1000
pH	--	7,5	5,5 a 9
Conductividad 25°C	(uS/cm)	2730	Ver tabla 1.2

#### Caracterización de agua clara de tranque de relaves Pampa Austral

El depósito de relave identificado como Pampa Austral también cumplía con los criterios (que se encontrara activo, que correspondiera a un tranque o embalse de relave y que el recurso que se obtuviera de la mina fuera cobre y molibdeno), por lo que se procedió a extraer los datos publicados por Ginocchio (2012). Si bien esta caracterización se encontraba más completa que el tranque de relave Carén, se obtuvo que el arsénico, boro, cloruros, manganeso, molibdeno, sólidos disueltos totales, sulfatos y conductividad se encontraban por sobre el límite máximo según NCh 1333 (señalados en color celeste), como se observa en la tabla 5.5.

**Tabla 5.5:** Caracterización de agua clara de tranque de relaves Pampa Austral. Elaborada a partir de los datos publicados por Ginocchio (2012).

Parámetro	Unidad	Valor obtenido	Límite máximo según NCh 1333
Aluminio	mg/L	0,060	5
Arsénico	mg/L	0,234	0,1
Bario	mg/L	0,190	4
Berilio	mg/L	<0,01	0,1
Boro	mg/L	8,7	0,75
Cadmio	mg/L	0,001	0,01
Cianuro	mg/L	0,149	0,2
Cloruros	mg/L	2.879	200
Cobalto	mg/L	<0,05	0,05
Cobre	mg/L	0,075	0,2
Cromo total	mg/L	<0,05	0,1
Fluoruro	mg/L	--	1
Hierro	mg/L	0,050	5
Litio	mg/L	--	2,5
Manganeso	mg/L	0,253	0,2
Mercurio	mg/L	<0,001	0,001
Molibdeno	mg/L	1,0	0,01
Níquel	mg/L	<0,05	0,2
Plata	mg/L	--	0,2
Plomo	mg/L	<0,05	5
Sólidos disueltos totales	mg/L	8.846	Ver tabla 1.2
Selenio	mg/L	--	0,02
Sodio porcentual	%	--	35
Sulfatos	mg/L	2.883	250
Vanadio	mg/L	<0,1	0,10
Zinc	mg/L	0,040	2
Coliformes fecales	NMP/100 ml	--	1000
pH	--	8,3	5,5 a 9
Conductividad 25°C	(uS/cm)	11.795	Ver tabla 1.2

#### 5.1.2.2. Piscina de emergencia

La piscina de emergencia seleccionada, en adelante PE1, se ubica en la Región de Atacama, provincia de Copiapó, comuna de Tierra Amarilla, a 162 km al sureste de la ciudad de Copiapó, la cual almacena agua recuperada proveniente de los depósitos de arenas y lamas, agua de rebose de los espesadores de lamas, agua de rebose de los espesadores de concentrado de cobre y molibdeno y agua de rebose de los espesadores de concentrado de cobre. Cabe destacar que la empresa no poseía una caracterización físico-química del líquido extraído, por lo que se les solicitó realizar una toma y posterior análisis de muestras, las que fueron realizadas en el laboratorio Silob Chile Ltda., de lo que se obtuvo que el aluminio, arsénico, cadmio, cobalto, cobre, cromo total, hierro, manganeso, mercurio, molibdeno, níquel, sodio porcentual, sulfatos y zinc se encontraban por sobre los límites máximos determinados en la NCh 1333 (señalados en color celeste), tal como es posible observar en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6:** Caracterización de líquido obtenido de PE1.

Parámetro	Unidad	Valor obtenido	Límite máximo según NCh 1333
Aluminio	mg/L	258	5
Arsénico	mg/L	0,8745	0,1
Bario	mg/L	0,7128	4
Berilio	mg/L	<0,05	0,1
Boro	mg/L	<0,5	0,75
Cadmio	mg/L	0,142	0,01
Cianuro	mg/L	<0,01	0,2
Cloruros	mg/L	173	200
Cobalto	mg/L	0,4296	0,05
Cobre	mg/L	4.436	0,2
Cromo total	mg/L	0,773	0,1
Fluoruro	mg/L	0,599	1
Hierro	mg/L	2.675	5
Litio	mg/L	0,095	2,5
Manganeso	mg/L	8,84	0,2
Mercurio	mg/L	0,0132	0,001
Molibdeno	mg/L	86,5	0,01
Níquel	mg/L	0,698	0,2
Plata	mg/L	0,0276	0,2
Plomo	mg/L	<0,01	5
Sólidos disueltos totales	mg/L	4.400	Ver tabla 1.2
Selenio	mg/L	0,0160	0,02
Sodio porcentual	%	35,24	35
Sulfatos	mg/L	1.115	250
Vanadio	mg/L	0,0928	0,10
Zinc	mg/L	31,1	2
Coliformes fecales	NMP/100 ml	<2	1000
pH	--	7,4	5,5 a 9
Conductividad 25°C	(uS/cm)	5.370	Ver tabla 1.2

### 5.1.2.3. Selección de la faena de aplicación

Tomando en consideración ambos tranques de relaves y la piscina estudiada se decidió trabajar con la piscina de emergencia PE1, ya que se contaba con todos los datos señalados en el punto 6 de la NCh 1333 (Requisitos del Agua para Riego), además fue la que se encontraba en las peores condiciones, con un total de 14 parámetros por sobre los límites máximos dispuestos en la normativa vigente, en comparación con los dos estudios de tranques de relaves analizados.

## 5.2. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS

### 5.2.1. Tecnologías estudiadas

Dentro de las tecnologías estudiadas se encontraron las dispuestas en la tabla 5.7, de las cuales se escogieron las presentadas en la tabla 5.8 (ultrafiltración, nanofiltración, osmosis inversa, filtro prensa y centrífuga decantadora) debido principalmente a que es posible encontrarlas a escala industrial (por lo que pueden tratar grandes caudales), son utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, separan líquidos de sólidos y su infraestructura no utiliza demasiado espacio.

**Tabla 5.7:** Tecnologías estudiadas.

Nombre de tecnología	Descripción
<b>Precipitación química</b>	Consta de 3 etapas (Coagulación, floculación y sedimentación). A grandes rasgos, en la tapa de coagulación se añade producto químico (coagulante), el cual desestabiliza las partículas que se encuentran en la mezcla y facilita su agrupación, todo esto ocurre con agitación física. Posteriormente en la floculación se disminuye la velocidad de agitación física para que se formen partículas más grandes y sedimenten fácilmente <sup>4</sup> .
<b>Filtración</b>	La mezcla de sólido-líquido se hace pasar a través de un material filtrante, donde el líquido pasa a través de los poros del material y los sólidos quedan dispuestos en él, los que deben ser retirados posteriormente <sup>4</sup> .
<b>Ultrafiltración</b>	Los componentes de la solución se transferirán desde el lado en donde existe una alta presión hacia el de baja presión. Las pequeñas partículas disueltas en la solución pasan a través de la membrana porosa, mientras que las grandes moléculas disueltas, los coloides y los sólidos en suspensión, que no pasan a través de los poros, serán retenidos <sup>5</sup> . El tamaño que es capaz de filtrar es de 0,01 a 0,1 micras <sup>6</sup> .
<b>Nanofiltración</b>	En el proceso de nanofiltración se utilizan membranas que funcionan bajo presión, lo que permite la concentración y desalado de solutos orgánicos. De esta forma, los solutos que tienen bajo peso molecular son retenidos, pero las sales pasan, total o parcialmente, a través de la membrana junto con el filtrado <sup>7</sup> . Es posible utilizar dos tipos de membranas, de espiral y tubulares, siendo estas últimas las más utilizadas. El tamaño que es capaz de filtrar es de 0,01 a 0,001 micras <sup>6</sup> .
<b>Osmosis inversa</b>	Se utiliza una membrana semipermeable para poder separar las impurezas que pueda contener el líquido, para esto se aplica fuerza extrema con la finalidad de revertir el flujo osmótico normal <sup>4</sup> . El tamaño que es capaz de filtrar es de 0,001 a 0,0001 micras <sup>6</sup> .
<b>Desbaste</b>	Se utilizan rejas y/o tamices para poder eliminar los sólidos gruesos a través de retención. Posteriormente se utilizan cuchillas o rasquetas para poder removerlos <sup>8</sup> .
<b>Flotación</b>	Se separan los sólidos de los líquidos a partir de la diferencia de densidad existente, los sólidos se unen a burbujas de gas, generalmente aire y forman conjuntos menos densos, esto es debido a que la fase líquida es sometida a un proceso de presurización <sup>8</sup> .
<b>Desarenado</b>	Proceso en el que se produce una separación por decantación, donde sedimentan sólo los sólidos de densidad elevada <sup>8</sup> .
<b>Centrifugación</b>	Esta técnica se utiliza para aislar o concentrar partículas suspendidas en un líquido, para esto se utiliza la fuerza centrífuga, la cual acelera el proceso de sedimentación de las partículas que tienen tendencia a hacerlo espontáneamente o en aquellas que tienden a flotar <sup>9</sup> .
<b>Sedimentación</b>	Se utiliza para eliminar los sólidos contenidos en una mezcla (sólido-líquido), mientras más tiempo se deje la mezcla sin movimiento más efectivo resulta ser el proceso <sup>10</sup> .

4 Shamrock Water Treatment S.A., 2007.

5 iAgua, 2020.

6 Telwesa, 2021.

7 Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2020.

8 Ingeoexpert, 2020.

9 Universidad de Barcelona, 2009.

10 Bruni, M., 2020.

### 5.2.2. Evaluación comparativa

Las tecnologías estudiadas para la recuperación de aguas residuales poseen innumerables ventajas y desventajas las que fueron agrupadas en la tabla 5.8, con el fin de realizar una comparación previa a la selección de acuerdo con los criterios que fueron definidos (costos de inversión y operación, efectos medioambientales, simpleza de manipulación y operación, facilidad de transporte, cumplimiento con el caudal y calidad de agua post-proceso).

Como es posible observar en la tabla 5.8 la ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa son tres tecnologías que tienen, a modo general, el mismo funcionamiento según la figura 5.1, lo que las diferencia entre sí es el tamaño de partículas que filtran y las membranas que se pueden utilizar en cada proceso. La membrana espiral (figura 5.2) puede ser utilizada en los tres procesos y las membranas de fibra hueca (figura 5.3) y tubular (figura 5.4) sólo pueden ser utilizadas en la ultrafiltración.

**Tabla 5.8:** Ventajas y desventajas de las posibles tecnologías a implementar.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
<b>Ultrafiltración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera ahorro de energía, ya que opera a presiones más bajas <sup>11</sup>.</li> <li>• Requiere pocos trabajos manuales <sup>11</sup>.</li> <li>• El agua tratada sale con alta pureza <sup>11</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a los productos químicos oxidativos <sup>12</sup>.</li> <li>• Se daña la membrana si la presión supera los 3 bar <sup>12</sup>.</li> <li>• Se pueden producir daños al tratar de evitar partículas duras y afiladas <sup>12</sup>.</li> </ul>
<b>Nanofiltración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remueve virus, bacterias y parásitos <sup>13</sup>.</li> <li>• Posee tasas de flujo más alta que la Osmosis Inversa <sup>13</sup>.</li> <li>• Remueve la dureza, como también reduce parcial y simultáneamente el sodio en el agua <sup>13</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remueve parcialmente los sólidos disueltos totales <sup>13</sup>.</li> <li>• Mayor consumo de energía en comparación con microfiltración y ultrafiltración <sup>14</sup>.</li> <li>• Retención limitada de sales e iones univalentes <sup>14</sup>.</li> </ul>
<b>Osmosis inversa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependiendo del diseño, se puede llegar a obtener una recuperación aproximada mayor al 85% de agua alimentada <sup>15</sup>.</li> <li>• Es un sistema de operación continua <sup>15</sup>.</li> <li>• Bajo costo operativo <sup>15</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las unidades pueden ser fácilmente dañadas por las condiciones ambientales <sup>16</sup>.</li> <li>• Se debe revisar periódicamente que el equipo no se haya dañado por los productos químicos <sup>16</sup>.</li> <li>• No es efectivo para aguas que contengan alto contenido orgánico, ya que el material orgánico disuelve la membrana <sup>16</sup>.</li> </ul>
<b>Centrífuga decantadora</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posee un tamaño compacto <sup>17</sup>.</li> <li>• Tiene un diseño hermético <sup>17</sup>.</li> <li>• Requiere un servicio de asistencia manual mínimo <sup>17</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene un costo más elevado que otras tecnologías <sup>17</sup>.</li> <li>• Cuando la gravedad de los sólidos resulta ser similar a la de los líquidos, no los puede separar <sup>17</sup>.</li> <li>• Requieren una corriente de funcionamiento más alta que el filtro <sup>17</sup>.</li> </ul>
<b>Filtro prensa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran superficie de filtración con poco espacio ocupado <sup>18</sup>.</li> <li>• Calidad de filtración <sup>18</sup>.</li> <li>• Bajo coste de inversión en comparación con otros sistemas de filtración <sup>18</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene un funcionamiento discontinuo <sup>18</sup>.</li> <li>• Es necesaria la presencia de un supervisor para controlar el deslodado <sup>18</sup>.</li> <li>• Dificultad del llenado de los armazones en caso de mala filtrabilidad <sup>18</sup>.</li> </ul>

11 Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2019.

12 PURITEC, 2019a.

13 Fibras y Normas de Colombia S.A.S., 2020.

14 PURITEC, 2019b.

15 SYPYSA, 2022.

16 Shamrock, 2007.

17 Huada, 2022.

18 Comquima, 2015.

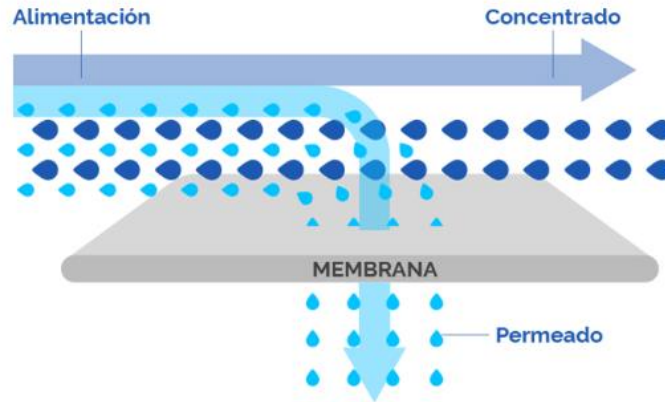


Figura 5.1: Explicación del proceso de filtración tangencial. SEFILTRA S.A. (2019).

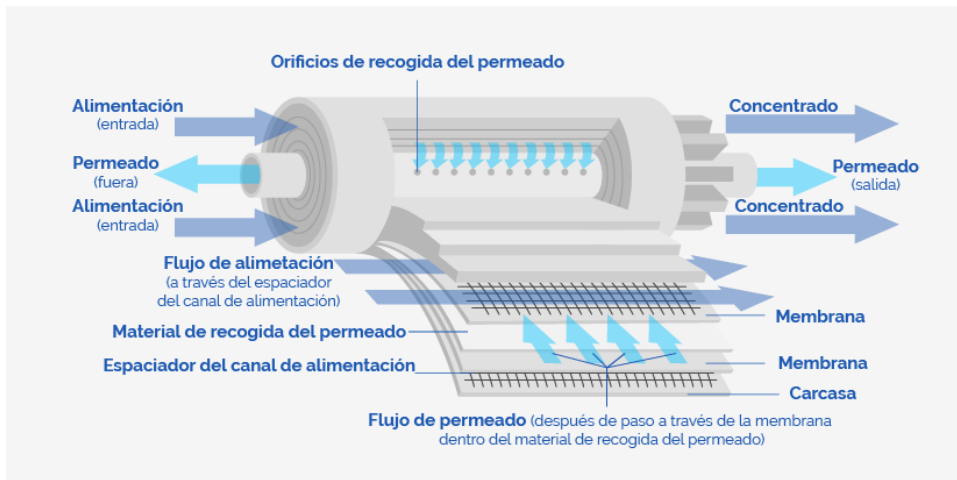


Figura 5.2: Membrana espiral. SEFILTRA S.A. (2019).

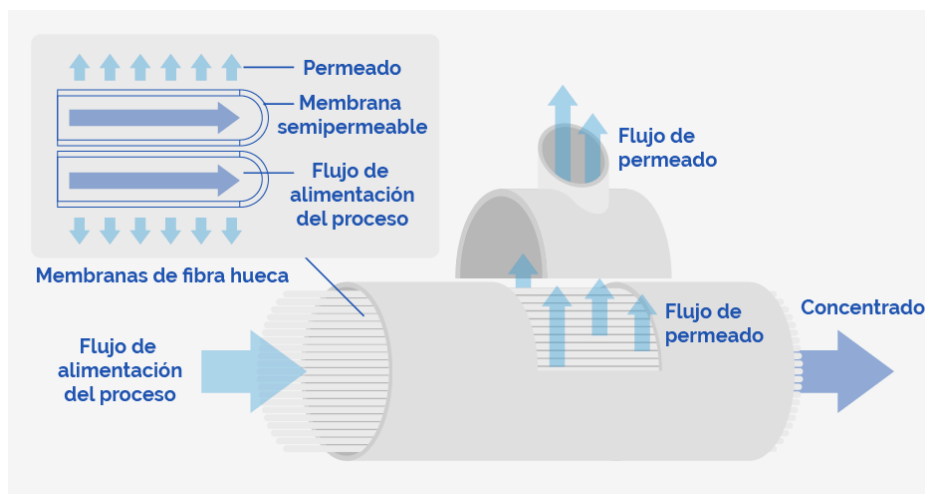
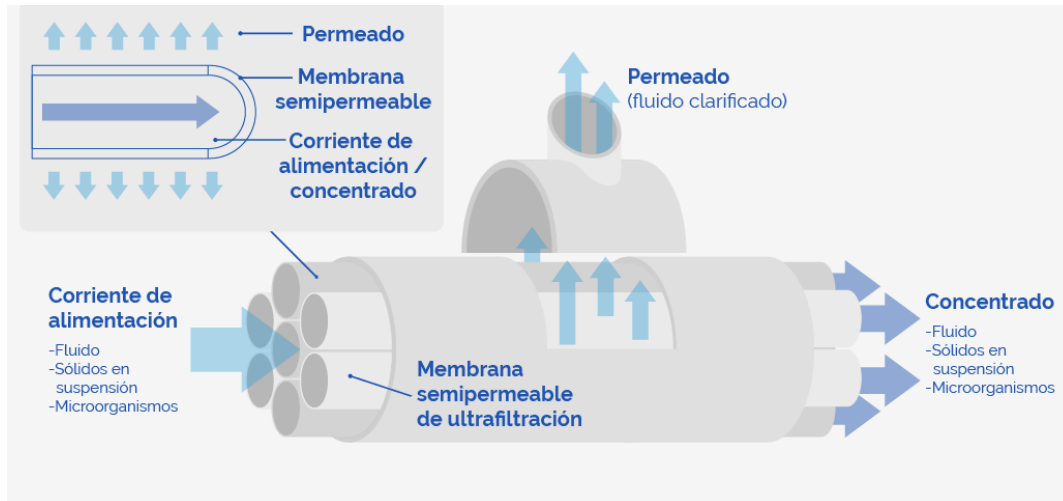
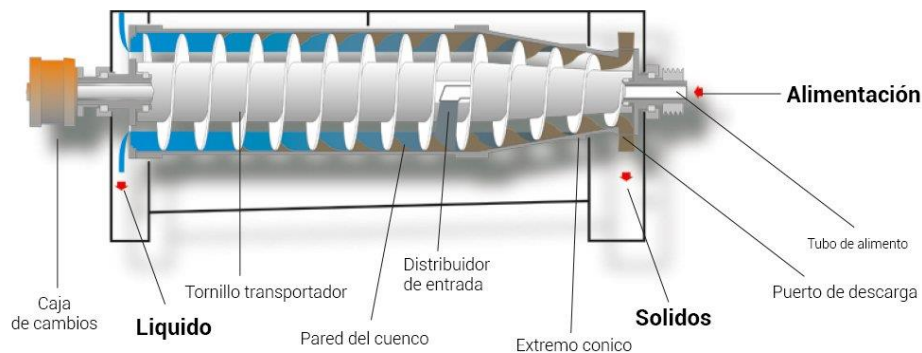


Figura 5.3: Membrana de fibra hueca. SEFILTRA S.A. (2019).



**Figura 5.4:** Membrana tubular. SEFILTRA S.A. (2019)

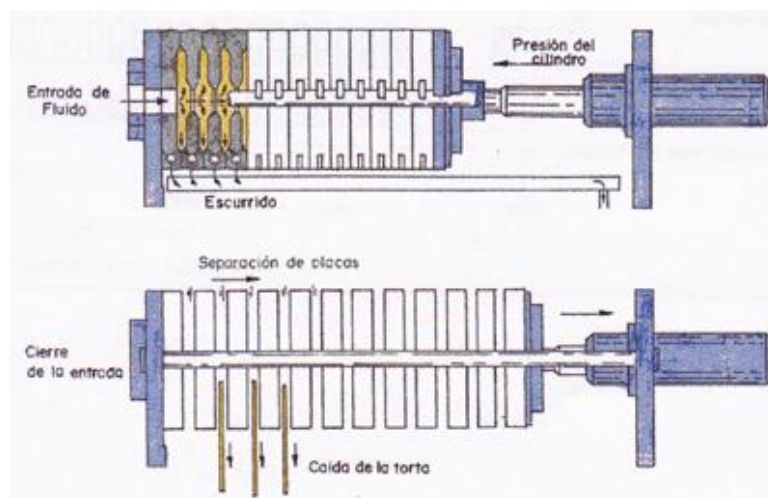
Por otro lado, la tecnología denominada como Centrífuga Decantadora (figura 5.5) opera de la siguiente manera: La separación de la mezcla tiene lugar en un recipiente cilíndrico horizontal equipado con un transportador sinfín; Un tubo de entrada estacionario introduce el producto en el recipiente y un distribuidor lo acelera gradualmente; La fuerza centrífuga es capaz de separar los sólidos del líquido; Los sólidos se recogen y se compactan en la pared del recipiente (Alfa Laval S.A., 2021).



**Figura 5.5:** Diagrama representativo de "Centrífuga Decantadora". Alfa Laval S.A. (2021).

Por último, la tecnología de filtro prensa (figura 5.6), según Simtech Ltda (2011), consta de los siguientes pasos:

- Cerrado de la prensa: Cuando el filtro está vacío el cabezal movable cierra las placas.
- Llenado: La cámara se llena con lodos para su filtración.
- Filtración: Una vez llenada la cámara se aumenta la presión para poder realizar la filtración, cuando el sistema alcanza su mayor capacidad de filtración se activa una alarma.
- Apertura de filtro: El cabezal movable se retira para desarmar las cámaras de filtración y el lodo que se encuentra en ellas cae por su propio peso.
- Limpieza: La limpieza de las membranas se puede llevar a cabo luego de realizar de 15 a 30 operaciones. Esta es sincronizada con la separación de las placas.



**Figura 5.6:** Diagrama explicativo de funcionamiento de "Filtro Prensa". Chamorro (2016).

### 5.2.3. Tecnología seleccionada

En cuanto a las puntuaciones según la escala de Likert (1 a 3), definidas anteriormente en la metodología, las que se relacionan directamente con los criterios también mencionados, costos de inversión y operación, efectos medioambientales, simpleza de manipulación y operación, facilidad de transporte, cumplimiento con caudal y calidad de agua post-proceso, de cada tecnología analizada se obtuvo lo presentado en las tablas 5.9 a la 5.13.

Cabe destacar que el recuadro marcado con color celeste corresponde a la puntuación que le fue asignada a cada criterio, la columna de "producto" corresponde al resultado obtenido de la multiplicación entre la ponderación y la puntuación de cada criterio, y, por último, la fila "total obtenido" corresponde al valor total que obtuvo la tecnología.

**Tabla 5.9:** Total obtenido para la tecnología "Ultrafiltración".

Criterio	Puntuación			Ponderación	Producto
	1	2	3		
<b>Costos de inversión y operación</b>	Presenta costos mayores a \$50.000.000	Presenta costos igual a \$50.000.000	Presenta costos menores a \$50.000.000	20%	0,20
<b>Efectos medioambientales</b>	Presenta impactos ambientales significativos	Presenta impactos ambientales moderados	No presenta impactos ambientales	15%	0,30
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	Compleja, se necesitan más de dos personas para operar	Medianamente compleja, se necesitan dos personas para operar	No es compleja, se necesita sólo una persona para operar	10%	0,30
<b>Facilidad de transporte</b>	No es transportable	Posee dificultad para transporte	Es transportable y no posee ninguna dificultad	15%	0,45
<b>Cumplimiento con caudal</b>	Se necesitan tres o más equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Se necesitan dos equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Un solo equipo cumple con el caudal volumétrico	20%	0,60
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	Más de tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	De uno a tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	Todos los parámetros se encuentran dentro del rango permitido para el agua para riego, según normativa vigente	20%	0,20
<b>Total obtenido</b>					<b>2,05</b>

**Tabla 5.10:** Total obtenido para la tecnología "Nanofiltración".

Criterio	Puntuación			Ponderación	Producto
	1	2	3		
<b>Costos de inversión y operación</b>	Presenta costos mayores a \$50.000.000	Presenta costos igual a \$50.000.000	Presenta costos menores a \$50.000.000	20%	0,20
<b>Efectos medioambientales</b>	Presenta impactos ambientales significativos	Presenta impactos ambientales moderados	No presenta impactos ambientales	15%	0,30
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	Compleja, se necesitan más de dos personas para operar	Medianamente compleja, se necesitan dos personas para operar	No es compleja, se necesita sólo una persona para operar	10%	0,30
<b>Facilidad de transporte</b>	No es transportable	Posee dificultad para transporte	Es transportable y no posee ninguna dificultad	15%	0,45
<b>Cumplimiento con caudal</b>	Se necesitan tres o más equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Se necesitan dos equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Un solo equipo cumple con el caudal volumétrico	20%	0,60
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	Más de tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	De uno a tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	Todos los parámetros se encuentran dentro del rango permitido para el agua para riego, según normativa vigente	20%	0,20
<b>Total obtenido</b>					<b>2,05</b>

**Tabla 5.11:** Total obtenido para la tecnología "Osmosis Inversa".

Criterio	Puntuación			Ponderación	Producto
	1	2	3		
<b>Costos de inversión y operación</b>	Presenta costos mayores a \$50.000.000	Presenta costos igual a \$50.000.000	Presenta costos menores a \$50.000.000	20%	0,20
<b>Efectos medioambientales</b>	Presenta impactos ambientales significativos	Presenta impactos ambientales moderados	No presenta impactos ambientales	15%	0,30
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	Compleja, se necesitan más de dos personas para operar	Medianamente compleja, se necesitan dos personas para operar	No es compleja, se necesita sólo una persona para operar	10%	0,30
<b>Facilidad de transporte</b>	No es transportable	Posee dificultad para transporte	Es transportable y no posee ninguna dificultad	15%	0,45
<b>Cumplimiento con caudal</b>	Se necesitan tres o más equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Se necesitan dos equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Un solo equipo cumple con el caudal volumétrico	20%	0,60
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	Más de tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	De uno a tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	Todos los parámetros se encuentran dentro del rango permitido para el agua para riego, según normativa vigente	20%	0,20
<b>Total obtenido</b>					<b>2,05</b>

Tabla 5.12: Total obtenido para la tecnología "Centrífuga Decantadora".

Criterio	Puntuación			Ponderación	Producto
	1	2	3		
<b>Costos de inversión y operación</b>	Presenta costos mayores a \$50.000.000	Presenta costos igual a \$50.000.000	Presenta costos menores a \$50.000.000	20%	0,20
<b>Efectos medioambientales</b>	Presenta impactos ambientales significativos	Presenta impactos ambientales moderados	No presenta impactos ambientales	15%	0,30
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	Compleja, se necesitan más de dos personas para operar	Medianamente compleja, se necesitan dos personas para operar	No es compleja, se necesita sólo una persona para operar	10%	0,20
<b>Facilidad de transporte</b>	No es transportable	Posee dificultad para transporte	Es transportable y no posee ninguna dificultad	15%	0,45
<b>Cumplimiento con caudal</b>	Se necesitan tres o más equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Se necesitan dos equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Un solo equipo cumple con el caudal volumétrico	20%	0,40
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	Más de tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	De uno a tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	Todos los parámetros se encuentran dentro del rango permitido para el agua para riego, según normativa vigente	20%	0,20
<b>Total obtenido</b>					<b>1,75</b>

**Tabla 5.13:** Total obtenido para la tecnología "Filtro Prensa".

Criterio	Puntuación			Ponderación	Producto
	1	2	3		
<b>Costos de inversión y operación</b>	Presenta costos mayores a \$50.000.000	Presenta costos igual a \$50.000.000	Presenta costos menores a \$50.000.000	20%	0,20
<b>Efectos medioambientales</b>	Presenta impactos ambientales significativos	Presenta impactos ambientales moderados	No presenta impactos ambientales	15%	0,30
<b>Simpleza de manipulación y operación</b>	Compleja, se necesitan más de dos personas para operar	Medianamente compleja, se necesitan dos personas para operar	No es compleja, se necesita sólo una persona para operar	10%	0,30
<b>Facilidad de transporte</b>	No es transportable	Posee dificultad para transporte	Es transportable y no posee ninguna dificultad	15%	0,15
<b>Cumplimiento con caudal</b>	Se necesitan tres o más equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Se necesitan dos equipos para cumplir con el caudal volumétrico	Un solo equipo cumple con el caudal volumétrico	20%	0,60
<b>Calidad de agua post-proceso</b>	Más de tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	De uno a tres parámetros superan límites máximos del agua para riego definidos por la normativa vigente	Todos los parámetros se encuentran dentro del rango permitido para el agua para riego, según normativa vigente	20%	0,20
<b>Total obtenido</b>					<b>1,75</b>

Como es posible observar en la tabla 5.14, las tecnologías de membranas fueron las que obtuvieron mayor puntaje, con un total de 2,05. No obstante, ninguna de estas es suficiente por sí sola para poder obtener los resultados esperados, que son de tener agua apta para el riego según la normativa y si se evalúa bien, de hecho, ninguna de las tecnologías, incluyendo las que obtuvieron menor puntaje, es capaz de hacerlo. Esto debido a que principalmente para poder separar diferentes componentes en un líquido es necesario implementar procesos que se complementen entre sí, primero un proceso que ayude a eliminar los sólidos suspendidos de la mezcla y luego un tratamiento químico para poder aumentar la calidad del agua. Es por esto que se propuso el proceso señalado en la sección 5.3 "Diseño Conceptual de la Solución".

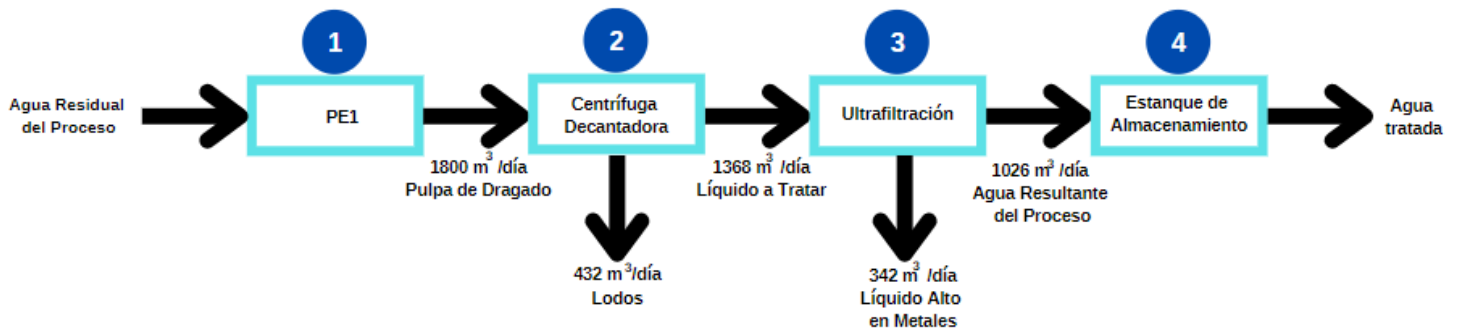
**Tabla 5.14:** Total obtenido de cada tecnología.

Tecnología	Total obtenido
Ultrafiltración	2,05
Nanofiltración	2,05
Osmosis inversa	2,05
Centrífuga decantadora	1,75
Filtro prensa	1,75

### 5.3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN

Como se mencionó anteriormente ninguna tecnología por si sola es capaz de dejar el agua apta para el riego según la NCh 1333, por lo que se propuso el proceso señalado en la figura 5.7, el cual corresponde a su diagrama de bloque.

Cabe destacar que se asume de que se trata de un fluido incompresible, por lo que la densidad no varía a lo largo del proceso. Es por esta misma razón que se trabajó con los caudales volumétricos.



**Figura 5.7:** Diseño conceptual con todas las etapas de la solución.

Este proceso contempla las siguientes etapas:

#### Etapa 1

En la figura 5.8 es posible observar el diagrama de bloques de la primera etapa del proceso, el que tiene las siguientes entradas y salidas.



**Figura 5.8:** Diagrama de bloque etapa 1 de proceso.

- Entrada: Dentro de la piscina PE1, la que almacena agua recuperada proveniente de los depósitos de arenas y lamas, del rebose de los espesadores de lamas, de los espesadores de concentrado de cobre y molibdeno como también de los espesadores de concentrado de cobre, se instala la draga, ya sea vertical u horizontal, dependiendo de las características de la piscina, y acoplada a ella se encuentra la bomba DragFlow EL604, la que posee las características presentadas en la tabla 5.15.

Cabe destacar que según el caudal volumétrico considerado para la bomba, 200 m<sup>3</sup>/h, se estima una eficiencia del 44%, una potencia de 34 kW y una altura de carga de 42 m, donde estos datos son obtenidos a partir de la curva de rendimiento señalada en el Anexo 4.

**Tabla 5.15:** Características técnicas de bomba DragFlow EL604. Elaborada a partir de información extraída de DragFlow Ultimate Efficiency (2021d).

Características técnicas	Unidad	Valor
Potencia de eje	kW	75
Potencia	kW	79,9
Frecuencia	Hz	50
RPM	-	1480
Voltaje	V	400
Diámetro de paso sólido	mm	60
Diámetro del soporte de goma	mm	150

- Salida: El caudal volumétrico de salida corresponde a 1800 m<sup>3</sup>/día de pulpa de dragado, de la que se desea disminuir la concentración de 14 parámetros, los que son Aluminio, Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo total, Hierro, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Sodio porcentual, Sulfatos y Zinc.

## Etapa 2

En la figura 5.9 es posible observar el diagrama de bloque de la etapa 2 del proceso, el que tiene las siguientes entras y salidas.

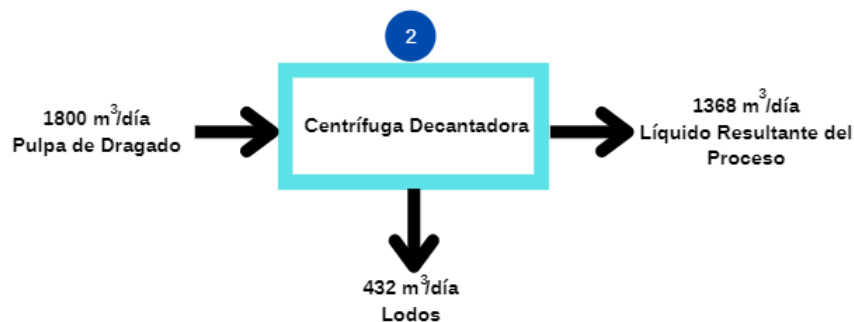
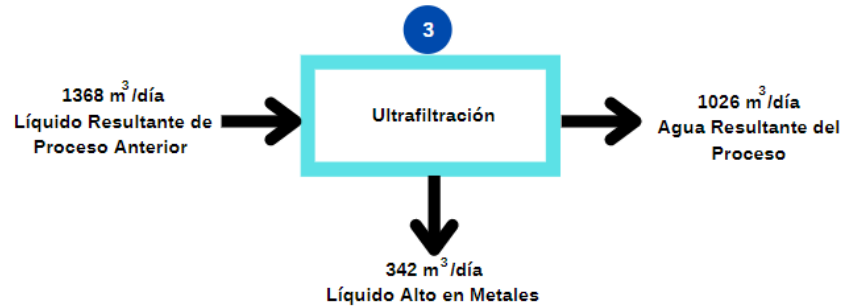


Figura 5.9: Diagrama de bloque etapa 2 de proceso.

- Entrada: El caudal de entrada a la centrifuga decantadora es de 1800 m<sup>3</sup>/día de pulpa de dragado, esta tecnología se utilizará como tratamiento previo para poder separar el 30% (v/v) de los sólidos que se encuentran en el caudal volumétrico de la entrada. Cabe destacar que esta tecnología tiene un 80% de eficiencia volumétrica. Tal como se mencionó anteriormente el caudal que entra a esta etapa será extraído de PE1 a través de la bomba DragFlow EL604.
- Salida: Luego del funcionamiento de esta tecnología existen dos salidas, en una de ellas saldrán 432 m<sup>3</sup>/día de lodos, los que serán entregado a los clientes como normalmente se hace en el servicio. La otra salida corresponderá a 1368 m<sup>3</sup>/día de líquido el cual aún tendrá un pequeño porcentaje de sólidos. Este líquido será dispuesto en un estanque de almacenamiento el cual se considera que tendrá un volumen total de 1570 m<sup>3</sup>, con un diámetro de 20 m y una altura de 5 m, para posteriormente extraerlo a través de una bomba DragFlow EL604 y poder llevarlo a la siguiente tecnología que se implementará.

### Etapa 3

En la figura 5.10 es posible observar un diagrama de bloque de la tercera etapa del proceso, que corresponde a la utilización de la ultrafiltración.



**Figura 5.10:** Diagrama de bloque etapa 3 de proceso.

- **Entrada:** Se considera un caudal volumétrico de entrada a la tecnología de ultrafiltración de  $1368 \text{ m}^3/\text{día}$ , que corresponde al mismo caudal volumétrico que sale de la tecnología anterior. No obstante, es necesario tener en cuenta que para las especificaciones del estanque contemplado antes de esta tecnología se debe tener siempre en él un volumen de  $400 \text{ m}^3$  para asegurar el buen funcionamiento de la bomba.

Cabe destacar que, para el funcionamiento de la ultrafiltración, se considerarán 18 módulos de  $3,4 \text{ m}$  de largo x  $2,15 \text{ m}$  de ancho x  $2,35 \text{ m}$  de alto (Culligan Matrix, 2012), además se debe tener en consideración que este equipo es capaz de filtrar partículas con un diámetro de  $0,1$  hasta  $0,01$  micras (Telwesa, 2021).

- **Salida:** En esta tecnología existen dos caudales de salida, por un lado, sale líquido con alto contenido de metales (un  $25\%$  (v/v) del total del caudal) lo que corresponde a  $342 \text{ m}^3/\text{día}$ , este líquido estará a disposición del cliente para que ellos decidan en qué puede ser utilizado, dentro de los posibles usos están devolverlo a PE1 o bien recircularlo al proceso productivo, y por otro lado sale el agua tratada ( $75\%$  (v/v) del total del caudal) tratándose de  $1026 \text{ m}^3/\text{día}$ , la que será almacenada en un estanque.

#### Etapa 4

En la figura 5.11 es posible observar un diagrama de bloque del estanque de almacenamiento para el agua tratada, ya que esta no será ocupada inmediatamente. Este estanque deberá ser proporcionado por el cliente.

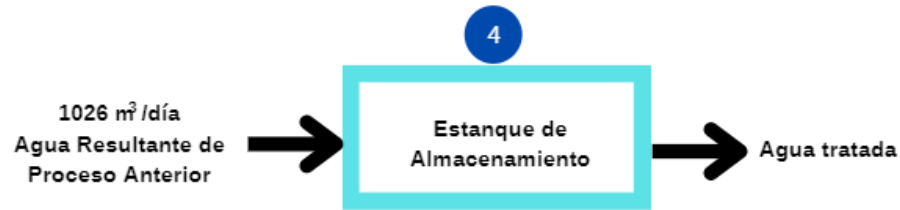


Figura 5.11: Diagrama de bloque etapa 4 de proceso.

- Entrada: El caudal de entrada al estanque de almacenamiento será de 1026 m<sup>3</sup>/día de agua tratada.
- Salida: Dependerá del sistema que implemente el cliente para poder utilizar el agua una vez tratada.

En la figura 5.12 es posible observar el proceso propuesto con más detalle, por lo que es más simple comprender en qué lugar estarán dispuestos los estanques de almacenamiento y las bombas que serán utilizadas.

Cabe destacar que para la unión de cada etapa serán utilizadas mangueras para poder darle fluidez al proceso propuesto.

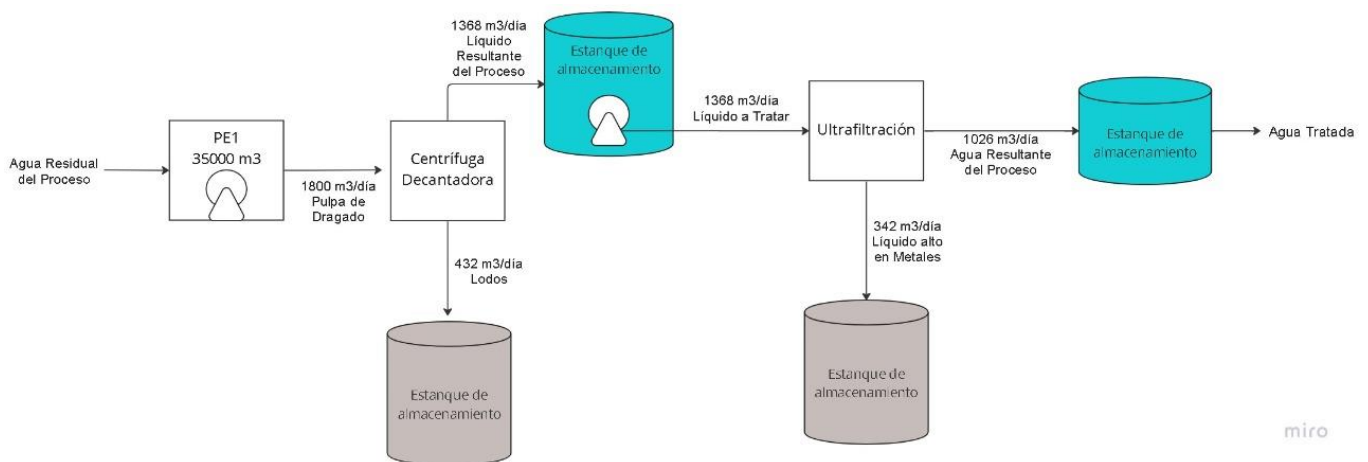


Figura 5.12: Diagrama de flujo de solución propuesta.

---

## 5.4. FACTIBILIDAD ECONÓMICA

### 5.4.1. Flujo de caja

Los datos que se tomaron en cuenta para poder realizar el flujo de caja, con el objetivo de evaluar la factibilidad económica del proyecto, son los dispuestos en las tablas desde 5.16 hasta 5.18, cuyo detalle se presenta a continuación (ver anexo 3).

#### 5.4.1.1. *Venta del Servicio*

Para la venta del servicio se consideraron 305 días de operación de las tecnologías al año, en donde cada día se generarán 1026 m<sup>3</sup> de agua recuperada, para cada metro cúbico de agua recuperada se aplicará un cobro de 0,05 UF.

Para los 15 periodos considerados, los cuales corresponden a la vida útil que tienen las maquinarias, serán utilizados los mismos valores.

#### 5.4.1.2. *Mano de Obra*

Para poder operar las tecnologías serán considerados cinco (5) operadores, ya que se necesitan dos (2) para cada tecnología d centrífuga decantadora y sólo uno para operar la ultrafiltración a los cuales se les pagará un sueldo de 3418 UF mensualmente.

#### 5.4.1.3. *Materiales*

En este ítem de egresos se consideraron dos (2) bombas, cuatro (4) generadores para la operación de las tecnologías, mangueras y válvulas para el paso del fluido a través de las tecnologías a implementar.

#### 5.4.1.4. *Depreciación*

En la depreciación del tipo lineal fueron considerados los costos de las tecnologías y fueron divididos en el periodo de los 15 años que fue considerado el flujo de caja.

#### 5.4.1.5. *Tecnologías a implementar*

En las tecnologías a implementar fueron consideradas dos (2) centrífugas decantadoras y una (1) ultrafiltración. Estas se consideraron como inversión inicial.

#### 5.4.1.6. *Capital de trabajo*

Se consideró capital de trabajo ya que en el primer periodo se necesitará de ingresos para poder cancelar a los trabajadores que operarán las tecnologías.

#### 5.4.1.7. Utilidades antes de impuesto

Las utilidades antes de impuesto fueron calculadas a través de la diferencia entre los ingresos por la venta del servicio y, la mano de obra, materiales y la depreciación.

#### 5.4.1.8. Impuestos

Fue considerado un impuesto a la renta de primera categoría de un 27%, según la circular N°52 de SII, 2014.

#### 5.4.1.9. Utilidad neta después de impuesto

Para la utilidad neta después de impuesto fue necesario obtener la diferencia entre la utilidad existente antes del impuesto y los impuestos.

**Tabla 5.16:** Flujo de caja de proyecto propuesto, periodo 0 al 5 expresado en UF.

	<b>Periodos (años)</b>					
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Ingresos (UF)</b>						
<b>Venta del servicio</b>	0	14.261	14.261	14.261	14.261	14.261
<b>Egresos (UF)</b>						
<b>Mano de obra</b>	0	3.418	3.418	3.418	3.418	3.418
<b>Materiales</b>	0	8.545	8.545	8.545	8.545	8.545
<b>Depreciación</b>	0	551	551	551	551	551
<b>Tecnologías a implementar</b>	-8.261	0	0	0	0	0
<b>Capital de trabajo</b>	-1.139	0	0	0	0	0
<b>Utilidad antes de impuesto</b>	0	1.747	1.747	1.747	1.747	1.747
<b>Impuestos (27%)</b>	0	472	472	472	472	472
<b>Utilidad neta después de impuesto</b>	0	1.275	1.275	1.275	1.275	1.275
<b>Flujo de caja</b>	-9.400	1.826	1.826	1.826	1.826	1.826

**Tabla 5.17:** Flujo de caja de proyecto propuesto, periodo 6 al 11 expresado en UF.

<b>Periodos (años)</b>						
	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>Ingresos (UF)</b>						
<b>Venta del servicio</b>	14.261	14.261	14.261	14.261	14.261	14.261
<b>Egresos (UF)</b>						
<b>Mano de obra</b>	3.418	3.418	3.418	3.418	3.418	3.418
<b>Materiales</b>	8.545	8.545	8.545	8.545	8.545	8.545
<b>Depreciación</b>	551	551	551	551	551	551
<b>Tecnologías a implementar</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Capital de trabajo</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad antes de impuesto</b>	1.747	1.747	1.747	1.747	1.747	1.747
<b>Impuestos (27%)</b>	472	472	472	472	472	472
<b>Utilidad neta después de impuesto</b>	1.275	1.275	1.275	1.275	1.275	1.275
<b>Flujo de caja</b>	1.826	1.826	1.826	1.826	1.826	1.826

**Tabla 5.18:** Flujo de caja de proyecto propuesto, periodo 12 al 15 expresado en UF.

<b>Periodos (años)</b>				
	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>Ingresos (UF)</b>				
<b>Venta del servicio</b>	14.261	14.261	14.261	14.261
<b>Egresos (UF)</b>				
<b>Mano de obra</b>	3.418	3.418	3.418	3.418
<b>Materiales</b>	8.545	8.545	8.545	8.545
<b>Depreciación</b>	551	551	551	551
<b>Tecnologías a implementar</b>	0	0	0	0
<b>Capital de trabajo</b>	0	0	0	0
<b>Utilidad antes de impuesto</b>	1.747	1.747	1.747	1.747
<b>Impuestos (27%)</b>	472	472	472	472
<b>Utilidad neta después de impuesto</b>	1.275	1.275	1.275	1.275
<b>Flujo de caja</b>	1.826	1.826	1.826	1.826

#### 5.4.2. Cálculo de VAN y TIR

Por otro lado, para el cálculo del VAN y TIR fueron considerados los datos dispuestos en la tabla 5.19. La tasa de descuento fue proporcionada por la empresa, ya que es la que utilizan normalmente para la evaluación de proyectos.

**Tabla 5.19:** Datos utilizados para cálculo del VAN y TIR en UF.

<b>Dato</b>	<b>Valor (UF)</b>
Inversión inicial	-9.400
Flujo periodo 1	1.826
Flujo periodo 2	1.826
Flujo periodo 3	1.826
Flujo periodo 4	1.826
Flujo periodo 5	1.826
Flujo periodo 6	1.826
Flujo periodo 7	1.826
Flujo periodo 8	1.826
Flujo periodo 9	1.826
Flujo periodo 10	1.826
Flujo periodo 11	1.826
Flujo periodo 12	1.826
Flujo periodo 13	1.826
Flujo periodo 14	1.826
Flujo periodo 15	1.826
Tasa de descuento	15%

Con estos datos se obtuvo los siguientes valores, para el Valor Actual Neto (VAN) 1.279 UF y para la Tasa Interna de Retorno (TIR) 18%. Por lo que es posible decir que el proyecto es rentable considerando valores del agua recuperada desde los 0,04 UF y podría perfectamente llevarse a cabo.

---

## 6. DISCUSIÓN

Con respecto a la caracterización del agua disponible para su recuperación es posible decir que en PE1 existen 14 parámetros que se encuentran por sobre la NCh 1333.Of 78, los cuales son el Aluminio, Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo total, Hierro, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Sodio porcentual, Sulfatos y Zinc. No obstante, si se compara este análisis con el realizado por Ginocchio (2012) se obtuvo que existían 8 parámetros por sobre la misma norma los cuales fueron Arsénico, Boro, Cloruros, Manganeso, Molibdeno, Sólidos disueltos totales, Sulfatos y Conductividad, pero existían 6 parámetros que no se analizaron, por lo que este análisis no resulta ser representativo. Con relación a la cantidad de fluido que se iba a tratar, en este proyecto es de una pulpa de 1800 m<sup>3</sup>/día mientras que para el proyecto de Ginocchio (2012) considera una capacidad de tratamiento de 40 m<sup>3</sup>/día, lo que corresponde solo al 2,22% del caudal tratado en este proyecto.

En relación a la selección del proceso más adecuado para la recuperación de las aguas se obtuvo que las posibles tecnologías a implementar fueron la Ultrafiltración, Nanofiltración, Osmosis Inversa, Filtro Prensa y Centrífuga Decantadora, de las cuales se seleccionaron la Ultrafiltración y Centrífuga Decantadora. Mientras que los sistemas de tratamientos identificados por Ginocchio (2012) fueron la precipitación y floculación, Aireación/Oxidación, Adsorción y Biosorción, Intercambio Iónico, Electrodialisis, Procesos de membrana (Osmosis Inversa y Nanofiltración), Tratamiento Biológico usando Humedales Artificiales, Sistemas de Reactores Microbiológicos, donde finalmente se seleccionaron el tratamiento basado en enclavamiento, tratamiento pasivo-biológico anaeróbico, filtro de grava plantado, precipitación con oxígeno y la precipitación con filtro de hierro y sales férricas. Al momento de establecer un diseño conceptual del sistema de recuperación en este proyecto se propuso un sistema de incluyera la tecnología de “Centrífuga Decantadora” y la “Ultrafiltración”, mientras que en el proyecto publicado por Ginocchio (2012) se propusieron dos combinaciones de sistemas de tratamientos, el primero fue combinar un filtro de arena y tratamiento biológico anaeróbico pasivo y el segundo fue tratamiento biológico anaeróbico pasivo y filtro de gravilla plantado, donde ambas combinaciones presentan la misma desventaja que es el posterior manejo que tendrán las plantaciones para el funcionamiento del tratamiento biológico anaeróbico pasivo, cada cuánto se cambiarán y los residuos que serán generados.

---

Además, debido a que el proyecto actual está evaluado para un gran caudal y para un líquido sumamente contaminado, será eficiente la implementación de esta solución en piscinas que presenten disminuciones significativas de los parámetros analizados.

En cuanto a la estimación de los costos de implementación del sistema propuesto en el presente proyecto se obtuvo una inversión inicial de 9.400 UF, mientras que en el proyecto publicado por Ginocchio en 2012 se obtuvo que la combinación 2 era la que requería de un mayor costo total con \$43.594.700 o 1.242 expresado en UF, debido principalmente a que el caudal a tratar (40 m<sup>3</sup>/día) es mucho menor al que será tratado en esta tesis (1800 m<sup>3</sup>/día). Se desprende de esta información que el presente proyecto requiere de una mayor inversión inicial, ya que son tecnologías más avanzadas las que tratarán un mayor caudal volumétrico a tratar y estas serán facilitadas por un proveedor que trabajará a partir de los criterios dispuestos como, costos de inversión y operación, cumplimiento con el caudal, calidad de agua post-proceso, impactos ambientales, movilidad del sistema y simpleza de la manipulación de la tecnología, mientras que en el otro proyecto las tecnologías serán diseñadas en el mismo lugar en el que se va a implementar, se deberá considerar un recambio de las plantaciones, además de considerar el manejo de estas que se encontrarán con altas concentraciones de metales.

Con respecto a la evaluación técnica y económica de la implementación de un sistema de recuperación de agua para su reutilización en la minería se pudo proponer un sistema que resulta ser factible. No obstante, al igual que en lo publicado en proyecto de Ginocchio en 2012 es necesario realizar más análisis de las características físico-químicas de las aguas obtenidas después de cada proceso para poder asegurar la factibilidad técnica del proceso propuesto.

Ahora bien, en relación a los criterios elegidos para poder seleccionar la tecnología adecuada, costos de inversión y operación, efectos medioambientales, simpleza de manipulación y operación, facilidad de transporte, cumplimiento con caudal y calidad de agua post-proceso, las que fueron consideradas con mayor ponderación fueron los costos de inversión y operación, el cumplimiento con el caudal y la calidad de agua post-proceso, donde los tres tuvieron una ponderación de 20%. Estos criterios se consideraron como los más importantes debido a que los costos de inversión y operación fueron necesarios para luego estudiar la factibilidad económica del proyecto y poder apreciar si era rentable. Por otro lado, el cumplimiento con el caudal fue importante debido a que se tenía el caudal extraído por la bomba y lo ideal es poder utilizar un solo equipo inmediatamente después

de la bomba, por último, la calidad de agua post-proceso ya que se buscaba obtener agua apta para riego según la NCh 1333. Of 78. En comparación con lo publicado por Ginocchio en 2012, los criterios que fueron identificados como los de mayor relevancia fueron la capacidad del tratamiento para remover ciertos parámetros que se encontraban por sobre la NCh 1333 y los costos de inversión y operación específica de cada tecnología, ambas con un 40% de ponderación, los otros criterios que fueron considerados fueron efectos medioambientales y la simpleza de manipulación y operación, ambas con un 10%.

De acuerdo a la información descrita en el proyecto publicado por Ginocchio (2012), no se toma en consideración el cumplimiento con el caudal a tratar, debido a que este es bajo, no obstante, es necesario añadir un diagrama de flujo de las combinaciones seleccionadas para poder comparar, entre ambos proyectos, cuánta agua tratada se obtiene del flujo volumétrico total que ingresa al sistema de recuperación.

En relación con estudios posteriores, se recomienda realizar una investigación más amplia de las tecnologías de separación sólido-líquido existentes, ya que es posible, que existan mejores opciones que las que fueron seleccionadas, además se sugiere la realización de análisis de las aguas obtenidas para poder verificar, más allá de bibliografía como son los publicados por Brandhuber; et al, 2001 y Kabai; et al, 2013, que esta agua quedará apta para el riego según la normativa vigente.

## 7. CONCLUSIONES

Se logró definir cuál era el caudal volumétrico con el que se iba a trabajar, 1800 m<sup>3</sup>/día, y las características que tenía este líquido a tratar, el cual tenía 14 parámetros por sobre la NCh 1333. Of78, correspondientes al Aluminio, Arsénico, Cadmio, Cobalto, Cobre, Cromo total, Hierro, Manganeso, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Sodio porcentual, Sulfatos y Zinc.

Por otro lado, para poder analizar las tecnologías que resultaban ser más adecuadas para el tratamiento del líquido extraído de la piscina de emergencia, se realizó una tabla comparativa con todos los métodos que existían para la separación de sólidos y líquidos. Posteriormente se seleccionaron sólo 5 (Ultrafiltración, Nanofiltración, Osmosis inversa, Centrífuga Decantadora y Filtros prensa), ya que fueron los que cumplían con los criterios de que fuera posible encontrar a escala industrial, en particular para la gran minería, para que pudiera cumplir con el caudal volumétrico, que fueran utilizadas para el tratamiento de aguas residuales, que separaran líquidos de sólidos y por último, que su infraestructura no utilizara demasiado espacio. Finalmente se realizó una tabla con ponderaciones para cada una de ellas en donde se obtuvo que la tecnología más adecuada era la de ultrafiltración. Sin embargo, para poder utilizar esta tecnología es necesario pasar el líquido a tratar por un proceso previo.

Para el diseño conceptual del sistema de recuperación se propuso, en primer lugar, para el proceso físico-químico previo, una centrífuga decantadora, la cual tiene una eficiencia del 80% y tiene la función principal de separar la mayor cantidad de sólidos que contiene el líquido posterior a esta se conducirá el fluido a la tecnología de ultrafiltración la cual dejará el agua apta para el riego según lo dispuesto en la normativa vigente. Cabe destacar que esta agua se almacenará en estanques para que sea utilizada cuando se estime conveniente.

Con respecto a los costos de implementación del sistema propuesto, se obtuvo que este era rentable según los valores obtenidos del Valor Actual Neto con 1.279 UF y la Tasa Interna de Retorno con un 18%, la cual resultó ser mayor que la rentabilidad del 15% estimada del proyecto. La rentabilidad del proyecto aumenta a medida que se incrementa el cobro del agua tratada, considerando un mínimo de cobro de 0,04 UF.

Con respecto al objetivo general propuesto, Evaluar técnica y económicamente la implementación de un sistema de recuperación de agua en la etapa de dragado minero en la empresa Nexxo S.A., para su reutilización en la minería del cobre y del molibdeno, a partir de los resultados que fueron obtenidos en esta investigación, es posible concluir que, técnicamente la solución podría cumplir con el objetivo que es dejar el agua apta para el riego según lo señalado en la normativa vigente (NCh 1333. Of78) con la selección de las tecnologías de “Centrifuga Decantadora” y “Ultrafiltración” para poder constituir la planta de tratamiento móvil, para que así fuera posible su reutilización en la minería del cobre y del molibdeno. Económicamente se obtuvo que el proceso propuesto como solución era rentable y por lo tanto es posible llevarlo a cabo, según los datos obtenidos en los cálculos de Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

Por otro lado, este proyecto resulta tener una gran incidencia en la minería, ya que implicaría la reutilización de agua que actualmente no está siendo utilizada. Cabe destacar que el tratamiento y recuperación del agua en el proceso minero es crucial, ya que es un recurso natural con el que se debe tener un uso cuidadoso debido principalmente al problema de escasez que existe hoy en día, tomando en consideración que las zonas en donde se ubican las mineras de Chile son catalogadas como las más secas y además tiene un alto impacto en comunidades cercanas o bien el mismo ecosistema en donde se lleva a cabo esta actividad productiva. A través del tratamiento y la recuperación del agua se estaría contribuyendo a que el proceso minero fuera más sostenible.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguas Antofagasta. (2013). *Tarifas Actuales*. Aguas Antofagasta. <<http://www3.aguasantofagasta.cl/empresa/informacion-comercial/tarifas/tarifas-actuales.html>> [consulta: 08 noviembre 2022]

Alfa Laval S.A. (2021). *Foodec*. Alfa Laval. <<https://www.alfalaval.com.co/productos-y-soluciones/separacion/separadoras-centrifugas/decantadores-centrifugas/foodec/>> [consulta: 10 octubre 2022]

Andritz. (2018). *Centrífuga decantadora con D de ANTRITZ, la solución eficiente para el espesado y deshidratación de lodos*. RETEMA, *Revista Técnica de Medio Ambiente*. <<https://www.retema.es/actualidad/centrifuga-decantadora-d-andritz-solucion-eficiente-espesado-deshidratacion-lodos#:~:text=La%20centr%C3%ADfuga%20decantadora%20D%20de%20ANDRITZ%20es%20capaz%20de%20producir,para%20lograr%20un%20Ocompostaje%20eficiente.>>> [consulta: 30 agosto 2022]

Banco Mundial. (2011). *Diagnóstico de la Gestión de los Recursos Hídricos*. Dirección General de Aguas. <[https://dga.mop.gob.cl/eventos/Diagnostico%20gestion%20de%20recursos%20hidricos%20en%20Chile\\_Banco%20Mundial.pdf](https://dga.mop.gob.cl/eventos/Diagnostico%20gestion%20de%20recursos%20hidricos%20en%20Chile_Banco%20Mundial.pdf)> [consulta: 24 abril 2022]

Brandhuber P & Amy G. (2001). Arsenic removal by a charged ultrafiltration membrane — influences of membrane operating conditions and water quality on arsenic rejection, *Desalination, Volume 140, Issue 1*. 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00350-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00350-2).

Bruni M, Shrestha R, Spuhler D. (2020). *Sedimentación*. SSWM. <<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/sedimentaci%C3%B3n-#:~:text=La%20sedimentaci%C3%B3n%20se%20usa%20para,para%20funcionar%20de%20forma%20efectiva>> [consulta: 30 agosto 2022]

Chamorro, J. (2016). *Depuración para principiantes IX-4: Deshidratación de fangos*. *Filtros prensa*. iAgua. <<https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-ix-4-deshidratacion-fangos-filtros-prensa>> [consulta: 10 octubre 2022]

---

Código de Minería [CM]. Ley 18248 de 1983. 26 de septiembre 1983 (Chile).

Código de Aguas [CA]. Ley 21435 de 2022. 25 de marzo 2022 (Chile).

Comisión Chilena del Cobre. (2008). *Buenas prácticas y uso eficiente de agua en la industria minera*. Academia. <[https://www.academia.edu/30924783/ BUENAS PR%C3%81CTICAS Y USO EFICIENTE DE AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA](https://www.academia.edu/30924783/BUENAS_PR%C3%81CTICAS_Y_USO_EFICIENTE_DE_AGUA_EN_LA_INDUSTRIA_MINERA) > [consulta: 15 abril 2022]

Comisión Chilena del Cobre. (2017). *Mercado Internacional del Molibdeno*. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). <[https://www.cochilco.cl/ Mercado %20de %20 Metales/informe%20molibdeno%202017.pdf](https://www.cochilco.cl/Mercado_%20de_%20Metales/informe%20molibdeno%202017.pdf) > [consulta: 9 junio 2022]

Comisión Chilena del Cobre. (2020). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020–2031*. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). <[https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2012%2024%20Proyeccion%20agua %20mineria%20del%20cobre%202020-2031\\_v1.0.pdf](https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/2020%2012%2024%20Proyeccion%20agua%20mineria%20del%20cobre%202020-2031_v1.0.pdf) > [consulta: 6 mayo 2022]

Comquima. (2015). *Ventajas y desventajas de los filtros prensa*. Comquima Europe. <<https://comquima.com/ventajas-y-desventajas-de-los-filtros-prensa>> [consulta: 30 agosto 2022]

Consejo Minero. (2020). *Minería en Número 2020*. <[https://consejominero.cl/wpcontent/uploads/2020/07/Mineria\\_en\\_numeros\\_2020\\_web.pdf](https://consejominero.cl/wpcontent/uploads/2020/07/Mineria_en_numeros_2020_web.pdf) > [consulta: 16 abril 2022]

Consejo Minero. (2019). *Normativa Aplicable*. <<https://consejominero.cl/comunicaciones/plataforma-de-relaves/normativa-aplicable/>> [consulta: 16 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2018c). *Chancado*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934 /chancado\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_t_cnico_060119.pdf) > [consulta: 1 mayo 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2019g). *Electroobtención*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004 /electroobtencion\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencion_media_t_cnico_060119.pdf) > [consulta: 15 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2018a). *El proceso productivo del cobre*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso\\_productivo.html](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso_productivo.html) > [consulta: 11 abril 2022]

---

Corporación Nacional del Cobre. (2019e). *Electrorefinación*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005034/electrorefinacion\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005034/electrorefinacion_media_t_cnico_060119.pdf)> [consulta: 15 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2019b). *Molienda*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_media_t_cnico_060119.pdf)> [consulta: 16 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2019a). *Extracción*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005109/extraccion\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005109/extraccion_media_t_cnico_060119.pdf)> [consulta 5 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2018b). *Exploración*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploracion\\_media\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploracion_media_060119.pdf)> [consulta: 16 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2019c). *Flotación*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005132/flotacion\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005132/flotacion_media_t_cnico_060119.pdf)> [consulta: 5 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2019d). *Fundición*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion\\_media\\_t\\_cnico\\_060119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion_media_t_cnico_060119.pdf)> [consulta: 5 abril 2022]

Corporación Nacional del Cobre. (2019f). *Lixiviación*. Codelco Educa. <[https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion\\_media\\_t\\_cnico\\_080119.pdf](https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf)> [consulta: 15 abril 2022]

Culligan Matrix. (2012). *Ultrafiltración*. Culligan. <[https://www.culligan.es/wp-content/uploads/CL\\_Catalogo\\_Ultrafiltracion\\_2012.pdf](https://www.culligan.es/wp-content/uploads/CL_Catalogo_Ultrafiltracion_2012.pdf)> [consulta: 04 noviembre 2022]

Decreto 40 de 2013. Ministerio del Medio Ambiente. Aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental. 30 de octubre 2012.

Decreto 41 de 2012. Ministerio de Minería. Aprueba reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras. 04 de septiembre 2012.

Decreto 50 de 2015. Ministerio de Obras Públicas. Aprueba reglamento a que se refiere el artículo 295 inciso 2°, del código de aguas, estableciendo las condiciones técnicas que deberían cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el artículo 294 del referido texto legal. 13 de enero 2015.

Decreto Supremo N° 132 de 2004. Ministerio de Minería. Aprueba reglamento de seguridad minera. 30 de diciembre 2002.

Decreto Supremo N° 248 de 2007. Ministerio de Minería. Aprueba el reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. 29 de diciembre 2006.

Dirección General de Aguas. (2015). *Informe de terreno*. Docplayer. <<https://docplayer.es/88783030-Informe-de-terreno-01-de-julio-de-antecedentes-generales.html>> [consulta: 17 julio 2022]

DragFlow Latin America. (2021e). *Bombas para Lodo Eléctricas de Servicio Pesado-264-3168 USgpm / 25-120 HP*. DragFlow pumps. <<https://www.dragflowpumps.com/productos/bombas-para-lodo-electricas/bombas-para-lodo-el%C3%A9ctricas-de-servicio-pesado-264-3168-usgpm>> [consulta: 04 noviembre 2022]

Dragflow Latin America. (2021). *Dragas Dragflow*. Dragflow pumps. <<https://www.dragflowpumps.com/productos/dragas>> [consulta: 17 julio 2022]

Dragflow Latin America. (2021b). *Dragflow: Características de Bombas para lodo: Sumergibles, Construcción Robusta, Rodamientos Axiales*. Dragflow pumps. <<https://www.dragflowpumps.com/bombas-para-dragado-lodo-caracteristicas>> [consulta: 17 julio 2022]

Dragflow Latin America. (2021c). *Dragflow: Dredges - Dragas Anfibias - Serie DRM*. Dragflow Pumps. <<https://www.dragflowpumps.com/productos/dragas/dragas-anfibias-serie-drm>> [consulta: 17 julio 2022]

DragFlow Latin America. (2021f). *Electric pump*. DragFlow pumps. <[https://www.dragflowpumps.com/sites/default/files/el604a-b\\_60hz\\_eng.pdf](https://www.dragflowpumps.com/sites/default/files/el604a-b_60hz_eng.pdf)> [consulta: 04 noviembre 2022]

---

DragFlow Latin America. (2021d). *Pompe Elettriche EL604-EL604S*. Dragflow Pumps. <<https://www.dragflow.it/prodotti/pompe/pompe-elettriche/pompe-elettriche/el604-el604s/>> [consulta: 10 octubre 2022]

Escalante, R. (2017). *Ingeniería de Dragado*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. <[http://www.graduadosportuaria.com.ar/ IngDragado /DRA Tema% 201 Generalidades.pdf](http://www.graduadosportuaria.com.ar/IngDragado/DRA_Tema%201Generalidades.pdf) > [consulta: 1 abril 2022]

Esva. (2021). *Venta de agua a granel*. Esva. <<https://www.esval.cl/empresas/otros-servicios-de-esval/venta-de-agua-a-granel/>> [consulta: 08 noviembre 2022]

Fibras y Normas de Colombia S.A.S. (2020). *La nanofiltración: definición, características, ventajas y desventajas, aplicaciones y usos*. Fibras y normas de Colombia. <<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/la-nanofiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas-aplicaciones-usos/>> [consulta: 30 agosto 2022]

Fibras y Normas de Colombia S.A.S. (2019). *Ultrafiltración: Definición, Características, Ventajas y Desventajas*. Fibras y Normas de Colombia. <<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/ultrafiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas/>> [consulta: 30 agosto 2022]

Ginocchio, R. (2012). Estudio de la tratabilidad de las aguas claras del tranque de relaves Pampa Austral para la diversificación productiva de la comuna de Diego de Almagro. <[https://goreatacama.gob.cl/wp-content/uploads/08-10-2013\\_17-48-07\\_80571857.pdf](https://goreatacama.gob.cl/wp-content/uploads/08-10-2013_17-48-07_80571857.pdf)> [consulta: 16 agosto 2022]

Huada. (2022). *Las ventajas y desventajas de la centrífuga decantadora*. Jiangsu Huada Centrifuge Co.,Ltd. <<https://es.huadacentrifuge.com/news-advantages-and-disadvantages-of-decanter-centrifuge.html>> [consulta: 30 agosto 2022]

Ingeoexpert. (2020). *Tratamientos físicos en las tecnologías de depuración de aguas residuales*. Ingeoexpert. <<https://ingeoexpert.com/articulo/tratamientos-fisicos-las-tecnologias-depuracion-aguas-residuales/>> [consulta: 30 agosto 2022]

Innovación en Geosintéticos y Construcción. (2020). *Tubos de geotextiles: Nuevo Método para Procesar Lodos de Minería*. <<https://igc.com.pe/tubos-de-geotextiles-metodo-procesar-lodos-mineria/> > [consulta: 17 julio 2022]

---

Instituto Nacional de Normalización (2005). NCh 409/1 Of. 2005: Agua Potable – Parte 1 – Requisitos (NCh 409/1). Santiago, Chile: INN.

Instituto Nacional de Normalización (1978). NCh 1333 Of. 1978: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos (NCh 1333). Santiago, Chile: INN.

Kabay N, Köseoğlu P, Yapıcı D, Yüksel Ü, Yüksel M. (2013). Coupling ion exchange with ultrafiltration for boron removal from geothermal water-investigation of process parameters and recycle tests. *Desalination*. Volume 316.17-22. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.01.027>.

Ley 19300. Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. 9 de marzo 1994.

Ley 20551. Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras. Ministerio de Minería. 11 de noviembre 2011.

Ley 20819. Modifica la ley N° 20551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales. Ministerio de Minería. 14 de marzo 2015.

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2015). *Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015*. <[https://www.interior.gob.cl/media/2015/04/recursos\\_hidricos.pdf](https://www.interior.gob.cl/media/2015/04/recursos_hidricos.pdf)> [consulta: 2 mayo 2022]

Ministerio de Minería. (2021). *Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible 2021*. <[https://www.minmineria.cl/media/2021/05/Plan\\_Nacional\\_de\\_Depositos\\_de\\_Relaves\\_para\\_una\\_Mineria\\_Sostenible\\_2021.pdf](https://www.minmineria.cl/media/2021/05/Plan_Nacional_de_Depositos_de_Relaves_para_una_Mineria_Sostenible_2021.pdf)> [consulta: 2 mayo 2022]

Ministerio de Obras Públicas & Dirección General de Aguas. (2016). *Atlas del Agua, Chile*. Dirección General de Aguas. <<https://dga.mop.gob.cl/DGADocumentos/Atlas2016parte1-17marzo2016b.pdf>> [consulta: 19 abril 2022]

Moya, R. (2019). *Gestión Depósitos de Relaves y Aspectos Relevantes*. Sociedad Nacional de Minería. <[https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2019/05/Depositos-de-Relaves-Mineros\\_sonami.pdf](https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2019/05/Depositos-de-Relaves-Mineros_sonami.pdf)> [consulta: 2 mayo 2022]

---

Mud Cat. (2021). *Dragado de barro de barro utilizado en la mina de molibdeno AMAX*. Mud Cat Dredges. <https://www.mudcatdredge.com/es/Draga-de-barro-usado-en-la-mina-de-molibdeno-de-amax/> > [consulta: 17 julio 2022]

Mud Cat. (2021b). *Dragas de minería y equipos de dragado - Dragas de barro para gatos*. Mud Cat Dredges. <<https://www.mudcatdredge.com/es/dragas-mineras/>> [consulta: 17 julio 2022]

Mud Cat. (2022). *Draga de barrena eléctrica con control remoto Mud Cat - Modelo 20E*. Mud Cat Dredges. <<https://www.mudcatdredge.com/es/mc20e/>> [consulta: 17 julio 2022]

Mud Cat. (2022b). *Draga de barrena eléctrica con control remoto Mud Cat - Modelo 20E*. Mud Cat Dredges. <<https://www.mudcatdredge.com/es/mc20e/#uael-gallery-1>> [consulta: 17 julio 2022]

Nexxo S.A. Chile. (2017). *Nexxo Chile*. Nexxo. <[https://www.nexxo.cl/servicios\\_industriales.html](https://www.nexxo.cl/servicios_industriales.html)> [consulta: 17 julio 2022]

Nexxo S.A. Chile. (2017b). *Nexxo Chile*. Nexxo. <<https://www.nexxo.cl/empresa.html>> [consulta: 17 julio 2022]

Nexxo S.A. Chile. (2017). *Nexxo Chile*. Nexxo. <[https://www.nexxo.cl/servicios\\_industriales.html](https://www.nexxo.cl/servicios_industriales.html)> [consulta: 17 julio 2022]

Nexxo S.A. Chile. (2017b). *Nexxo Chile*. Nexxo. <<https://www.nexxo.cl/empresa.html>> [consulta: 17 julio 2022]

ONU-AGUA, Sweden, Swiss Agency for Development and Cooperation SDC, & Ministry of Foreign Affairs of the Netherlands. (2019). *Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua*. UN WATER. <[https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water\\_PolicyBrief\\_Water\\_Climate-Change\\_ES.pdf](https://www.unwater.org/app/uploads/2019/12/UN-Water_PolicyBrief_Water_Climate-Change_ES.pdf)> [consulta: 11 abril 2022]

Ortiz, R. (2018). *Incremento de la recuperación de agua desde los relaves sectorizando el tranque de relaves el Gigante*. Tesis para optar al grado de magister en gestión y dirección de empresas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, 2018. 63p.

- 
- Pump and Slurry. (2021). *Dragado de relaves de mina - Consultoría de dragado y bombeo de lodos. Slurry Pumping and Dredge Consulting.* <
- Puritec. (2019a). *Ultrafiltración. Manantial Water.* <
- Santibáñez, F. (2018). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile.* Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). <
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2008). *Proyecto Minero Puquíos.* <
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2018). *Preguntas frecuentes sobre relaves.* Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). <[76](https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Preguntas-frecuentes-sobre-relaves.pdf > [consulta: 19 abril 2022]</a></p><hr/></div><div data-bbox=)

---

Shamrock. (2007). *Tratamiento de aguas residuales*. Shamrock Environmental Corporation. <[https://members.tripod.com/london\\_job/trabajoseninglaterra/id29.html#:~:text=La%20precipitaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20se%20utiliza,de%20este%20tipo%20de%20tratamiento](https://members.tripod.com/london_job/trabajoseninglaterra/id29.html#:~:text=La%20precipitaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20se%20utiliza,de%20este%20tipo%20de%20tratamiento)> [consulta: 30 agosto 2022]

Simtech Ltda. (2019). *Filtros prensa*. Simtech. <<https://simtech.cl/areas-de-negocios/division-equipamiento/filtros-prensa/>> [consulta: 10 octubre 2022]

SYPYSA. (2022). *Ventajas y desventajas de la osmosis inversa*. SYPYSA. <<https://sypysa.com/blog/osmosis-inversa-ventajas-y-desventajas/>> [consulta: 30 agosto 2022]

Universidad de Barcelona. (2009). *Centrifugación: Fundamentos de la técnica*. Universidad de Barcelona. <[https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/centrifugacio\\_fonament.html#:~:text=La%20centrifugaci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,sometidas%20a%20una%20fuerza%20centr%C3%ADfuga](https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/centrifugacio_fonament.html#:~:text=La%20centrifugaci%C3%B3n%20es%20una%20t%C3%A9cnica,sometidas%20a%20una%20fuerza%20centr%C3%ADfuga)> [consulta: 30 agosto 2022]

Zarza L. (2020). *¿Qué es la ultrafiltración?. Iagua*. <[https://www.iagua.es/respuestas/ques-ultrafiltracion#:~:text=La%20Ultrafiltraci%C3%B3n%20\(UF\)%20es%20un,trav%C3%A9s%20de%20una%20membrana%20semipermeable.](https://www.iagua.es/respuestas/ques-ultrafiltracion#:~:text=La%20Ultrafiltraci%C3%B3n%20(UF)%20es%20un,trav%C3%A9s%20de%20una%20membrana%20semipermeable.)> [consulta: 30 agosto 2022]

Zbinden, A. (2011). *Evaluación del riego con agua clara de relave alta en molibdeno y sulfatos sobre la calidad del suelo y del forraje*. Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Santiago, Chile. Universidad de Chile, 2011. 134p.

## ANEXO

### Anexo 1: Cálculo de flujo volumétrico de diseño conceptual

Se asume que se trata de un fluido incompresible, por lo que la densidad no varía a lo largo del proceso. Es por esta misma razón que se trabajará con los caudales volumétricos.

- Caudal volumétrico de salida de PE1

*caudal que extrae la bomba \* tiempo de operación en un día = cantidad de pulpa extraída*

$$200 \frac{m^3}{h} * 9 \frac{h}{día} = 1800 \frac{m^3}{día}$$

- Caudal volumétrico de Centrífuga Decantadora

*entrada = salida*

*entrada = pulpa extraída de PE1*

$$entrada = 1800 \frac{m^3}{día}$$

*salida = salida de sólidos + salida de líquido resultante*

*salida de sólidos = cantidad de sólidos contenidos en la pulpa de dragado*

*\* eficiencia volumétrica del equipo en la remoción de sólidos*

$$salida de sólidos = (1800 \frac{m^3}{día} * 0,30) * 0,80$$

$$salida de sólidos = 432 \frac{m^3}{día}$$

*salida de líquido resultante = sólidos no removidos + cantidad de líquido contenido en la pulpa de dragado*

$$salida de líquido resultante = 108 \frac{m^3}{día} + (1800 \frac{m^3}{día} * 0,70)$$

$$salida de líquido resultante = 1368 \frac{m^3}{día}$$

- Cálculo de flujo volumétrico de salida en estanque de almacenamiento post proceso de Centrífuga Decantadora

$$\text{entrada} = \text{salida}$$

$$\text{entrada} = 1380 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\therefore \text{salida} = 1380 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

- Cálculo de la mínima cantidad de agua requerida para el funcionamiento de la bomba

$$\text{cantidad mínima de agua requerida para el funcionamiento de la bomba}$$

$$= \pi * \text{nivel mínimo requerido por la bomba}$$

$$* \text{radio de estanque de almacenamiento}^2$$

$$\text{cantidad mínima de agua requerida para funcionamiento de bomba} = 3,14 * 1,055\text{m} * (10\text{m})^2$$

$$\text{cantidad mínima de agua requerida para funcionamiento de bomba} = 332\text{m}^3$$

Cabe destacar que este volumen se aproxima a 400 m<sup>3</sup>.

$$\therefore \text{cantidad mínima de agua requerida para funcionamiento de bomba} = 400\text{m}^3$$

- Cálculo de flujo volumétrico en tecnología de Ultrafiltración

$$\text{entrada} = \text{salida}$$

$$\text{entrada} = 1368 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{salida} = \text{salida de líquido alta en metales} + \text{salida de agua tratada}$$

$$\text{salida de líquido alta en metales} = \text{entrada} * \text{porcentaje} \frac{v}{v} \text{ de rechazo de tecnología}$$

$$\text{salida de líquido alta en metales} = 1368 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 0,25$$

$$\text{salida de líquido alta en metales} = 342 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{salida de agua tratada} = \text{entrada} - \text{salida de líquido alta en metales}$$

$$\text{salida de agua tratada} = 1368 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} - 342 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{salida de agua tratada} = 1026 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

### Anexo 2: Cálculo de módulos necesarios en la tecnología de Ultrafiltración

Según información obtenida el modelo ULF160 posee 16 módulos y el caudal máximo a tratar es de 100 m<sup>3</sup>/h y el caudal de entrada a la tecnología de ultrafiltración es el siguiente:

*caudal de entrada a ultrafiltración \* cantidad de horas de operación en 1 día*

$$1368 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{9 \text{ horas}} = 152 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Para poder saber el número total de módulos se realiza regla de 3.

$$\text{total de módulos a utilizar} = \frac{152 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 16 \text{ módulos}}{100 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$\text{total de módulos a utilizar} = 24,32 \text{ módulos} \approx 25 \text{ módulos}$$

### Anexo 3: Cálculos de flujo de caja

- Periodo 0
  - Tecnologías a implementar

*tecnologías a implementar = costo de envío de las tecnologías + ultrafiltración + 2 \* centrífuga decantadora*

$$\text{tecnologías a implementar} = 8.261 \text{ UF}$$

- Capital de trabajo

$$\text{capital de trabajo} = 1.139 \text{ UF}$$

- Flujo total periodo 0

$$\text{flujo total} = \text{tecnologías a implementar} + \text{capital de trabajo}$$

$$\text{flujo total} = -9.400 \text{ UF}$$

- Periodo 1 al 15 (todos estos periodos consideran los mismos costos e ingresos)
  - Venta del servicio:

$$\text{venta del servicio} = \text{costo por m}^3 \text{ de agua tratada} * \frac{\text{agua tratada}}{\text{día}} * \frac{\text{días de uso de tecnología}}{\text{año}}$$

$$\text{venta del servicio} = 0,05 \text{ UF} * 1026 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 305 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

$$\text{venta del servicio} = 14.261 \text{ UF}$$

➤ **Mano de obra:**

$$\text{mano de obra} = \text{sueldo por operador} * (\text{operadores de ultrafiltración} + \text{operadores de centrífuga decantadora}) * \text{meses del año}$$

$$\text{mano de obra} = 56,96 \text{ UF} * (5 \text{ operadores}) * 12$$

$$\text{mano de obra} = 3418 \text{ UF}$$

➤ **Materiales:**

$$\text{Materiales} = (\text{valor de bombas} + \text{valor de generadores} + \text{valor mangueras} + \text{valor válvulas}) * \text{meses del año}$$

$$\text{Materiales} = 712,05 \text{ UF} * 12$$

$$\text{Materiales} = 8.545 \text{ UF}$$

➤ **Depreciación:**

$$\text{depreciación} = \frac{\text{valor de los equipos a implementar}}{\text{vida útil de las tecnologías}}$$

$$\text{depreciación} = \frac{8.261 \text{ UF}}{15 \text{ años}}$$

$$\text{depreciación} = 551 \text{ UF}$$

➤ **Utilidad antes de impuesto:**

$$\text{utilidad antes de impuesto} = \text{venta del servicio} - (\text{mano de obra} + \text{materiales} + \text{depreciación})$$

$$\text{utilidad antes de impuesto} = 14.261 \text{ UF} - (3.418 \text{ UF} + 8.545 \text{ UF} + 551 \text{ UF})$$

$$\text{utilidad antes de impuesto} = 1.747 \text{ UF}$$

➤ **Impuestos:**

$$\text{impuestos} = \text{utilidad antes de impuesto} * \text{impuesto a la renta de primera categoría}$$

$$\text{impuestos} = 1.747 \text{ UF} * 0,27$$

$$\text{impuestos} = 472 \text{ UF}$$

➤ **Utilidad neta después de impuesto:**

$$\text{utilidad neta después de impuesto} = \text{utilidad antes de impuesto} - \text{impuestos}$$

$$\text{utilidad neta después de impuesto} = 1.747 \text{ UF} - 472 \text{ UF}$$

$$\text{utilidad neta después de impuesto} = 1.275 \text{ UF}$$

➤ **Flujo total periodo 1-15**

$$\text{flujo total} = \text{utilidad neta después de impuesto} + \text{depreciación}$$

$$\text{flujo total} = 1.275 \text{ UF} + 551 \text{ UF}$$

$$\text{flujo total} = 1.826 \text{ UF}$$

## Anexo 4: Curva de rendimiento de la bomba EL604

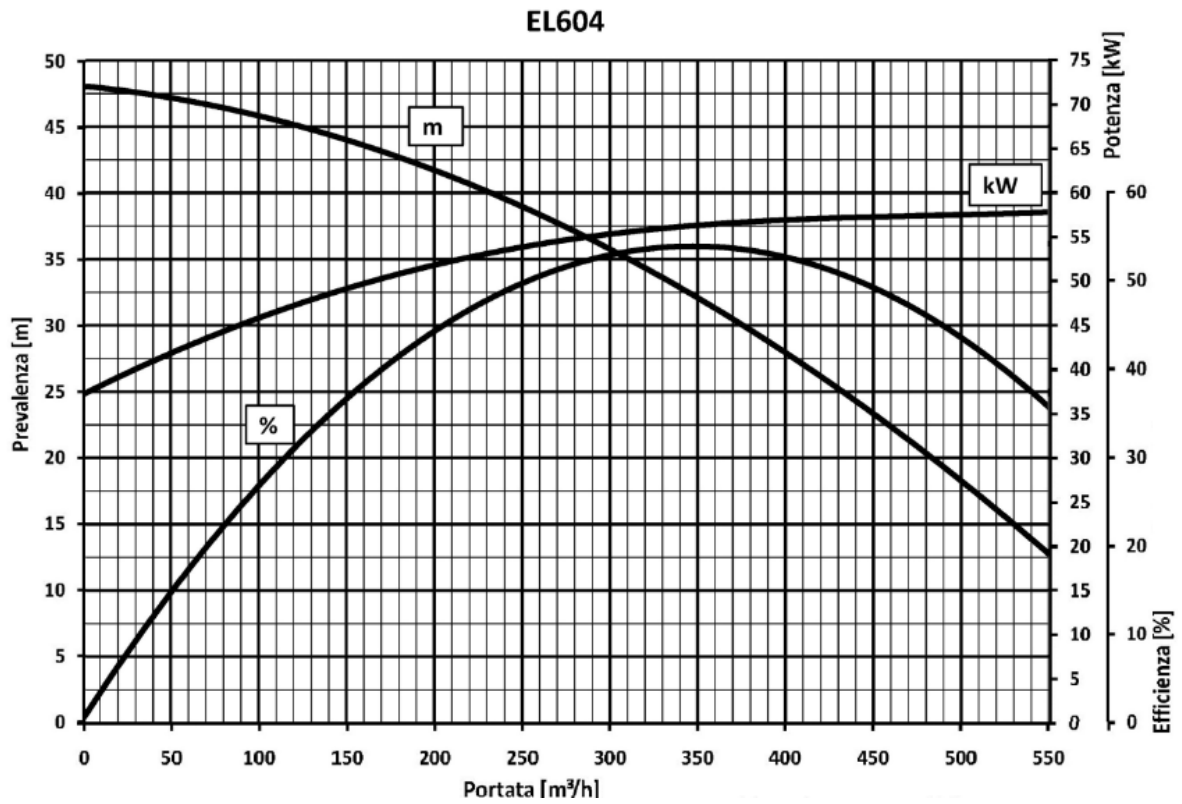


Figura: Curva de rendimiento de la familia EL604. DragFlow Latin America (2021d).