

(Editores)  
Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso

# RECURSOS MINERALES Y MEDIOAMBIENTE: UNA HERENCIA QUE GESTIONAR Y UN FUTURO QUE CONSTRUIR

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020





# UNIVERSIDAD DE OVIEDO

HOMENAJES



Rodrigo Álvarez García  
Almudena Ordóñez Alonso  
(editores)

*Recursos minerales y  
medioambiente: una herencia  
que gestionar y un futuro  
que construir*

LIBRO JUBILAR  
DEL PROFESOR  
JORGE LOREDO



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*

2020



Reconocimiento-No Comercial-Sin Obra Derivada (by-nc-nd): No se permite un uso comercial de la obra original ni la generación de obras derivadas.



Usted es libre de copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, bajo las condiciones siguientes:



Reconocimiento – Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el licenciador:

Álvarez García, Rodrigo; Ordoñez Alonso, Almudena (editores). (2020). *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir. Libro jubilar del profesor Jorge Loredo*. Universidad de Oviedo.

La autoría de cualquier artículo o texto utilizado del libro deberá ser reconocida complementariamente.



No comercial – No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin obras derivadas – No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

© 2020 Universidad de Oviedo

© Los autores

Algunos derechos reservados. Esta obra ha sido editada bajo una licencia Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada 4.0 Internacional de Creative Commons.

Se requiere autorización expresa de los titulares de los derechos para cualquier uso no expresamente previsto en dicha licencia. La ausencia de dicha autorización puede ser constitutiva de delito y está sujeta a responsabilidad.

Consulte las condiciones de la licencia en: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>



Esta Editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional e internacional

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo

Edificio de Servicios - Campus de Humanidades

33011 Oviedo - Asturias

985 10 95 03 / 985 10 59 56

[servipub@uniovi.es](mailto:servipub@uniovi.es)

[www.publicaciones.uniovi.es](http://www.publicaciones.uniovi.es)

ISBN: 978-84-17445-95-9

DL AS 1451-2020



Jorge Loredo Pérez





## Índice

PRÓLOGO .....	13
<i>Santiago García Granda, Rector de la Universidad de Oviedo</i>	

### SEMBLANZA PERSONAL

Bosquejo a vuelapluma de Jorge Loredo Pérez, alumno, colega, colaborador y, sobre todo, amigo entrañable .....	17
<i>J. García-Iglesias.</i>	
Jorge Loredo: un compañero de viaje y un maestro de vida.....	21
<i>N. Roqueñí.</i>	
Casi un cuarto de siglo trabajando con Jorge: una experiencia de vida.	25
<i>A. Ordóñez.</i>	
Jorge Loredo: un gran hombre, un gran científico, un gran maestro y, ante todo, una gran persona.....	29
<i>M. I. Rucandio.</i>	

### ARTÍCULOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

¿Se está gestando una nueva crisis del petróleo?.....	33
<i>I. Álvarez.</i>	
Mineralogía, textura y geoquímica de depósitos minerales y residuos mineros: una herramienta de interés en estudios de contaminación de suelos.....	45
<i>R. Álvarez, J. Álvarez-Quintana y A. Ordóñez</i>	
Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular .....	59
<i>C. Ayora, S. Orden, F. Macías y J. M. Nieto</i>	

Mineralogía magnética aplicada al estudio de los yacimientos; repaso sobre el magnetismo de los minerales y ejemplos de aplicación: el metasomatismo ferrífero de la dolomía encajante de las mineralizaciones Zn-Pb-Ba de La Florida e historia de los «gossans» de la Faja Pirítica Ibérica.....	71
<i>L. Barbanson y M. Essalbi</i>	
Nuevo método de cálculo de recursos y reservas minerales para cuerpos minerales de forma tabular – Aplicación al proyecto Carlés .....	83
<i>C. Castañón, A. Martín-Izard, I. Diego y D. Arias</i>	
Determinación de niveles de fondo y referencia de elementos traza en suelos: un enfoque metodológico avanzado .....	93
<i>E. Chacón, A. Callaba, P. Fernández-Canteli, F. Barrio-Parra, M. Izquierdo-Díaz y E. de Miguel</i>	
Historia de las aguas minerales y termales .....	105
<i>M. M. Corral, M. E. Galindo, J. Á. Díaz, C. Ontiveros y J. M. Fernández.</i>	
Mobility of Thallium and other trace elements in mine drainage waters from two carbonate-hosted Lead-Zinc ore deposits in the northeastern Italian Alps .....	115
<i>S. Covelli, E. Pavoni, N. Barago, F. Floreani, E. Petranich, M. Crosera, G. Adami &amp; D. Lenaz</i>	
Comentarios heterodoxos sobre el cambio climático .....	129
<i>J. R. Fernández</i>	
The INCHaPA project: methodology for the study of historic quarries associated with the architectural heritage.....	141
<i>J. Fernández, E. Álvarez, J. M. Baltuille &amp; J. Martínez</i>	
Metodologías de fraccionamiento secuencial como herramienta útil para la evaluación de la movilidad de mercurio y arsénico y su impacto en la cuenca minera de Asturias .....	153
<i>R. Fernández-Martínez, A. Ordóñez, R. Álvarez e I. Rucandio</i>	
Recursos geotérmicos en Asturias .....	167
<i>C. García de la Noceda</i>	
Análisis de la presencia de mercurio en diferentes compartimentos ambientales del estuario del río Nalón como consecuencia de la minería..	179
<i>E. García-Ordiales, N. Roqueñí, P. Cienfuegos, S. Covelli y L. Sanz-Prada</i>	
Contribución al conocimiento de la geología económica en la cuenca del río Esva.....	193
<i>S. González-Nistal, R. Álvarez y F. Ruíz</i>	

Escombreras asociadas a minería de sulfuros: pasivo ambiental y potencial activo económico desde una perspectiva de minería circular .....	205
<i>J. A. Grande, J. M. Dávila, J. C. Fortes, M. Santisteban, A. M. Sarmiento, F. Córdoba, M. Leiva, M. L. de la Torre, A. Jiménez, J. Díaz-Curiel, B. Biosca, A. T. Luís, N. Durães, E. A. Ferreira da Silva, M. J. Rivera, J. Aroba, B. Carro, J. Borrego y J. A. Morales.</i>	
Mercurio en Almadén – datos recientes (2000-2020) sobre su presencia en el medioambiente y sus implicaciones.....	219
<i>P. L. Higuera, J. M. Esbrí, E. García-Ordiales y J. D. Peco</i>	
Evaluación medioambiental temprana de riesgos a la salud, a la seguridad y al propio medioambiente por proyectos geo-energéticos .....	245
<i>A. Hurtado y S. Eguilior</i>	
European dimension of the social license to operate in mining.....	257
<i>K. Komnitsas</i>	
El cambio climático, las tecnologías limpias y la minería .....	265
<i>J. F. Llamas</i>	
Las aguas subterráneas y los acuíferos: su carácter estratégico en escasez y periodos de sequía.....	277
<i>J. Antonio López-Geta</i>	
Comportamiento del agua de mina en instalaciones geotérmicas: Análisis de un caso particular .....	297
<i>C. Loredó</i>	
Una tecnología para reducir las emisiones: el almacenamiento geológico de CO <sub>2</sub> .....	309
<i>R. Martínez Orío y P. Fernández-Canteli</i>	
Perspectivas sobre reducción de emisiones de mercurio originadas en la producción de energía .....	321
<i>M. R. Martínez Tarazona, M. A. López Antón y R. García</i>	
Almacenamiento de energía térmica y eléctrica en minas subterráneas cerradas: situación actual y balances de energía .....	333
<i>J. Menéndez</i>	
Contribución del yacimiento de Carlés a la mineralogía española .....	345
<i>M. Mesa</i>	
La descarbonización de las industrias minerales en el Principado de Asturias .....	357
<i>A. Olay</i>	

Notas sobre liderazgo .....	367
<i>J. C. Rodríguez-Ovejero</i>	
Viabilidad económica ambiental para la recuperación o reducción del consumo de agua de plantas de procesamiento de oro .....	377
<i>J. Soto, J. Melendez y P. Cienfuegos</i>	
La explotación minera del karst fósil en la sierra del Aramo: del Calcolítico al siglo xx .....	391
<i>M. Suárez</i>	

# **VIABILIDAD ECONÓMICA AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN O REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE ORO**

*Jorge Soto Yen,<sup>1</sup> Jonathan Melendez<sup>2</sup> y Pablo Cienfuegos<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> EP de ingeniería de minas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

<sup>2</sup> Prevconsult Perú

<sup>3</sup> Escuela de ingeniería de minas, energía y materiales, Universidad de Oviedo

## **RESUMEN**

La investigación consiste en analizar y comparar los costos de las inversiones ambientales de los estudios realizados para la recuperación de agua de relaves y su alternativa de almacenamiento del proceso metalúrgico y el estudio de tratamiento de agua de mar por ósmosis inversa para la obtención de agua industrial para el proceso metalúrgico de una planta de beneficio de oro. La planta de beneficio actual se ubica en la región costera semi-árida de Arequipa, aproximadamente a 600 km sureste de Lima, y a 170 km al sur de Nazca.

La planta está diseñada para una ampliación de hasta 600 toneladas por día (tpd) o 204000 toneladas por año (tpa). La tasa actual de producción aprobada por la autoridad competente es de 430 tpd. El factor determinante de la ampliación hasta las 600 tpd es el manejo ambiental de pérdidas de agua principalmente por la evaporación de la pulpa de relaves y los costos actuales de adquisición de agua debido a la poca producción de los pozos autorizados por la autoridad competente para su explotación. Ambos factores deben establecerse para mejorar la viabilidad del incremento en la tasa de producción.

En la actualidad, se está utilizando la disposición convencional de relave en pulpa para las operaciones en curso, lo que ha llevado a la empresa minera a realizar diversos proyectos («Estudio conceptual para desaguado de relaves y alternativas de almacenamiento» y «Estudio de viabilidad de instalación de planta de tratamiento de ósmosis inversa para la producción de agua industrial») con la finalidad de obtener relaves espesados o relaves filtrados o obtener agua dulce a partir de agua de mar mediante una planta de ósmosis inversa. Estos estudios han sido evaluados como alternativas para recuperar

el 85% del agua de los relaves y la obtención de agua fresca industrial para reducir el consumo de agua de pozo, con el fin de contribuir en el balance operacional de agua de la empresa y su estrategia de manejo de relaves a largo plazo. Este análisis ha incluido:

- Recopilación de información de los estudios del manejo de relaves en la empresa del año 2016.
- Comparar los parámetros ambientales.
- Determinar las condiciones físicas y ambientales de las evaluaciones de los estudios conceptuales de recuperación de agua de relaves y aguas tratadas mediante ósmosis inversa.
- Evaluar los costos de inversión de los estudios para determinar la viabilidad económica y ambiental factible para los objetivos de crecimiento de la planta de beneficio.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las operaciones mineras de tratamiento de oro y cobre se ubican al sur del Perú (Nazca y Chala, plantas de cianuración-concentradoras de oro y cobre) y en el norte del Perú (Trujillo y Piura y, en menor medida, en Ancash). Algunas de estas plantas realizan el almacenaje y desecho de relaves en infraestructuras convencionales tales como depósitos de relaves y a su vez tienen problemas ambientales en cuanto a la recuperación de agua y problemas económicos para obtener el recurso hídrico. Las normas ambientales en Perú son cada vez más estrictas y paulatinamente los depósitos de relaves se convertirán quizás en una solución menos atractiva, así como el uso del agua se tornaría más difícil por la misma demanda que es solicitada por la población y las actividades agrícolas principalmente y cada vez se cuestiona más el consumo de agua y desperdicio de la misma.

Las empresas mineras y los consultores han empezado a buscar soluciones y alternativas que impliquen un impacto ambiental mínimo. En algunos casos se propone la implementación de relaves deshidratados (también denominados relaves en seco), pero aún son minoría en proyectos para reducir la explotación de pozos de agua para consumo humano, sobre todo en zonas costeras, como el caso de Chala, en Arequipa (Davies, 2002).

Sin embargo, los últimos avances en tecnologías de filtración han proporcionado proyectos económicamente viables para algunas empresas, pero también se han presentado tecnologías viables para tratamiento de agua de mar a bajo costo mediante el sistema de ósmosis inversa cuya tecnología está disponible.

La evaluación del manejo actual de la planta de beneficio de minerales ha tomado un nuevo rumbo debido a su necesidad de expansión, lo que constituye un caso de estudio ideal para comparar y determinar la viabilidad económica ambiental de recuperar el agua utilizada en el proceso o reducir el consumo de la misma, evitando o reduciendo la explotación de los pozos de agua natural esenciales para el consumo humano, dada la escasez en las zonas costeras sobre todo de Chala, Arequipa donde se ubican aproximadamente 12 plantas de beneficio de oro. Estas 12 plantas tienen un consumo anual de agua en promedio de 1346400 m<sup>3</sup>/año (Soto, 2018), donde solo se recupera, en promedio, un 60%: es decir, quedan por recuperar aproxima-





- d) Aumentar la confianza de la población de Chala en la reducción del consumo de agua de pozo y proporcionar agua para consumo humano desde la planta de ósmosis inversa.
- e) Mejorar la confianza de los inversores para sus aportes de capital en una nueva forma de obtener agua fresca a menor costo.

### **3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Sistema de relaves espesados y filtrados**

La empresa minera MVD (Minera Veta Dorada) solicitó a una consultora internacional el estudio conceptual del sistema de relaves espesados y filtrados que consistió en:

- Realizar pruebas de laboratorio de los relaves de MVD para caracterizar las propiedades físicas y mineralógicas del material, efectuadas por un laboratorio externo.
- Realizar pruebas de floculación y asentamiento diferencial para establecer los criterios de diseño del espesador y su rendimiento nominal.
- Realizar una campaña de pruebas (filtros de Series-CX) en los relaves de MVD para validar/comparar los resultados de las pruebas exploratorias de filtrado efectuadas en la planta Huanca Metalex.
- Desarrollar flujogramas conceptuales para el desaguado de relaves en dos consistencias de pulpa, considerando un rango desde relaves convencionalmente espesados (65% w/w sólidos), a relaves filtrados de (85 % w/w sólidos).
- Estimar los costos de inversión y de operación a un grado de precisión del  $\pm 30\%$  para el método de operación actual.

##### **3.1.1. Programa de Laboratorio**

Los programas de desaguado y caracterización de relaves confirmaron los cambios en el material de relaves proporcionados anteriormente por MVD durante evaluaciones preliminares anteriores efectuadas por la consultora. Los relaves de la planta de MVD fueron analizados y mostraron tener propiedades físicas y químicas diferentes de las producidas por la Planta Metalex (Stokman *et al.*, 2014).

Se efectuaron pruebas de laboratorio usando dos tipos de dosificaciones y dos floculantes (ver fig. 2) para establecer la tasa de asentamiento diferencial, calidad del sobrenadante y máxima compactación del flujo subálveo. Se obtuvo con facilidad un 60% w/w sólidos, pero se deberían efectuar investigaciones adicionales para determinar el porcentaje óptimo.

La consultora confirma la capacidad para obtener una torta de filtro con un 15% w/w de agua residual usando la tecnología de disco al vacío Serie CX. Estas series de pruebas también confirmaron la capacidad de recuperar un filtrado extremadamente claro (14,4 NTU), aplicable para procesos o agua de sello de bomba centrífuga (o «agua de empaquetadura») en la planta.

Considerando una torta de filtro con 15% w/w de agua residual, CECMS midió una carga de torta de diseño de 0,430 t/h/m<sup>2</sup> (ver fig. 2), que se encuentra dentro de las expectativas y rendimientos anteriores comparables

VIABILIDAD ECONÓMICA AMBIENTAL PARA LA RECUPERACIÓN O REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DE PLANTAS DE PROCESAMIENTO DE ORO

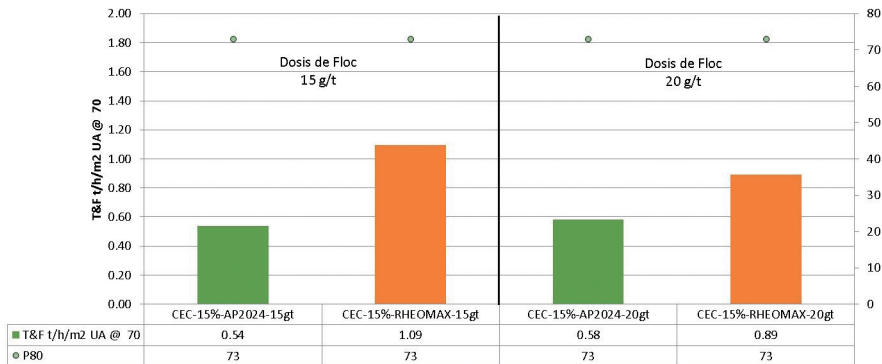


Fig. 2. Tasa de flujo ( $t/m^2h$ ) para diferentes dosis de floculante (CECMS, 2018)

con otras operaciones de relaves de oro CIL/CIP con distribuciones de partículas comparables. A continuación, se indican los controles del proceso necesarios para lograr los criterios de diseño indicados en la tabla 1.

- Membrana de cerámica de 0,75 micras(s)
- Sólidos SG: 2,92.
- TUF: 1,65  $t/m^3$  / 60% sólidos wt.
- Nivel de pulpa de relave: (-)200-mm debajo del eje.
- Tiempo de formación: 10-21 s.
- Tiempo de secado: 16-35 s.
- Tiempo de rotación: 0,92-2 rpm.

Tabla 1. Especificaciones del diseño de filtración (CECMS, 2018).

Productividad	Humedad de la torta de filtración (% de agua)
0,43 $t/h/m^2$	14,90

El equipamiento y el proceso requerido para desaguar los relaves de la empresa MVD no son únicos o sin precedentes. Este tipo de disposición, incluyendo el uso de espesador en conjunción con un sistema de filtrado para desaguar aún más el flujo subálveo en una torta de filtro, ha sido implementado exitosamente en otras plantas de procesamiento.

El diagrama de flujo de proceso propuesto para MVD incluye la capacidad para espesamiento y filtración. La consultora recomienda el diseño y la instalación de una planta de espesamiento y filtrado que permita la suficiente flexibilidad operacional y maximizar la recuperación del agua liberada para su uso en la planta de procesos (tabla 2).

Tabla 2. Criterios de diseño (CECMS, 2018)

	Descripción	Unidades
<b>Información del Proyecto</b>		
<b>Nombre del Proyecto</b>	Minera Veta Dorada	
<b>Ubicación del Proyecto</b>	Chala, Región Arequipa, Perú. 600 Km SE de Lima.	
<b>Definición del Proyecto</b>	Alternativas de Diagramas de Flujo Conceptuales-Desaguado de Relaves	
<b>Vida de Mina</b>	Sin definir - considerar > 10 años	
<b>Condiciones de la Ubicación</b>		
<b>Temperatura ambiental</b>	20	°C
<b>Elevación</b>	< 200	msnm
<b>Zona Sísmica</b>	Zona 4 - Asumida	UBC
<b>Costo de energía</b>	USD 0.13	\$/kwh
<b>Costo Mano de Obra</b>	\$5,6/h. (Costo base); \$10/h. (incluye gastos generales)	US\$/h
<b>Horas por año</b>	365 días x 90% disponibilidad de planta	
<b>Otros</b>	Región árida, poca precipitación; aguas subterráneas salobres	
<b>Datos del Material</b>		
<b>Descripción del material de alimentación</b>	Relaves CIL de Oro	
<b>Sólidos SG</b>	2,92	
<b>Líquidos SG</b>	1.0	
<b>Temperatura de Pulpa</b>	20 a 25	°C
<b>Alimentación</b>	10,5	
<b>pH de Pulpa</b>		
<b>Distribución de Tamaño de Partículas (Granulometría)</b>		
<b>P80</b>	7335	Micras
<b>P50</b>	16	Micras
<b>% w/w &lt; 25 micrones</b>		% w/w
<b>Data de Diseño del Diagrama de Flujo</b>		
<b>Tasa de Alimentación de sólidos ROM</b>	360 tpd, actual; 430 tpd, expansión	Tpd
<b>Horas de Operación Efectivas</b>	24 horas al día; 90% disponibilidad de planta	
<b>Sólidos en los relaves (nominal)</b>	15	Tph
<b>Sólidos en los relaves (proyecto)</b>	16,7 (para 90% de disponibilidad de la planta [15 tph x 24h o 16, 7x21,6--360])	Tph
<b>Relaves % w/w Sol. (Actual)</b>	25 - asumido	w/w
<b>Relaves % w/w Sol. (Objetivo)</b>	65% Espesado, Asumido - 85% Filtro - Asumido	w/w
<b>Otros</b>		
<b>Límite de Batería</b>		
<b>Alimentación</b>	Descarga de la bomba del sumidero de relaves del circuito CIL.	
<b>Productos - Sólidos</b>	Punto de descarga del sistema de desaguado como las bombas de flujo subálveo o de fajas transportadoras de descarga cortas o chutes de descarga	
<b>Productos - Líquidos</b>	Descarga de agua clara (filtrado/sobrenadante) a canal/tanque de aguas de procesos (por el Propietario) cerca al área de desaguado de relaves.	
<b>Servicios</b>	Servicios (energía/agua/aire de instrumentación) serán suministrados hasta el perímetro de la planta de procesos.	

### 3.1.3. Estimaciones de Costos de Capital y Operativos

Los costos de capital («CapEx») y de operación («OpEx») se han estimado de acuerdo con la capacidad de la planta de espesado y filtrado basada en un diagrama de flujo capaz procesar 360 tpd de relaves espesados hasta un 65% w/w de sólidos y relaves filtrados hasta un 85% w/w de sólidos.

El CapEx asociado con el diagrama de flujo que incluye la planta de espesado y la planta de filtrado fue estimado en 1,22M US\$ para la planta de espesado y 1,38M US\$ para la planta de filtrado, obteniéndose un costo total de capital de 2,60M US\$ (ver tablas 3 y 4).

El OpEx calculado se ha estableciendo en un total de 1510 US\$ por tonelada (incluyendo el espesado) para la planta de desaguado integrada.

Tabla 3. Resumen de costos de capital (CECMS, 2018)

Descripción	Detalle de equipo	Cant.	Potencia Instalada kW	Costo Capital (US\$x1000)
<b>Planta espesador</b>	Líneas de alimentación + Conexiones Planta complementaria de - Floculante ( <i>Make-up</i> ) Espesador de alta densidad de 8 m + Tanque de bombas de descarga de flujo subálveo	1	17 Inc. s/by	920
<b>Líneas de Pulpa de Relaves</b>	Tanque de relaves y bombas para desechos VFD, Instrumentos y controles 620 m de Sistema de distribución de relaves Surtidores ( <i>spigots</i> ) y válvulas	1	18 Inc. s/by	300
<b>Planta de filtrado</b>	Filtro CX-Series 1 x 50 m <sup>2</sup> Accesorios y Banda Transportadora Plataforma de Planta de Cemento Sistema de Entubado, Instrumentos y controles	1	34	1,38
TOTAL			<b>69</b>	<b>2,605</b>

Tabla 4. Resumen de costos operativos (CECMS, 2018)

OpEX DE LA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE RELAVES	US\$/t Relaves	0,53	1,51
<b>OpEX DEL ESPESADOR y RELAVES</b>	US\$/t Relaves	0,53	0,52
<b>OpEX DEL FILTRO DE CERAMICA - VACIO</b>	US\$/t Relaves		0,99

### 3.2. Sistema de desalinización de agua

La empresa minera MVD solicitó a una consultora peruana el estudio económico ambiental para la implementación de un sistema a base de ósmosis inversa para la potabilización de agua de mar extraída de un pozo playero produciendo un caudal de 300 m<sup>3</sup>/día (250 m<sup>3</sup> requeridos en 20 horas de trabajo) que consistió en:

- Diseñar una planta desalinizadora para una capacidad de 250 m<sup>3</sup>/día en 20 horas de operación. (capacidad nominal de 300 m<sup>3</sup> en 24 horas), tratar el agua de mar que proviene de un pozo playero y convertir en agua potable para proceso y consumo humano.
- Realizar el estudio del emisario submarino, trámites y autorizaciones del vertido del agua de rechazo ante la Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- Diseñar la línea de impulsión agua tratada a la planta de MVD que requiere de un sistema de bombeo de agua tratada a 5 km de la mina e incluye tuberías, bomba de impulsión y obras civiles.
- Gestionar las autorizaciones del vertido de agua de rechazo proveniente de la planta desalinizadora ante el ANA.
- Estimar los costos de inversión y de operación de la planta de tratamiento de agua de mar.

### 3.2.1. Características del proyecto

El agua cruda se bombearía con un equipo sumergible (fabricado en acero especial SS904 altamente resistente al agua de mar) a través de filtros de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio para retener sólidos suspendidos hasta de 18 micras y posteriormente, a través de cartuchos intercambiables de 5 micras. Esto asegura una larga vida a las membranas, válvulas motorizadas, equipo de bombeo, recipientes de presión y membranas, que son los más resistentes y de larga vida útil en el mercado mundial para la desalinización.

Tabla 5. Características técnicas del agua del pozo playero

Consideraciones y valores estándar de agua de mar	
Agua fuente	Pozo playero
TDS	38000 ppm
Dureza	2000 a 5000 ppm
Conductividad	39000 $\mu\text{s}/\text{cm}$
pH	7-9
Temperatura	18 °C
<b>A tratarse de un pozo playero el agua de mar contiene baja turbidez y metales totales</b>	
Capacidad de cada tren	300 m <sup>3</sup> /día (24 horas) 250 m <sup>3</sup> /20 horas
Calidad del Producto	180 ppm con 3 años de vida de las membranas
Recuperación	40% con tres años de vida de las membranas
Energía eléctrica tablero	440 V (3 fases + neutro + tierra física)
Flujo máximo del sistema membrana	10,45 lmh

### 3.2.2. Desarrollo del proyecto

El proyecto se diseña con las siguientes características:

#### a) Pozo playero y estudio hidrogeológico

Definir la mejor ubicación del pozo playero basándose en un estudio hidrogeológico para determinar el nivel del agua, caudal a explotar, calidad del agua, información que deberá estar de acuerdo al inventariado de pozos existentes establecidos por la autoridad nacional del agua. La perforación del pozo playero es del tipo tubular mixto para una profundidad estimada de 50 m para la explotación del agua de mar; el procedimiento comprende movilización y desmovilización del equipamiento adecuado de perforación, la tubería ciega, filtros, grava, desarrollo del pozo y prueba de aforo.

#### b) Planta desalinizadora de 250 m<sup>3</sup>/h

La planta desalinizadora deberá cumplir con el tratamiento de agua de mar mediante ósmosis inversa, cuya fuente es de pozo playero, de acuerdo al caudal de 250 m<sup>3</sup>/ día. El proceso requiere de un pretratamiento y un posttratamiento.

- **Pretratamiento.** El pretratamiento consiste en un sistema de pre-bombeo de pozo, un tanque de almacenamiento, sistemas de filtros, bomba de alta presión, recuperador de energía, tren de membranas de ósmosis inversa y sistema de auto *flushing*, lavado de membranas, instrumentación y centro de control de motores.
- **Posttratamiento.** El posttratamiento detalla de un sistema de dosificación de reactivos, tanque de almacenamiento de agua tratada, arranque y capacitación operación del sistema y servicios.

*c) Sistema de Bombeo de agua tratada a 5 km a la mina*

El sistema de impulsión del agua requiere el lanzamiento de tuberías a lo largo de 5 km, bomba de impulsión y la ejecución de obras civiles de excavación para instalar las tuberías.

*d) Estudio completo de emisario submarino y permisos*

Todo el sistema de la planta de desalinización requiere la realización de estudios ambientales de acuerdo a la normativa legal de las entidades gubernamentales, así como estudios de ingeniería, trámites y coordinaciones y las autorizaciones del vertido de agua de rechazo proveniente de la planta desalinizadora.

### 3.2.3. Estimados de Costos de Capital y Operativos

En las tablas 6 y 7 se muestran los costes de capital y los costes operativos estimados por la compañía INAGUA Perú, SAC.

*Tabla 6. Resumen de costos de capital (INAGUA Perú SAC, 2018)*

Descripción	Detalle de equipo	Cant.	Costo Capital US\$x1000
<b>Pozo playero</b>	El estudio hidrogeológico y Tramites ante el ANA	1	8,50
	Pozo playero	1	29,80
<b>Planta de tratamiento</b>	Pretratamiento Post tratamiento	1	379,10
<b>Sistema de bombeo de 5 km a la mina</b>	Tubería Bomba de impulsión Obras civiles	1	85,35
<b>Estudio de emisor submarino</b>	Ingeniería Trámites	1	75,50
<b>Otras autorizaciones</b>	Vertido de agua de rechazo	1	13,68
	Instrumento de gestión ambiental	1	80,00
<b>TOTAL</b>			<b>671,93</b>

*Tabla 7. Resumen de costos operativos (INAGUA Perú SAC, 2018)*

Descripción	Detalle de equipo	Cant.	Costo Capital US\$x1000
<b>Planta de tratamiento</b>	Tiempo de vida de membranas 3 años	US\$/t	0,05
	Cambio de 15 pz membrana cada 3 años US\$ 19500		
<b>Costo consumo Agua</b>	Costo por metro cubico de agua US\$ 0,88 m <sup>3</sup>	Relaves	0,88
<b>Costo de mantenimiento</b>	Mantenimiento de la planta US\$ 10500 por año		0,07
<b>Costo químicos</b>	Materiales químicos US\$ 6800		0,05
<b>TOTAL</b>			<b>1,05</b>

#### 4. ANALISIS FINANCIERO Y VIABILIDAD DEL PROYECTO

El análisis financiero se desarrollará para un horizonte de vida de la operación de la planta de diez años con la finalidad de comparar los dos proyectos y determinar la mejor viabilidad económica ambiental de la recuperación de agua del proceso o disminuir el consumo de agua fresca de los pozos autorizados. En la tabla 8 se presentan los costos por compra de agua en 10 años donde la planta de filtrado, que recupera el 85% del agua, tendría un diferencial de reposición de 110,79 m<sup>3</sup> a un costo total de 1139508 US\$, mientras que para la planta desalinizadora, que aporta 250 m<sup>3</sup>/d, el diferencial de reposición asciende a 45,43 m<sup>3</sup>/d a un costo total de 467259 US\$. Ambos proyectos se pagan dentro de los 10 primeros años, dado que la operación actual tiene un costo por reposición de agua de 3038688 US\$, mientras que la inversión para una planta de filtrado asciende a 2605000 US\$, y para la planta desalinizadora es de 671930 US\$.

Tabla 8. Costos comparados por requerimiento de agua para 10 años

Detalle del Proyecto	Consumo m <sup>3</sup> /d	Recuperación m <sup>3</sup> /d	Reposición m <sup>3</sup> /d	Agua US\$/m <sup>3</sup>	Costo US\$/día	Costo agua en 10 años
<b>Operación actual Recuperación 60%</b>	<b>738,57</b>	<b>443,14</b>	<b>295,43</b>	<b>2,86</b>	<b>844,08</b>	<b>3038688</b>
Planta de filtrado Recuperación 85%	738,57	627,78	110,79	2,86	316,53	1139508
Planta desalinizadora producción 250 m <sup>3</sup> /d	738,57	443,14	295,43	2,86	129,79*	467259

\* Costo US\$/día (295,43-250) x 2.86.

Para una operación de 360 tpd y un horizonte de 10 años, la planta desalinizadora es más viable económicamente que la planta de espesado y filtrado (ver tabla 9).

Tabla 9. Inversión por proyecto

Detalle del Proyecto	CapEX US\$	OpEX US\$/t	OpEX 10 años US\$	Costo total C+O en 10 años
Planta de filtrado (Recuperación 85%)	2605000	1,51	1956960	4561960
Planta desalinizadora (Producción 250 m <sup>3</sup> /d)	671930	1,05	1360800	2032730

En la tabla 10, manteniendo los mismos parámetros de inversión, resulta más beneficiosa la operación de la planta desalinizadora, mientras que para una operación de 600 tpd la mejor rentabilidad sería la de la planta de espesado y filtrado.

Tabla 10. Costos por requerimiento de agua por toneladas por día

Detalle del Proyecto	360 tpd	432 tpd	600 tpd
Planta de filtrado (Recuperación 85%)	1139508	1367681	1899180
Planta desalinizadora (Producción 250 m <sup>3</sup> /d)	467259	1075721	2493051

## 5. ANALISIS AMBIENTAL

La ventaja económica al implementar una planta desalinizadora es muy atractiva; sin embargo, no es suficiente para ofrecer una recomendación final. El gasto de capital inicial y los gastos de funcionamiento son una importante consideración para establecer un presupuesto, pero también es importante considerar diferentes implicaciones asociadas a riesgos socio-ambientales, costos de recuperación y cierre de la mina.

### 5.1. Riesgos socio-ambientales

En el Perú, los conflictos socio-ambientales están muy ligados a los proyectos mineros. Estos conflictos representan un 69% de un total de 184 proyectos (Defensoría del pueblo, 2019). Por esta razón es posible que la población sea reacia a la instalación de una planta desalinizadora por una empresa minera y habría que establecer estrategias que facilitasen su aprobación, como por ejemplo facilitar un volumen adecuado de agua (m<sup>3</sup>/día) a la población.

La planta desalinizadora implica mantener un depósito de relaves convencional (asociado a un espacio físico y riesgos de estabilidad y sísmicos), suficiente para la vida de la operación de la planta. Por el contrario, la construcción de la planta de espesado y filtrado representa menos responsabilidad ambiental debido a las características propias de un relave seco (Keesey, 2007). A largo plazo, la planta desalinizadora puede ser ampliada sin mayores contratiempos y bajos costos.

### 5.2. Beneficios futuros

La planta desalinizadora facilita muchos beneficios cuantificables derivados del tratamiento del agua de mar por ósmosis inversa; sin embargo, hay otros beneficios, intangibles, que tienen mucho valor e importancia. Se realiza una mejora en la reducción de consumo de agua de pozo para compensar el consumo de agua de la población. También hay beneficio cuando se realiza una solicitud de permisos diferidos para ampliaciones de la planta desalinizadora y mayor flexibilidad operacional.

#### 5.2.1. Contribución a la comunidad

Uno de los beneficios cuantificables de una planta desalinizadora es el de reducir el consumo de agua potable de los pozos y proveer de agua potable a la población de Chala, Arequipa.



### 5.2.2. Aprobaciones Regulatorias

Las aprobaciones regulatorias para este tipo de proyectos de plantas desalinizadoras son más factibles siempre y cuando la planta sea propiedad de un tercero que brinde los servicios a la empresa minera y, a su vez, apoye a la comunidad con facilitar agua potable.

### 5.2.3. Confianza

La implementación de una planta desalinizadora puede tener un impacto positivo para la población porque la empresa minera reduciría drásticamente el consumo de agua de pozo. Asimismo, los inversores y accionistas que mantienen una huella ambiental pueden ver reflejado su impacto positivo en el precio de la acción de la compañía.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación sobre la viabilidad económica para reducir el consumo de agua potable de pozo mediante la producción de agua a partir de una planta desalinizadora ha demostrado que implementar este tipo de plantas genera beneficios económicos y ambientales en la empresa minera y a la población de Chala. Por una parte, se detallan los costos de implementar una planta desalinizadora comparado con los costos que demanda una planta de espesado y filtrado. El análisis demuestra que al considerar una operación a 360 tpd y 432 tpd, la planta desalinizadora tiene una clara ventaja económica; pero estos beneficios se pierden cuando la operación alcance las 600 tpd, manteniendo la planta desalinizadora al ritmo de producción de 250 m<sup>3</sup>/d. Si esta producción se incrementa al doble de su capacidad, los beneficios seguirán manteniéndose por encima de la planta de espesamiento y filtrado.

## AGRADECIMIENTOS

Quizás mis palabras de agradecimiento queden cortas por el inmenso apoyo recibido de una gran persona, profesor y asesor de mi tesis doctoral.

*¡Sí, a ti mi estimado Jorge!, a quien siempre estaré eternamente agradecido por darme esa confianza de que las cosas se pueden lograr con esfuerzo y dedicación y consejos que han hecho de mí una mejor persona en lo profesional y familiar. Recordaré siempre esas palabras de aliento ¡vamos bien, sigue adelante! Y aquella frase que daba mucha tranquilidad: «Si hoy no se puede, será para mañana» y ese mañana para mí, se ha concretado en el hoy, porque logré mis objetivos... ¡Gracias, querido profesor Jorge Loredó!*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CECMS, 2018. *Estudio conceptual para desaguado de relaves y alternativas de almacenamiento para Minera Veta Dorada, Planta de oro*. Informe interno inédito.
- Davies, M. P., 2002. Tailings Impoundment Failures: Are Geotechnical Engineers Listening? *Geotechnical News*, 20: 31-36

- INAGUA Perú SAC, 2018. *Planta desalinizadora 250 m<sup>3</sup>/día – Minera Veta Dorada*. Informe técnico inédito.
- Defensoría del Pueblo, 2019. Disponible online: <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2020/01/Conflictos-Sociales-N%C2%B0-190-diciembre-2019.pdf>.
- Keesey, T.S., 2007. *Minto Mine, Tailings Management Plan*. Informe inédito para el Department of Energy, Mines & Resources, Yukon, 14 p.
- Soto, J., 2018. Recuperación de agua mediante sistema de filtros termoplásticos y disposición de relaves en seco: beneficios ambientales y económicos. *Minería*, 490: 59-65.
- Stokman, C., Soto, J., González, D., 2014. Peruvian gold-cyanide tailings filtration -a detailed cost comparison. *Paste 2014* (9-12): 1-14.