



## ANEXO 2: Informes en detalle de los investigadores



Elaborado por:

**Gestión Ambiental Consultores S.A.**

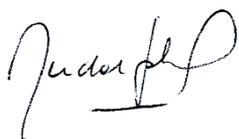
Padre Mariano 103 of. 307, Providencia

Fono: +56 2 2719 5600

[www.gac.cl](http://www.gac.cl)

**COMENTARIOS SOBRE EL  
INFORME FIPA 2015-11  
“ESTUDIO DE LAS REACCIONES  
PRODUCIDAS EN SEDIMENTOS Y  
COLUMNA DE AGUA POR DESCARGAS  
MINERAS QUE AFECTEN LOS RECURSOS  
HIDROBIOLÓGICOS MARINOS”**

Elaborado por:



Anny Rudolph Geisse  
Mg en Ciencias mención Oceanografía  
Investigador Asociado Facultad de Ciencias  
Universidad Católica Santísima Concepción



Ramón Ahumada Bermúdez  
Doctor en Ciencias Ambientales  
Investigador Asociado Facultad Ciencias  
Universidad Católica Santísima Concepción

Fecha: 04 de mayo de 2017



## INDICE GENERAL

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Objetivo .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Antecedentes.....</b>	<b>3</b>
3.1	Descarga de Relaves en Huasco.....	3
<b>4</b>	<b>Análisis Crítico .....</b>	<b>4</b>
4.1	Comentarios Generales.....	5
4.2	Comentarios Particulares.....	8
<b>5</b>	<b>Conclusiones del Análisis del Informe.....</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografía citada .....</b>	<b>14</b>

**INDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Puntos de descarga de Relave en Ensenada de Chapaco (1994-2015) ..... 4

## **1 INTRODUCCIÓN**

A solicitud de la Empresa CAP Minería se revisan los resultados presentados en el Informe final del Proyecto FIPA 2015-11 denominado: “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos” elaborado por la empresa SUMIRCO (Sustainable Mining Reseach & Consulting E.I.R.L.). Dicho proyecto fue adjudicado en el año 2015, a la empresa SUMIRCO por la suma de \$100.650.004, a través del Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura (FIPA), de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA), dependiente del Ministerio de Economía Fomento y Turismo del Gobierno de Chile.

El Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura (FIPA) fue creado por la Ley General de Pesca y Acuicultura en 1991 y está destinado a financiar estudios necesarios para fundamentar la adopción de medidas de administración de las pesquerías y de las actividades de acuicultura. Estas medidas de administración tienen por objetivo la conservación de los recursos hidrobiológicos, considerando tanto aspectos biológicos, pesqueros, económicos y sociales (Cuenta pública del Fondo de Investigación Pesquera y de Acuicultura, 2015).

## **2 OBJETIVO**

El objetivo principal del presente informe es analizar el Informe final del Proyecto FIPA 2015-11 denominado: “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos”

## **3 ANTECEDENTES**

### **3.1 Descarga de Relaves en Huasco**

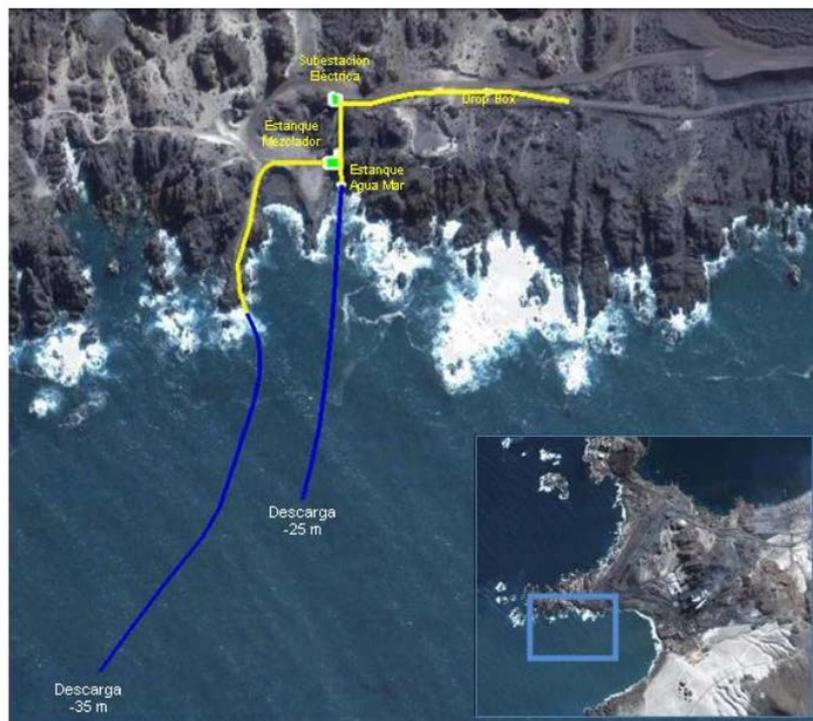
La Planta de Pellets opera en la Ensenada Chapaco desde el año 1978. Hoy día representa el único punto de vertido de relaves en medio marino en las costas chilenas. La planta genera 4000 toneladas diarias de relave, con un 45% de material sólido. El material sale de la planta a una temperatura de unos 36°C, y se mezcla con agua de mar, en una proporción 1:1, para ser enfriado, y para que no obture el colector o relaveducto.

Durante los años 1978-1994, la Planta de Pellets depositó sus relaves directamente en la zona intermareal, generando turbidez en la bahía. A principios de 1994 comenzó a operar un sistema de depositación submarina de relaves en la misma zona, que consistía en una descarga gravitacional a través de una tubería terrestre, un estanque mezclador-desaireador, además de una tubería submarina que permitía verter el relave a unos 25 m de profundidad (Figura 2-1). Con esto, se eliminó la turbidez en la bahía. Se puso en marcha el Programa de Vigilancia Ambiental, que permitió fiscalizar la recuperación de los ecosistemas intermareales y submareales en un plazo de 2 a 3 años. En el año 2000, CAP sometió al SEIA un proyecto de complementación de las actividades de la Planta de Pellets de Huasco (“Mejoramiento Tecnológico para la Producción de Concentrados de Hierro”). Uno de los componentes evaluados, fue un nuevo

relaveducto. Se incluyó un Plan Específico de Monitoreo, que consistió en la continuidad del Plan de Vigilancia Ambiental anteriormente mencionado. En el año 2004, entró en operación la primera actualización de la descarga impulsada mediante bombeo a unos 35 m de profundidad (Figura 2-1), y a una distancia a 350 m de la costa, en dirección S. Con el proyecto EIA “Actualización del Sistema de Depositación de Relaves en Planta de Pellets”, sometido al SEIA en el año 2013, se propuso la implementación de un nuevo sistema de depositación de relaves a más de 200 m de profundidad, en un ambiente marino profundo (“Deep Sea Tailings Placement”, DSTP en adelante). La nueva zona de descarga de relaves estaría situada a más de 6.000 m de la línea de la costa, con profundidades que van desde los 200 a los 800 m. La depositación se realizaría mediante 2 relaveductos de 6.600 m de longitud, y tendrían una vida útil de 50 años.

De los estudios establecidos por CAP, considerando las variables oceanográficas, este constituiría un sitio de almacenamiento apto para la formación de un depósito en pendiente con corrientes de baja intensidad, buen control de la re-suspensión de sólidos, y alejado de la zona fótica.

**Figura 1. Puntos de descarga de Relave en Ensenada de Chapaco (1994-2015)**



Fuente: CAP, 2016

## 4 ANÁLISIS CRÍTICO

Este apartado incluye la visión crítica de los autores desagregado de la siguiente manera:

- Comentarios Generales sobre Informe Final
- Comentarios en lo Particular

## 4.1 Comentarios Generales

1.1. Respecto de lo declarado en el título del Proyecto: “*Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos*”, del análisis de los resultados de los contenidos del informe se desprende que no hay correlación entre lo declarado en el título del Proyecto FIPA 2015-11 y lo realizado en el Proyecto, dado que: el trabajo experimental que se realizó en el proyecto fue estrictamente de laboratorio, con supuestos que distan de la realidad. El Informe indica que se analizó en el laboratorio, el efecto de una bacteria, *Shewanella loihica*, sobre diversas muestras de minerales, monominerales y sólo una muestra de relave.

La bacteria utilizada en el estudio, *Shewanella loihica* (DSMZ 17748) fue adquirida de la colección alemana de microorganismos y cultivos celulares (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen, DSMZ). Es una gammaproteobacteria de la familia Shewanellaceae, capaz de realizar la reducción de óxidos de hierro acoplada a la oxidación de compuestos orgánicos simples. Fue aislada desde esteras microbianas ricas en hierro, en un hidrotermal activo a 1.325 m bajo el nivel del mar, en Seamount, Hawai. Dado sus especiales características se utiliza en biorremediación de metales y desechos radiactivos (<http://www.soest.hawaii.edu/GG/HCV/loihivents.html>; Klein, 1982).

1.2. No se utilizó sedimentos marinos costeros. Se utilizó como medio para la reacción agua pura (SUPRAPUR®) y agua de mar sintética. No se utilizó agua de mar del área, a pesar que en el proyecto se especifica: “.....reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras.....”. Dado que el agua de mar es una matriz compleja, la metodología elegida para el estudio, hace que los resultados presenten baja representatividad respecto de los objetivos del estudio.

1.3. De las muestras seleccionadas para este estudio, la mayoría fueron mono-minerales o minerales y sólo una correspondió a una muestra de “descarga minera” (relave CAP). En el Informe no se especifica porque se eligió esta forma de trabajo, siendo que disminuye la representatividad de la información resultante del estudio de laboratorio.

1.4. Siguiendo con lo indicado en el título “.....*que afecten los recursos hidrobiológicos marinos*”, no se realizó estudios del efecto de los relaves sobre especies marinas como se deduce de lo indicado en el informe. De hecho, no hay estudios, ni se planificó estudios de ecotoxicidad. Por citar algunos, bioensayos de toxicidad, ni estudios con marcadores o estudios con especies bioindicadoras, tampoco estudios de contenidos de metales en tejidos con especies marinas litorales, éstos últimos, son la base para evaluar bioacumulación y el posible riesgo a la salud.

1.5. Respecto de los objetivos:

Objetivo general. Evaluar las reacciones que ocurren en sedimentos y columna de agua, por descarga de relaves mineros de distinto origen y que afecten la biota acuática marina, especialmente a los recursos hidrobiológicos y pesqueros. Para el logro del objetivo general, se indican 4 objetivos específicos o de trabajo.

Como primer objetivo de trabajo se indica: “Realizar una recopilación bibliográfica de determinadas descargas de relaves mineros que afectan al medio marino”.

Comentario: Llama la atención que en (p.13) participantes por actividad, se indica que en esta actividad participaron “Curso SUBPESCA”.

1.6. El segundo objetivo de trabajo indica: **“Proponer un diseño experimental en laboratorio que considere ensayos de determinados tipos de descargas de relaves mineros y bajo diferentes condiciones de los sedimentos del medio marino (como % MOT, potencial redox (Eh), granulometría)”**.

*Comentario:* El trabajo realizado consistió en analizar en el laboratorio, en condiciones de anoxia (“caja de guantes y N<sub>2(gas)</sub>”) el efecto de una bacteria, la *Shewanella loihica*, sobre diversas muestras de minerales y sólo una muestra de relave, a 10 y 20°C, utilizando como medio agua pura y agua de mar sintética. No tiene relación con lo indicado en el objetivo. No hubo ensayos con sedimentos marinos, no hay registros de potencial redox en los sedimentos, ni de las mediciones de MOT comprometida.

1.7. El tercer objetivo específico indica: **“Aplicar el diseño experimental propuesto, analizando los componentes que son liberados a la columna de agua y sedimentos marinos, desde las descargas analizadas”**.

*Comentario:* No se cumplió con el objetivo específico 2; ya que no se ejecutó “el diseño experimental con distintos tipos de relaves y bajo diferentes condiciones de los sedimentos del medio marino (como % MOT, potencial redox (Eh), granulometría), por lo que tampoco pudo ser implementado el objetivo específico 3: “,... analizando los componentes que son liberados a la columna de agua y sedimentos marinos”

1.8. En el cuarto objetivo de trabajo se declara: **“Evaluar la especiación y biodisponibilidad de los componentes liberados al medio, tanto en agua como en sedimentos”**.

*Comentario:* No fue desarrollado experimentalmente y se entrega escasa y una no especializada revisión bibliográfica, tanto en biodisponibilidad como en la especiación y en general sobre el ambiente marino en la zona. Se hacen presunciones generales, lo que resulta falso y poco riguroso. Por ejemplo, se habla de ambiente anóxico, asumiendo que las aguas del “mínimo de oxígeno” (AESS) fueran anóxicas. Estas aguas se reconocen como aguas con concentraciones menores a 1 mlO<sub>2</sub>L<sup>-1</sup> y en su núcleo alcanzan a tener 0,2 ml O<sub>2</sub>L<sup>-1</sup>, es decir son subóxicas (Brandhorst,1971; Silva & Konow, 1975; Ahumada *et al.*, 1983; Ahumada *et al.*, 1984; Rojas & Silva, 1996; Silva *et al.*, 2008). Esto en términos que, en las condiciones de reacción química el oxígeno es un actor importante. Además, en la columna de agua no se consideró otros compuestos que se reducen antes que el Fe, como por ejemplo nitratos y nitritos. Las aguas que presentan un acercamiento a la zona costera es una situación temporal, no es permanente, sólo en eventos de surgencia. Respecto de los sedimentos, si se puede generar un ambiente anóxico en la medida que se incrementa la depositación de material orgánico. En condiciones de anoxia si ocurre una reducción del Fe<sup>3+</sup> a Fe<sup>2+</sup> y se solubiliza. Sin embargo, al alcanzar los estratos con oxígeno el Fe<sup>2+</sup> se oxidaría nuevamente y se depositaría en el sedimento (Li *et al.*, (2009).

1.9. El Informe presenta deficiencias en la metodología de trabajo. El estudio en la forma que está planteado es un trabajo de investigación y se esperaría que presente la rigurosidad y detalle de un trabajo que debe regirse por el método científico.

La primera objeción importante se refiere a que se realizó un experimento de reducción desasimilativa de compuestos de hierro fuera de contexto. Es decir, a través de un experimento de laboratorio, con agua pura y agua de mar sintética, utilizando muestras de monominerales de hierro catalizados por una bacteria con características muy especiales, cuyo origen fueron las chimeneas hidrotermales (Kein (1982); Hansel *et al.*, (2003); Hansel *et al.*, (2011); Toner (2012), adquirida en Alemania, que se comercializa para uso en

remediación de zonas contaminadas. Esto invalida cualquier intento del uso de los resultados para su interpretación en un escenario natural.

1.10. El trabajo de muestreo presenta falta de rigurosidad, la puede ser ejemplificada en lo siguiente: Respecto de la toma y selección de las muestras se indica; (p.21) “*Muestras de mano de los yacimientos suecos Kiruna (K1), Malmberget (M1) y del cinturón de óxidos de hierro de Chile (Tbl 01, V10, V6, mf-6-c y COL)*”.

*Comentario:* “*Muestras de mano*”, no se indica en que consiste la metodología utilizada. Del mismo modo, del informe se deduce que se tomó sólo una muestra de dichos yacimientos lo que no es representativo del comportamiento geológico de un mineral.

Otra forma de toma de muestra fue, textual “*Asimismo, en Julio de 2016 “se consiguió” una muestra del yacimiento de Los Colorados (resumen ejecutivo, 2do párrafo).*

Conseguir no es un procedimiento científico reproducible. Cabe señalar que el Proyecto (Sr. Dold su coordinador) no solicitó formalmente la toma de muestra del yacimiento Los Colorados y se desconoce de dónde y cómo se obtuvo la muestra (no hay informado un Protocolo de muestreo). Por otro lado, la mineralización de hierro en dicho yacimiento, tiene 3 tipos: macizo, brechoso y diseminado, cada una de los cuales tiene su particularidad desde el punto de vista mineraloquímico.

1.11. No se especifica cantidad de muestra recolectada, ni las condiciones, si son muestras almacenadas, por cuanto tiempo, no se especifican posibles mecanismos de conservación, ni las condiciones, lo que impide obtener la trazabilidad de las muestras.

1.12. No se indica número de réplicas (falta desviación estándar al trabajar más de un dato). La mayor parte de los análisis del estudio son cualitativos y en los trabajos cuantitativos relevantes no se muestra el error analítico de la información obtenida. Los valores se dan preferentemente como valores enteros a pesar que se indica un número de réplicas determinado.

1.13. No se indica los análisis estadísticos aplicados para validar los resultados.

Dado que todo trabajo científico debe realizarse con al menos 3 réplicas, los resultados deben indicarse con sus respectivas desviaciones estándares (muestra y 3 réplicas, 4 resultados) y el análisis estadístico, condición imprescindible para visualizar si los resultados del proyecto son significativos. Sumado a que las concentraciones de hierro total en agua son muy bajas. Tampoco se adjuntan los certificados de laboratorio de los ensayos.

1.14. Los experimentos se realizaron en un ambiente anóxico (la unidad de experimentación de define como: caja de guantes, con atmósfera de nitrógeno). No se indica cómo se controló el potencial redox (Eh), ni otras variables tan significativas y que influyen en un ambiente reductor como: pH, T°, presión total, presiones parciales, etc., variables significativas para caracterizar un ambiente reductor.

1.15. En metodología se debió especificar la relación o limitaciones que existen entre una muestra que se analiza a nivel del mar (condiciones de laboratorio), con lo que sucede “in situ” a más de 200 m o en los 800 m de profundidad como se plantea en el trabajo.

1.16. Se indica reiteradamente en el informe: “...depósito de los relaves de la planta de pellets de óxidos de hierro (principalmente hematita y magnetita o CAP magnetita)”. Esto es una afirmación incorrecta, induce al lector a aceptar una premisa errónea, que los relaves estarían compuestos principalmente de óxidos de hierro (magnetita y hematita). Se ha documentado que: “cinco minerales constituyen más del 70 % de la fase sólida de los relaves, y son clinocloro, pargasita potásica, actinolita, ferrita de magnesio, anortita y el grupo de los silicatos constituyen la clase más abundante (GEOCRONOS, 2014, Knipping *et al.*, 2015).

1.17. Respecto de la revisión bibliográfica sobre la magnetita se cita en el Informe:

(p.46). Experimentos de meteorización electroquímicos en ambiente anóxico de magnetita han sugerido por modelación, tiempos de residencia de granos de magnetita de tamaño arena de 107 años a pH 7 (cita).

(P 47). La cinética de la disolución reductiva de magnetita se estimó en la Ría de Vigo, España, siendo ésta dependiente del aporte de materia orgánica (vida media de 50-1000 a).

*Comentarios:* La información confirma que la magnetita en ambientes sedimentarios es muy estable Se podría citar otros trabajos científicos que lo confirman como los siguientes:

- Roberts A.P. (2015). Estudió el comportamiento de los minerales magnéticos durante la diagénesis, concluyendo que la magnetita es muy estable.

- Li *et al.*, (2009). Quienes establecieron que en los sedimentos existe una precipitación de magnetita por reducción bacteriana, la que se agrega a la fase detrítica.

- Kirschvink J.L & R. Chang (1984). Quienes estudiaron muestras de sedimentos profundos y encontraron que además de magnetita detrítica, existía magnetita formada por la acción bacteriana.

GEOCRONOS, 2014, Knipping *et al.*, 2015. Estudios que muestran que el contenido de magnetita-hematita en el relave se encuentra entre un 2,61 y 7,07 % , contenidos que no son diferentes a los que presentan las rocas ígneas características de la zona y de los sedimentos que llegan al mar.

1.18. El trabajo experimental se realizó en un laboratorio de España, sin que se explique la razón de porque no se realizó en Chile.

1.19. Respecto del grupo de expertos incluidos en el Informe, la forma que está planteado en el proyecto, da a entender que se reuniría un equipo de expertos nacionales e internacionales para prestar apoyo adicional al proyecto, haciendo especial hincapié en la búsqueda de expertos en oceanografía y ecotoxicología marina.

*Comentario:* Sólo se agrega en el informe una lista de expertos y no queda claro cuál fue su objetivo.

## 4.2 Comentarios Particulares

2.1.- Se indica en el Informe: “el experimento 4.4.1 con *Shewanella loihica* se modificó a raíz de la caracterización de la muestras de relaves CAP, que mostraron una relativamente baja concentración de óxidos de hierro”.

*Comentario:* Esta modificación realizada al experimento al utilizar las muestras de relave CAP ratifica lo informado por la Empresa CAP-Minería, respecto del bajo contenido de metales de los relaves que son depositados en el fondo marino, pero no se incluye en la discusión de los resultados del proyecto.

2.2. La muestra analizada y que correspondería a los relaves de CAP, se identifica y analiza en el proyecto como “CAP (magnetita)” por procesos de redisolución reductiva catalizados por la presencia de la bacteria *Shewanella loihica*, ésta muestra presentaría liberaciones de Fe del orden de 600 ug/L (0,6 partes por millón). Es decir, la liberación de Fe desde la muestra identificada como relaves CAP correspondería a órdenes de magnitud menor que el mineral de magnetita analizado en el estudio i.e., 4.000 ug/L (4 partes por millón) y que los ensayos realizados con monominerales de Fe analizados, por citar algunos: hematita 14.000 ug/L (14 partes por millón) o ferrihidrita 80.000 ug/L (80 partes por millón) (gráfico 20, pág. 56).

*Comentario:* Estos resultados confirman el bajo contenido de metales de los relaves de la empresa CAP Minería que son depositados en el fondo marino, pero no se utiliza en la discusión de los resultados del proyecto.

2.3. (p.38) El Informe dice textual: “*En la propuesta original del proyecto se indicaba la utilización de acetato como fuente de materia orgánica para los experimentos bióticos, no obstante, la revisión de la literatura sobre la ecofisiología de Shewanella loihica mostró el lactato como una fuente de materia orgánica más eficiente para la reducción de los óxidos de hierro*”. A continuación se indica “*Se testearon ambas fuentes (lactato y acetato) con un cultivo bacteriano, comprobando una mayor eficiencia del lactato sobre el acetato. Además, el uso de lactato permite evaluar la actividad bacteriana vía la producción de acetato*”.

*Comentario:* No se entrega en el informe antecedentes de dicha comprobación. La comprobación experimental es fundamental dado que el trabajo de laboratorio se sustenta en la estequiometría de la siguiente ecuación:

( p. 57). Ecuación base:  $\text{Lactato}^- + 4\text{Fe(III)} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Acetato}^- + \text{HCO}_3^- + 4\text{Fe(II)} + 5\text{H}^+$

Si la bacteria *Shewanella loihica* consume como fuente de materia orgánica o aportadora de electrones Lactato (reactante) y Acetato (producto), se invalida la ecuación base que sustenta el experimento realizado en esta investigación.

2.4. (p.51). *Informe indica textual: “En la propuesta original del proyecto se indicaba la realización de un test con la bacteria Shewanella loihica, junto con magnetita y sin fuente de carbono (Exp. 4.4.1). “Este experimento se modificó a raíz de la caracterización de las muestras de relave CAP, que mostraron una relativamente baja concentración de óxidos de hierro en contraposición a la concentración de materia orgánica existente en el ambiente marino”.*

*Comentario.* Esta afirmación ratifica la baja concentración de hierro de los relaves de CAP. En efecto, tal como se ha señalado en el informes de GEOCRONOS y GEA de la Universidad de Concepción, los relaves de CAP Minería están constituidos por minerales del grupo silicatos (anfíboles, feldspatos y clorita), y los óxidos de hierro son un constituyente menor (4 - 7%) Además, se debe indicar el rol que cumpliría la materia orgánica con: “...a la concentración de materia orgánica existente en el ambiente marino”.

2.5. (p.51). En el Informe se indica: “*Por tanto, los tests se realizaron (en el laboratorio) con fuente de carbono, pero sin aceptor de electrones, para comprobar así la supervivencia de la bacteria en el fondo marino a la espera de otro aporte de relaves*”.

*Comentario:* No se entrega antecedentes que avalen la afirmación.

2.6. (p.51). En el Informe se indica respecto de la Fig. 16: Curva de recuento de bacterias vs tiempo. “*Los resultados obtenidos mostraron una supervivencia bacteriana de hasta dos meses sin presencia de aceptor de electrones en el medio....*”

Comentario: Para que una afirmación como la anterior sea válida y el trabajo sea científicamente válido y reproducible, se debe especificar rigurosamente las condiciones en que se realizó el ensayo de laboratorio, número de réplicas, desviación estándar de los resultados, los que para su representación se deben indicar en gráficos como puntos, con sus respectivas desviaciones estándares. Nada de eso se observa en los gráficos de resultados en las figuras: 20, 21 y 22.

2.7. Se indica “*Una mayor supervivencia de un microorganismo en condiciones adversas como las de este test, indica una mayor capacidad de colonización de nuevos nichos ecológicos. Esto conlleva una mayor facilidad de adherirse la superficie de un mineral y su posterior utilización como aceptor terminal de electrones*”.

Comentario: No entrega antecedentes que avalen las afirmaciones.

2.8. (p. 59, Figura 21). La falta de rigurosidad del trabajo que dio lugar al Informe FIP 2015-11 queda una vez más ratificada en la siguiente afirmación: “*Experimentos realizados sólo con algunas muestras*”. Un estudio robusto debe explicar claramente las muestras elegidas y los criterios para su selección.

2.9. En la parte final de la pág. 57 del Informe se indica textual: “*Como se observa también en la Figura 20 y 21, todos los experimentos bióticos con los diferentes sólidos muestran concentraciones de Fe muy superiores a las alcanzadas en los experimentos abióticos y en los controles sin inóculo microbiano*”.

Comentario: Esta afirmación confirma que, para que se produzca la liberación de hierro (por “disolución reductiva”), desde los minerales y en la muestra de relave en los 120 días en que se condujo el experimento, se requiere de la presencia de la bacteria *Shewanella loihica* en un medio de cultivo muy especial (Medio MD1 especificado en Informe pág. 33 y 34) y en condiciones especiales de temperatura. Proceso que no se observa en ausencia de la bacteria o “*condiciones abióticas y en los controles sin inóculo microbiano*”, ratificando la nula disolución de los óxidos férricos sin presencia de *Shawenella loihica*, situación cercana a las condiciones reales o “*in situ*”. Situación que nuevamente no se indica en las conclusiones del Informe.

2.10. En el Informe págs. 60 y 61, figura 21, para explicar el comportamiento de la muestra “relaves CAP (10°C)” se indica: “*La concentración de Fe en solución muestra (lo correcto sería: debería mostrar) valores similares a los del acetato, de acuerdo con la estequiometría de la reacción. No obstante, para algunas muestras (por ejemplo: CAP, magnetita) los valores de concentración de Fe son inferiores a los del acetato. Este hecho podría explicarse por la precipitación del Fe(II) disuelto en forma de carbonatos de hierro (p. ej., siderita) y/o por procesos de sorpción o coprecipitación a hidróxidos de hierro secundarios*”

Comentario: no hay referencias bibliográficas que avalen la afirmación.

2.11. Respecto de la modelación realizada en el informe p.66. se indica “*para la calibración del modelo se han utilizado las “Leyes cinéticas obtenidas” en los experimentos bióticos de laboratorio*”.

**Comentario:** *No es posible llegar a formular leyes cinéticas de un experimento de laboratorio con las características del realizado. Se trata de un trabajo científico.....Puede referirse como parámetros o variables consideradas en el trabajo de laboratorio....*

2.12. Se indica “Se utiliza magnetita como única fase mineral del sedimento con la composición química de las muestras de CAP, conteniendo hasta 1 % de crisola”.

**Comentario:** La forma en que se seleccionó la muestra para el estudio induce a confusión. La muestra que debería utilizarse para la modelación sería una muestra de relave, no de un mono-mineral como la magnetita.

2.13. Los anexos 13.4 y Tabla A9 con la información, no está incluida en el Informe. Además, en la Tabla 4 se incluyen reacciones primarias y formulaciones cinéticas, pero no se indica las condiciones de las reacciones. Nada se indica respecto si las constantes y/o ecuaciones indicadas en la tabla, son válidas en condiciones marinas. El grado de estabilidad termodinámica de las fases metálicas, depende de las condiciones ambientales: presión, temperatura, fugacidad de oxígeno y CO<sub>2</sub>, entre otros. Se está modelando para un ambiente marino con 200 y más metros de profundidad. Además, nada se indica respecto de la modelación a 800 m, que se comprometió en el proyecto.

2.14. No se especifican las técnicas o información de terreno con que fueron calibradas las aproximaciones utilizadas en el modelo.

2.15. Del modelo se desprenden distintos escenarios que predecirían la disolución reductiva de los relaves al ser depositados en el mar.

En un primer escenario, considera magnetita como sedimento y utiliza la velocidad de disolución reductiva encontrada en los experimentos de laboratorio, *el Fe liberado en la disolución de la magnetita sería de 194 g Fe/día, el cual difundiría “significativamente” a través del sedimento hacia la columna de agua y además, añade “el incremento de concentración de Fe en la columna de agua es inapreciable.....”* (pág.72).

**Comentario:** no se realizó pruebas estadísticas que avalen esta afirmación. Los resultados de acuerdo al Informe, estarían mostrando un inapreciable incremento en la concentración de Fe en la columna de agua, situación que no se indica como primer escenario en las conclusiones del Informe.

En el segundo y tercer escenarios, donde *“se añade la precipitación de siderita y sulfato reducción y, por lo tanto, precipitación de sulfuro de Fe, la concentración de Fe liberada al agua es (sería) pequeñas de sólo 13 g Fe/día, estimándose en 50 años una liberación de sólo 0,24 t de Fe”*.

**Comentario:** No se especifican los procesos que se consideraron relevantes y cuáles no, en el proceso modelado, dicho de otro modo, de los distintos escenarios analizados cuales serían factibles y cuáles serían las limitaciones de cada uno.

2.16. Se indica además, que en todos los escenarios se liberaría arsénico (As) en pequeña proporción 1,5 mg/día, indicando que es tóxico (pág. 77).

**Comentario:** No se indica si la forma química en que se liberaría es estable, ya que ingresaría a un polielectrolito como el agua de mar. A éste respecto, existen dos publicaciones en revistas científicas sobre la composición geoquímica de magnetitas provenientes de yacimientos de hierro chilenos: Nyström

y Henríquez (1994) y Knipping *et al.* (2015). Los autores estudiaron texturas y composición geoquímica de los yacimientos de la Franja Cretácica Chilena, El Laco y Kirunavaara en Suecia, con el objetivo de establecer su posible origen genético. En lo relativo a los contenidos de metales en las magnetitas de la Franja Cretácica los autores indican que *no detectaron presencia de Pb, As ni Hg*.

2.17. (p.80). Se indica “*El Fe es considerado principalmente como nutriente limitante en algunas zonas de los océanos (Dold et al., 2013), aunque algunos autores postulan que el estrés oxidativo del Fe(II) podría representar una cierta toxicidad (Swanner et al., 2015).*”

**Comentario:** La cita “**Swanner et al., 2015**” es errónea o no corresponde, ya que en el trabajo se indica “*Aquí probamos la hipótesis de que el afloramiento de agua rica en anhídrido Fe (II) en la zona fótica, durante el último Arqueano, sometió a bacterias fototróficas oxigenadas a la toxicidad de Fe (II).*”

2.18. En el informe (pag. 81). Se indica: “**Los datos de nuestro estudio, así como los del estudio de la interfase sedimento - columna agua del mar de la Dra. Práxedes Muñoz (presentado en 1era Adenda), han mostrado que se puede producir un flujo de elementos (principalmente Fe, Mn, Cu y elementos traza) desde el sedimento hacia la columna de agua, dando como resultado su alta biodisponibilidad en condiciones sin sulfato reducción.**”

**Comentarios:** No se indica en el informe que se haya trabajado con sedimentos marinos, no es posible comparar con los resultados observados en la interfase sedimento - columna agua del mar informados por la Dra. Práxedes Muñoz. Aunque se aceptara como correcta la afirmación realizada en el Informe, sería imprescindible que se entregaran valores sobre velocidad y cantidad en que son liberados estos iones.

A éste respecto, se han realizado estudios sobre la posible toxicidad de los relaves CAP, con una batería de especies marinas, a través de ensayos estandarizados de toxicidad, los que demuestran que el contacto con el relave de gametos, microalgas y juveniles de organismos pertenecientes a distintos niveles tróficos, no serían afectados, a saber, ensayos de fecundación de gametos de *arbacia spatuligera*, crecimiento de la microalga *Dunaliella tertiolecta*, supervivencia ni capacidad de construir guaridas de juveniles del anfípodo *Monocorophium insidiosum*, ni la supervivencia de juveniles del crustáceo bentónico *Emerita análoga*, ni la supervivencia ni la capacidad de adherirse al sustrato de *Aulacomia ater* y por último, en un periodo de 30 días de exposición a elutriados (agua de poro), no afecta el crecimiento de los alevines de *Odonthestes regia* (pejerreyes), cuantificado cada uno de los ensayos respecto de un grupo control en condiciones normales. (Información certificada por el Laboratorio de Bioensayos de la Universidad de Concepción).

2.19. Respecto de las recomendaciones indicadas en el informe.

2.19.1. La recomendación 2: “*Con estas muestras debidamente caracterizadas, se debería realizar tests de disolución reductiva y de oxidación utilizando bacterias autóctonas del lugar de vertido. Esto permitiría simular y evaluar la respuesta y cinéticas de las muestras a cambios geoquímicos en el ambiente marino del lugar.*”

**Comentario:** Los trabajos que se desarrollan en laboratorio no permiten recrear las condiciones “*in situ*” y sería largo incluso para un laboratorio especializado tratar de aislar, caracterizar e identificar con el ADN de cada uno, los componentes del pool normal de bacterias existentes en el medio natural. Una aproximación a ello, con el agua de poro, fue realizado por la Dra. P. Muñoz, el cual se cita en este informe, sacado de contexto respecto de sus conclusiones.

Por otra parte, como una aproximación al problema la Ecotoxicología plantea que más que conocer las cantidades y/o velocidades en que entran al sistema las posibles «sustancias tóxicas», debe preocupar el evaluar el nivel de toxicidad que se genera en el área, realizando estudios de toxicidad, que pueden llevarse a cabo poniendo en contacto organismos con los sedimentos y/o elutriados del área posiblemente impactada o haciendo el seguimiento del comportamiento (por Ej. concentración de metales en organismos), a través del uso de biomarcadores u otros.

2.19.2. La recomendación 6. “...el lugar más seguro para la ubicación de los relaves de un yacimiento de tipo óxidos de hierro es en un ambiente oxidante sobre tierra (tranque de relaves con impermeabilización basal). En estas condiciones, los óxidos de hierro serán estables y no liberarán elementos trazas al medio ambiente”.

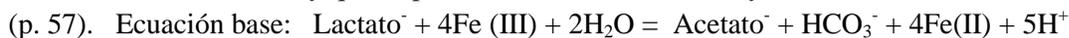
**Comentario:** El comentario es extemporáneo. Es una recomendación antojadiza ya que no tiene sustento en el contexto del informe realizado. Además, es imposible hacer un escalamiento de un ensayo en laboratorio a lo que se produce en la realidad. Si bien puede orientar, se deben considerar todas las variables que intervienen en el sistema estudiado, tema que no es resuelto con las pruebas realizadas en el citado Informe. CAP Minería ha estado vertiendo relaves desde 1978 y ha presentado planes de mejoramiento de su disposición de relaves el año 1988 y año 2010.

## 5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DEL INFORME

3.1. Hay aspectos que son difíciles de entender de la lectura de los resultados de un proyecto de investigación que se realiza a petición de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA), dependiente del Ministerio de Economía Fomento y Turismo del Gobierno de Chile y que debe tener evaluadores.

3.1.1. Se indica que no se dispone de muestras representativas, así que se utilizó muestras mono-minerales y minerales de diversos orígenes. Las muestras mono-minerales, si bien pueden aportar información de referencia, no son representativas del estado termodinámico de las fases minerales que presentan los relaves.

3.1.2. La ecuación base que describe el comportamiento del proceso de sulfato reducción realizada por la bacteria *Shewanella loihica* y que se plantea como clave en el Proyecto:



En el Informe se indica: “Se testearon ambas fuentes (lactato y acetato) con un cultivo bacteriano, “comprobando” una mayor eficiencia del lactato sobre el acetato. Si la bacteria *Shewanella loihica* consume como fuente de materia orgánica o aportadora de electrones Lactato (reactante) y Acetato (producto) como se indica en el Informe, no es válida la ecuación base que sustenta el experimento.

3.1.3. No se realizó la caracterización del medio marino (desde un punto de vista físico, químico ni biológico) en que se realizaría el vertimiento de relaves, condición necesaria para definir las variables marinas y bacteriológicas requeridas para implementar el modelo conceptual y validar los cálculos numéricos, situación que no sería reemplazable por una revisión bibliográfica.

3.1.4. Se hace hincapié en la problemática que podría representar la bioacumulación de metales liberados desde los relaves, pero no se realizan trabajos experimentales y se reemplaza por citas bibliográficas de trabajos realizados en el tema. Aun así, no se especifica los aportes de cada uno de los trabajos a la problemática analizada.

3.1.5. Dada las deficiencias en contenido y forma en la ejecución de proyecto: “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos”, su bajo respaldo de carácter científico y escasa respuesta a los objetivos planteados. Además, al no validar en terreno las variables consideradas en la modelación, que lo llevan a proponer escenarios y recomendaciones, hace que el trabajo realizado adolezca de la rigurosidad que se espera de este tipo de estudios, por lo que no constituye una contraparte válida para la evaluación ambiental de una descarga de relaves submarino de minería de hierro o similares.

3.1.6. Los resultados obtenidos en este proyecto debieran ser evaluados por especialistas, para evitar las inconsistencias entre los planteamientos y el desarrollo de la idea previo a su aprobación. Es muy grave que este tipo de “proyecto científico” pretenda ser utilizado para el desarrollo de políticas ambientales marinas. De hecho en el proyecto se menciona un listado de científicos chilenos a los cuales se podría enviar para su evaluación u otros investigadores que se han dedicado al estudio de los sedimentos en Chile (Dr. Juan Carlos Castilla; Profesor Nelson Silva; Dr. Juan Correa; Dr. F. Henríquez).

## 6 BIBLIOGRAFÍA CITADA

Ahumada R., Rudolph A. & Martínez V. 1983. Circulation and fertility of waters in Concepción Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science 16: 95-105.

Ahumada R., Morales R., Rudolph A., Matrai P. 1984. Efectos del afloramiento costero en la diagénesis temprana de los sedimentos en la Bahía de Concepción, Chile. Bol. Soc. Biol. oncepción, Chile 55: 135-146.

Brandhorst, W. 1971. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. Rev. Biol. Mar., 14(3): 45-84.

Brandy M. Toner, Thelma S. Berquó, F. Marc Michel, Jeffrey V. Sorensen, Alexis S. Templeton and Katrina J. Edwards. 2012. Mineralogy of iron microbial mats from Loihi Seamount. Front. Microbiol., 02 April 2012 | <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00118>

FEMO Iron Microbial Observatory. Home Page. <https://earthref.org/FEMO/loihi.htm>

Hansel, C. M., Benner, S. G., Neiss, J., Dohnalkova, A., Kukkadapu, R. K., and Fendorf, S. (2003). Secondary mineralization pathways induced by dissimilatory iron reduction of ferrihydrite under advective flow. Geochim. Cosmochim. Acta 67, 2977–2992.

- Hansel, C. M., Learman, D. R., Lentini, C. J., and Ekstrom, E. B. (2011). Effect of adsorbed and substituted Al on Fe(II)-induced mineralization pathways of ferrihydrite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 4653–4666.
- GEOCRONOS. 2014. Estudio Mineralógico y Mineraloquímico” efectuado por Geocronos para CAP Minería.
- Haichun G., A. Obraztova, N. Steward, R. Popa, J.K. Fredrikson, J. M. Tiedje, K.H. Nealson & J. Zhou. 2006. *Shewanella Loihica* isolated from iron rich microbial mats in the Pacific Ocean. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 56:1911-1916.
- Klein, F. W. (1982). Earthquakes at Loihi submarine volcano and the Hawaiian hot spot. *J. Geophys. Res.* 87, 7719–7726.
- Kirschvink J. L. & Chang S. R. 1984. Ultrafine-grained magnetite in deep sea sediments: Possible bacterial magnetofossils. *Geology* 12: 559-562.
- Knipping J. L., Bilenker L. D., S. A. C., Reich M, Barra F., Deditius A. P., Wälle M., Heinrich C. A., Holtz F., Munizaga R. 2015. Trace elements in magnetite from massive iron oxide-apatite deposits indicate a combined formation by igneous and magmatic-hydrothermal processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 171:15–3.
- Li Y.L., Pfiffner S. M., Dyar M. D., Vali H., Konhauser K., Cole D.R., Rondinone S.A. J. & Phelps T. J. 2009. Degeneration of biogenic superparamagnetic magnetite. *Geobiology* 7: 25–34.
- Nyström J. O. & Henríquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kirunatype in Chile and Sweden: ore textures and magnetite geochemistry. *Econ. Geol.* 89:820–839.
- Roberts A. P. 2015. Magnetic mineral diagenesis, *Earth-Science Reviews* 151: 1–47.
- Rojas, R. & N. Silva. 1996. Atlas Oceanográfico, Vol. 1 (18° 21' S a 50° 00' S), Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso, Chile.
- Silva N, N. Rojas, A. Fedele. 2008. Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56 (16): 1004-1020.
- Silva, N. & D. Konow. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Sudoriental. Expedición Krill. Crucero 3-4 Julio-agosto 1974. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur*, 3:63-75.

# Peer Review

**Informe Final “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos”. Proyecto FIP 2015-11**

**Rev. A**

**Informe Preparado para**

**Compañía Minera del Pacífico S.A**



**Informe Preparado por**



SRK Consulting (Chile) S.A.  
07-2632-16  
Mayo, 2017

# Peer Review

**Informe Final “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos”. Proyecto FIP 2015-11**

**Rev. A**

## **Compañía Minera del Pacífico S.A**

**P. P. Muñoz 675, La Serena, Chile.**

**SRK Consulting (Chile) S.A.**

Av. Vitacura 2939, Piso 5

Las Condes - Santiago

Chile

e-mail: [santiago@srk.cl](mailto:santiago@srk.cl)

website: [www.latam.srk.com](http://www.latam.srk.com)

Tel: +(56-2) 2489 0800

Fax: +(56-2) 2489 0801

**Número Proyecto SRK 07-2362-16**

**Mayo, 2017**

**Elaborado por:**

J. Salas  
Geoquímico Sénior del Área de  
Geoquímica

**Email:** [REDACTED]

**Autores:**

J. Salas.

**Revisado por:**

M. Curotto  
Jefe Área Geoquímica y Cierre de  
Minas

## Resumen Ejecutivo

El presente documento es una revisión de pares solicitada por CAP a SRK Consulting del proyecto “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos”, presentado por SUMIRCO en colaboración con el CIMNE como respuesta a la licitación ID 4728-81-LP18 del proyecto FIP 2015-11. Se han analizado los aspectos técnicos aplicados en las metodologías analíticas y numéricas desarrolladas para la evaluación de los impactos que la DSTP de los relaves procedentes de la Planta de Pellets que CAP tiene en el sector litoral de la provincia del Huasco podría tener sobre la biota marina local. Se ha concluido que, con independencia de las incorrecciones cometidas en la ejecución de los análisis de laboratorio, y la simplicidad y la poca representatividad de los modelos numéricos, los resultados obtenidos en el marco del proyecto no pueden considerarse como representativos de los procesos que se han querido simular. Esto es consecuencia de (1) la baja representatividad del material ensayado con respecto a los relaves presentes y futuros, y (2) la no inclusión en los ensayos y los modelos de la caracterización específica del medio marino en la zona de los potenciales vertidos. En este sentido, los resultados obtenidos no pueden considerarse como referencia para la evaluación medioambiental del proyecto que CAP presentó a la Autoridad para actualizar el sistema de deposición de relaves de la Planta de Pellets.

# Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Síntesis del Informe del Proyecto</b>	<b>5</b>
3.1	Objetivos y Estructura del Estudio	5
3.2	Muestras Utilizadas y Caracterización Mineralógica y Geoquímica	5
3.3	Revisión Bibliográfica	6
3.4	Ensayos Analíticos. Metodología y Resultados	6
3.5	Modelos Numéricos y Evaluación de Impactos	7
3.6	Conclusiones	8
<b>4</b>	<b>Análisis Crítico del Proyecto Desarrollado por SUMIRCO</b>	<b>10</b>
4.1	Comentarios Generales	10
4.2	Metodología Analítica	12
4.3	Cálculos Numéricos del Transporte Reactivo	15
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Referencias</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>CV del Equipo Revisor</b>	<b>24</b>

## Lista de Tablas

Tabla 3-1.	Especies Acuáticas Dominantes en los Escenarios Modelizados	8
Tabla 4-1.	Modelo Conceptual Geoquímico Implementado en los Cálculos	18

## Lista de Figuras

Figura 2-1.	Puntos Descarga Relave en Ensenada Chapaco (1994-2015). Fuente: CAP (2016)	3
Figura 4-1.	Modelo Conceptual Implementado en los Cálculos	17

# 1 Introducción

Compañía Minera del Pacífico (en adelante CAP) ha solicitado a SRK Consulting (Chile) la revisión de pares del informe del Proyecto “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos”, realizado por la empresa “Sustainable Mining Research & Consultancy EIRL” (SUMIRCO en adelante), en colaboración con el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE en adelante).

En marzo de 2017, SRK Consulting entregó a CAP la revisión de la propuesta técnica correspondiente al citado proyecto, realizada en respuesta a la licitación ID 4728-81-LP18 del proyecto FIP 2015-11 (Fondo de Investigación Pesquera 2015-11). Esta propuesta fue presentada en junio de 2015 por el Dr. Bernard Dold a la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Sub-Pesca en adelante), con el objetivo de proporcionar criterios para la evaluación ambiental del proyecto “Actualización del Sistema de Depositación de Relaves de Planta Pellets”. CAP presentó el proyecto anteriormente mencionado con el objetivo de modificar el actual sistema de descarga marina de relaves procedentes de la Planta de Pellets, proceso minero que CAP desarrolla en la provincia de Huasco, Región de Atacama. La planta de procesos está ubicada a 4 km en línea recta del Puerto de Huasco, en un sector conocido como Ensenada Chapaco.

El presente documento, que corresponde a una revisión de pares del informe del proyecto desarrollado por SUMIRCO y CIMNE, se ha estructurado en las siguientes secciones:

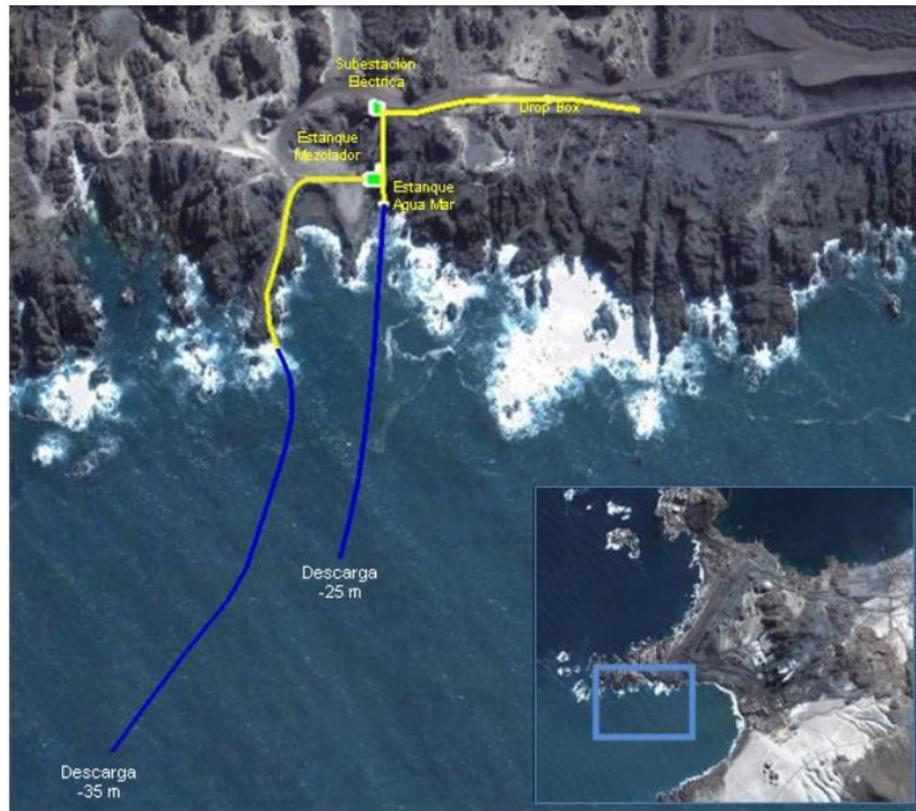
1. “Introducción” y “Antecedentes” donde se enmarcan los objetivos del estudio y se justifica el desarrollo de esta revisión.
2. “Síntesis del Informe del Proyecto”, donde se incluye, a modo de referencia, el tipo de análisis realizado en el estudio desarrollado por SUMIRCO, y los resultados obtenidos.
3. “Análisis Crítico del Proyecto Desarrollado por SUMIRCO”, que incluye la síntesis de los comentarios técnicos y formales que han surgido a raíz del análisis crítico de las metodologías empleadas en el estudio, y las conclusiones obtenidas. Se han estructurado en:
  - Comentarios Generales
  - Metodología Analítica
  - Cálculos Numéricos de Transporte Reactivo
4. “Conclusiones y Recomendaciones”, como síntesis de lo dicho anteriormente.

Las “Referencias” y los “CV del Equipo Revisor” se han incluido al final del presente documento.

## 2 Antecedentes

La Planta de Pellets opera en la Ensenada Chapaco desde el año 1978. Hoy día representa el único punto de vertido de relaves en medio marino en las costas chilenas. La planta genera 4000 toneladas diarias de relave, con un 45% de material sólido. El material sale de la planta a una temperatura de unos 36°C, y se mezcla con agua de mar, en una proporción 1:1, para ser enfriado, y para que no obture el colector o relaveducto.

Durante los años 1978-1994, la Planta de Pellets depositó sus relaves directamente en la zona intermareal, generando turbidez en la bahía. A principios de 1994 comenzó a operar un sistema de depositación submarina de relaves en la misma zona, que consistía en una descarga gravitacional a través de una tubería terrestre, un estanque mezclador-desaireador, además de una tubería submarina que permitía verter el relave a unos 25 m de profundidad (Figura 2-1). Con esto, se eliminó la turbidez en la bahía. Se puso en marcha el Programa de Vigilancia Ambiental, que permitió fiscalizar que los ecosistemas intermareales y submareales se recuperaron en un plazo de 2 a 3 años. En el año 2000, CAP sometió al SEIA un proyecto de complementación de las actividades de la Planta de Pellets de Huasco (“Mejoramiento Tecnológico para la Producción de Concentrados de Hierro”). Uno de los componentes evaluados, fue un nuevo relaveducto. Se incluyó un Plan Específico de Monitoreo, que consistió en la continuidad del Plan de Vigilancia Ambiental anteriormente mencionado. En el año 2004, entró en operación la primera actualización de la descarga impulsada mediante bombeo a unos 35 m de profundidad (Figura 2-1), y a una distancia a 350 m de la costa, en dirección S. Con la “Actualización del Sistema de Depositación de Relaves en Planta de Pellets”, sometida al SEIA en el año 2013, se propuso la implementación de un nuevo sistema de depositación de relaves a más de 200 m de profundidad, en un ambiente marino profundo (“Deep Sea Tailings Placement”, DSTP en adelante). La nueva zona de descarga de relaves estaría situada a más de 6.000 m de la línea de la costa, con profundidades que van desde los 200 a los 800 m. La depositación se realizaría mediante 2 relaveductos de 6.600 m de longitud, y tendrían una vida útil de 50 años. Según CAP (2016), considerando las variables oceanográficas, este constituiría un sitio de almacenamiento apto para la formación de un depósito en pendiente con corrientes de baja intensidad, buen control de la re-suspensión de sólidos, y alejado de la zona fótica.



**Figura 2-1. Puntos Descarga Relave en Ensenada Chapaco (1994-2015). Fuente: CAP (2016)**

Como se ha mencionado, el nuevo emplazamiento propuesto para la depositación de los relaves se encontraría dentro de la zona afótica y anóxica del medio marino, y se esperaría que el ambiente redox fuera reductor. En este contexto, el principal mecanismo que podría afectar a la estabilidad química del relave depositado correspondería a la disolución reductiva de los óxidos de Fe. Esta disolución podría liberar a las aguas una serie de metales traza que, potencialmente, podrían impactar sobre la calidad química de las aguas, y afectar a la biofauna marina local. Los componentes minerales contenidos en los relaves derivados de la producción de la minería del Fe corresponden a óxidos de hierro (magnetita, hematites, goethita), óxidos amorfos e hidróxidos derivados de su alteración (ferrihidrita, entre otros), silicatos y aluminosilicatos (anfíboles, feldespatos, y cloritas, entre otros), minerales de la arcilla, sulfuros, carbonatos, sales y sulfatos, entre otros. Según CAP (2016), la mineralogía metálica de los relaves actuales producidos en la Planta de Pellets estaría constituida por magnetita, hematites, pirita, rutilo, y calcopirita, principalmente, y covelina, calcosina, ilmenita e hidróxidos de hierro, como fases secundarias y/o trazas. La presencia y proporción de estos componentes mineralógicos depende de las unidades de origen del relave, y el proceso minero. Estos componentes metálicos contienen trazas de metales pesados dentro de su estructura cristalina, como Cu, Ni, Zn, Cd, Pb, V, As, Cr y Se, entre otros. No existen antecedentes específicos sobre la caracterización geoquímica de la disolución reductiva en un depósito DSTP, lo que ha justificado la demanda del proyecto por parte de la Autoridad, y su desarrollo por SUMIRCO, en colaboración con CIMNE.

Como se ha mencionado anteriormente, en marzo de 2017 SRK Consulting entregó a CAP una revisión crítica de la propuesta técnica presentada por SUMIRCO en junio de 2015 a la Autoridad como paso previo al desarrollo del estudio. La revisión a pares de la propuesta técnica realizada evidenció una serie de carencias y/o debilidades. Entre otras cuestiones, se consideró que:

1. Las tareas propuestas no eran las más adecuadas para dar respuestas a la evaluación del impacto ambiental solicitada para la aprobación de la modificación del nuevo sistema de depositación de los relaves propuesto en el SEIA del año 2013, ya que no garantizaba la representatividad del estudio en lo referente al material que se proponía ensayar, y las condiciones ambientales que iban a ser implementadas en los ensayos y los modelos numéricos. El ambiente de la depositación no estaba suficientemente caracterizado, según lo especificado en la propuesta, y no se consideró alcance del estudio dicha caracterización. Por otra parte, el material a ensayar debiera corresponder a muestras de relaves representativas de la producción, presente y futura de la Planta de Pellets, y no muestras monominerales o rocas de diferentes orígenes.
2. Era fundamental la elección de un equipo de oceanógrafos, biólogos, y toxi-ecólogos marinos que participaran en el proyecto, tanto en la implementación de las condiciones ambientales en los ensayos y los modelos numéricos, como en la evaluación de los resultados.
3. La herramienta numérica elegida para la implementación de los cálculos de transporte reactivo (RETRASO; Saaltink et al., 1998) podría no ser la más idónea para este tipo de simulaciones, ya que dicho código fue desarrollado para simular transporte reactivo en medios acuíferos porosos, con flujos y cinéticas típicas de este medio. En este sentido, podrían presentarse problemas de convergencia en los cálculos, o requerir tiempos de simulación no realistas.

Se consideró que, a pesar de ser una propuesta típicamente académica, el documento presentado por SUMIRCO adolecía de la rigurosidad y el detalle que se esperaría para un estudio de este tipo. A nivel formal, no se justificaban adecuadamente determinadas decisiones sobre metodologías analíticas, ni se incluían los modelos conceptuales que debieran sustentar el estudio. También existían contradicciones, reiteraciones, y lagunas en la formulación de las tareas, y no se hacía mención de las limitaciones y exclusiones del estudio. Así, se recomendaba una reformulación de la propuesta que incluyera (1) un modelo conceptual teórico de los procesos que pueden tener lugar por la depositación submarina de los relaves, (2) una lista de los alcances y exclusiones del proyecto, (3) las metodologías en detalle para los ensayos analíticos, (4) la inclusión de los estudios que CAP ha desarrollado para la caracterización de sus relaves y el medio marino donde se tenía prevista la depositación, (5) los resultados del Plan de Vigilancia Ambiental, y (6) una propuesta para el equipo de profesionales de la Oceanografía y Biología Marina que participaran en el proyecto. Específicamente, en lo referente a los modelos numéricos, se pedía un mayor detalle en las especificaciones del código escogido para los cálculos, el tipo de modelos conceptuales que se iban a implementar, los métodos de calibración de los modelos que se iban a aplicar, y las actividades que serían necesarias para preparar la herramienta de simulación escogida y la base de datos.

## 3 Síntesis del Informe del Proyecto

A modo de referencia, a continuación, se van a enumerar los alcances y las tareas desarrolladas en el estudio realizado por SUMIRCO en colaboración con el CIMNE.

### 3.1 Objetivos y Estructura del Estudio

Según los autores del estudio, el objetivo general es “evaluar el potencial impacto que pueden tener en el ambiente marino el vertido de relaves proveniente de una mina de óxidos de hierro”. Se ha definido un objetivo general, y unos objetivos específicos:

1. Realizar una recopilación bibliográfica de experiencias de descargas de relaves mineros que afectan al medio marino.
2. Proponer un diseño experimental que considere ensayos de determinados tipos de descargas de relaves mineros y bajo diferentes condiciones de los sedimentos del medio marino (como proporción de materia orgánica, potencial redox, granulometría, entre otros).
3. Aplicar el diseño experimental propuesto, analizando los componentes que son liberados a la columna de agua y sedimentos marinos, desde las descargas analizadas.
4. Evaluar la especiación y biodisponibilidad de los componentes liberados al medio, tanto en agua como en sedimentos.

Para todo esto, se ha diseñado un estudio con la siguiente estructura:

- Antecedentes
- Muestras utilizadas y su caracterización mineralógica y geoquímica
- Metodología experimental aplicada
- Revisión de literatura sobre disolución reductiva de óxidos de hierro en general y en ambientes marinos
- Resultados de los experimentos cinéticos bióticos y abióticos
- Modelización geoquímica de transporte reactivo
- Evaluación de la especiación de los elementos liberados

### 3.2 Muestras Utilizadas y Caracterización Mineralógica y Geoquímica

Se ensayó con una amplia variedad de material lítico:

- Se adquirieron muestras sintéticas comerciales de hematites, goethita y magnetita.
- Se sintetizó ferrihidrita.

- Se obtuvieron 7 muestras de mano de yacimientos del tipo “Iron Oxide Apatite” (IOA) de Suecia (2 muestras), y Chile (5 muestras).
- Se consiguió una muestra del yacimiento de Los Colorados.
- Se tomó una muestra de los relaves procedentes de la Planta de Pellets que CAP deposita hoy en día a unos 35 m de profundidad en la Ensañada Chapaco.

A las muestras se les aplicó los siguientes ensayos: (1) Determinación del Área Específica, (2) DRX, (3) SEM (Microscopio Electrónico de Barrido), (4) FRX (Fluorescencia de Rayos X) a 2 muestras, (5) Digestiones totales de las muestras de campo, (6) Análisis de Microsonda de las muestras de campo, (7) Análisis de Láser ICP-Ms en las muestras de campo.

### 3.3 Revisión Bibliográfica

La revisión bibliográfica ha formado parte de los alcances del estudio, y ha sido integrada como parte de los resultados, no de los antecedentes. Como parte de la revisión, se concluyó que la ferrihidrita es el mineral más reactivo, la hematites es el óxido de Fe(III) más estable, y la goethita es el hidróxido de Fe(III) más abundante., y que las cinéticas de disolución son muy dependientes de parámetros como granulometría, morfología, estructura superficial, y estado de agregación, entre otros. También son muy sensibles a la presencia de catalizadores, como Fe(II), materia orgánica, y sílice.

### 3.4 Ensayos Analíticos. Metodología y Resultados

Los ensayos analíticos realizados en el laboratorio del CIMNE, en el marco del presente estudio, son los que se especifican a continuación:

1. Abióticos, en condiciones anóxicas, a 10 y 20 °C, utilizando agua marina sintética y agua ultrapura. La duración de los ensayos es la siguiente:
  - a. Muestras sintéticas monominerales, a temperatura ambiente: 120 h.
  - b. Muestras de campo y ferrihidrita sintética, a 10°C, con agua marina sintética: 48 días.
  - c. Experimento con agua desionizada, a 10°C: 47 días.

El pH mostró variaciones muy significativas (con el agua ultrapura y ferrihidrita se alcanzaron valores de 3,7). Esto sugirió el uso de una solución tampón en los experimentos bióticos.

2. Bióticos, en condiciones anóxicas, con agua marina sintética, a 10° C y pH constante, utilizando lactato como fuente de carbono. Para los experimentos de disolución reductiva biótica de oxihidróxidos de Fe se adquirió el microorganismo *Shewanella loihica*. La transformación del lactato en acetato se monitoreó como indicación de la actividad bacteriana.

Los materiales anteriormente especificados fueron ensayados en viales donde se reprodujeron las condiciones especificadas para cada ensayo. Estos viales fueron monitorizados y muestreados a medida que evolucionaba el ensayo. Como resultado, se concluyó que los mecanismos de disolución reductiva de los óxidos de Fe se desencadenaban, exclusivamente, por la actividad bacteriana de *Shewanella loihica* en condiciones reductoras (potencial redox entre -70 y 100 mV), y en presencia de lactato como nutriente. Las concentraciones de Fe y acetato aumentaron en la solución, como resultado de la disolución reductiva de los óxidos de Fe, y del metabolismo de la *Shewanella loihica*.

La bacteria no consume el acetato, así que la cantidad de lactato es el factor limitante para el desarrollo de las reacciones de disolución reductiva de óxidos de Fe. En cuanto a las concentraciones de Fe obtenidas:

- Se han medido altas concentraciones de Fe en comparación con los experimentos abióticos (hasta 70 mg/L para el caso de la ferrihidrita).
- Se han medido muy bajas concentraciones en las muestras de relaves, probablemente por los bajos contenidos en óxidos de Fe (4-7%).
- Las concentraciones de Fe con las muestras sintéticas son superiores a las obtenidas con las muestras naturales, y parecidas a las obtenidas con las muestras sintéticas de goethita y magnetita.

En cuanto a los resultados obtenidos con los diferentes tipos de materiales ensayados, es destacable que la cinética de la disolución reductiva fue mayor para la magnetita y la ferrihidrita que para la goethita. En los experimentos con las muestras de relave se observó un aumento de las concentraciones de metales traza, como Mn, Cu, V, Ga, y As. Esto podría corresponder a la liberación de los mismos como consecuencia de reacciones de disolución reductiva de óxidos. Sin embargo, aunque se ha caracterizado un enriquecimiento elemental de dichas muestras en Co, Ni y Zn, no se ha observado el aumento de sus concentraciones en la solución. Esto podría obedecer a procesos de co-precipitación en carbonatos y/o sorpción.

En los experimentos abióticos no se observó ningún cambio respecto a las condiciones iniciales en lo que respecta a las concentraciones de Fe y la mayoría de los metales traza. Pudo observarse una importante liberación de Cu en las muestras con relaves que, según los autores del estudio, podría proceder de la disolución oxidativa de sulfuros, como calcopirita y piritita, en presencia de oxígeno disuelto.

### 3.5 Modelos Numéricos y Evaluación de Impactos

Se diseñaron una serie de modelos 1D en los que se implementaron los siguientes escenarios:

- Escenario 1: se presentó como único mineral reactivo a la magnetita, y no se llega a condiciones de sulfato-reducción. Se obtuvo que los metales bivalentes (Fe, Cu, Zn, y As) quedaban en el agua de poro como complejos acuosos.
- Escenario 2: se presentó como único mineral reactivo a la magnetita, y tampoco se alcanzan condiciones de sulfato-reducción, pero se permite la precipitación de siderita si se alcanzan las condiciones de saturación en este mineral. Se obtuvo que la precipitación de siderita consumiría gran parte del Fe acuoso. No se consideró la co-precipitación de los elementos traza.
- Escenario 3: se presentó como único mineral reactivo a la magnetita, y se alcanzaron condiciones de sulfato-reducción, por lo que además de siderita se permitió la precipitación de sulfuros metálicos si se alcanza la saturación en estos minerales. Se modelizó la precipitación de mackinawita (FeS), y siderita. También se simuló la precipitación de covelina (CuS) y esfalerita (ZnS), y la co-precipitación de Ni y Co en la mackinawita.
- Escenario 4: el relave estaba formado por magnetita y crisocola con una relación de 5:1. No se alcanzaron condiciones de sulfato-reducción. Se trataría del peor escenario modelizado. El Cu de

la crisocola se liberaba sin que se considerara la precipitación de sulfuros, por lo que se registraron altas concentraciones de Fe y Cu en el agua de poro.

Las especies acuosas dominantes en los diferentes escenarios modelizados se han especificado en la Tabla 3-1. Los resultados obtenidos para los modelos que no implementan sulfato-reducción mostraron como las principales especies metálicas liberadas (Cu, Fe, Mn y otros) formaron complejos carbonatados y/o clorurados, principalmente. Para otros componentes metálicos, como Co, Ni, Zn, se supone un proceso de retención asociado a una co-precipitación en carbonatos secundarios, y/o por procesos de sorpción o co-precipitación en hidróxidos de hierro. El As sería liberado como soluto a las aguas, mientras V y Ga formarían hidróxidos, principalmente.

**Tabla 3-1. Especies Acuosas Dominantes en los Escenarios Modelizados.**

Mineralogía y elementos trazas de los minerales sensibles a condiciones redox	magnetita Fe, V, Co, Mn, Ni, Zn, Cu, As	magnetita/crisocola Fe, V, Co, Mn, Ni, Zn, Cu, As/Cu, Mn, Si
Disolución reductiva <i>sin sulfato reducción</i>	Fe <sup>2+</sup> , V(OH) <sub>3</sub> , Co <sup>2+</sup> , CoCl <sup>+</sup> , MnCO <sub>3</sub> , MnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , NiCl <sup>+</sup> , Zn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2-</sup> , ZnCO <sub>3</sub> , CuCl <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , CuCl <sub>2</sub> <sup>-</sup> , H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>	Fe <sup>2+</sup> , V(OH) <sub>3</sub> , Co <sup>2+</sup> , CoCl <sup>+</sup> , MnCO <sub>3</sub> , MnHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , NiCl <sup>+</sup> , Zn(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>2-</sup> , ZnCO <sub>3</sub> , CuCl <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , CuCl <sub>2</sub> <sup>-</sup> , H <sub>3</sub> AsO <sub>3</sub>
Disolución reductiva <i>con sulfato reducción y/o precipitación de siderita</i>	mackinawita, rodocrosita, siderita, NiS, CoS, esfalerita, covelina, V(OH) <sub>3</sub> , AsS(OH)(HS) <sup>-</sup>	

Los escenarios anóxicos sin sulfato-reducción implican la presencia de poca materia orgánica, por lo que podría ser representativos del periodo de 50 años en los que serían operativos los vertidos de relaves. El ambiente reductor con sulfato-reducción correspondería a una situación de post-cierre, durante el que se acumularía la materia orgánica sobre el depósito de relaves inactivo.

Para los cálculos numéricos se utilizaron las leyes cinéticas obtenidas con los experimentos bióticos de laboratorio para calibrar los modelos, y se asumió que el 4-7% de óxidos que contienen los relaves son magnetita. Se asumió que los granos de magnetita tenían, como elementos traza, Mn, V, Ni, Cu, Co, Zn, As, y Ga. El escenario 4 reproduce la presencia de crisocola en el relave ya que, según un análisis de QEMSCAN, podría existir hasta un 1%. A pesar que se ha considerado un escenario poco realista, se implementó como la peor condición para la composición del relave.

### 3.6 Conclusiones

Los experimentos realizados, y la modelización numérica confirmarían la existencia de disolución reductiva en ambientes reductores marinos, en presencia de *Shewanella loihica*, y con el tipo y contenido de nutrientes adecuado:

- Durante los 50 años de vertido de relaves entre 200-800 m de profundidad en un ambiente anóxico, y con poca materia orgánica, el modelo predice la disolución reductiva de los óxidos de hierro con la consecuente liberación de los elementos traza, que son estables, principalmente,

como (1) cationes divalentes, (2) complejos de cloruro, (3) carbonatos, (4) hidróxidos, o (5) oxianiones, dando como resultado su alta biodisponibilidad.

- En el caso que haya un importante aporte de materia orgánica (durante la etapa de post-vertido de relaves, por ejemplo), se daría un ambiente más reductor que podría desencadenar la existencia de procesos de sulfato-reducción, y la precipitación de sulfuros secundarios. Asociado a la existencia de materia orgánica, aumentaría la alcalinidad del medio, pudiendo darse la precipitación de siderita. Ambos procesos podrían fijar los metales traza liberados por co-precipitación, entre otros.

Las cinéticas observadas en el laboratorio serían relativamente bajas. Según los autores del estudio, esto podría ser consecuencia de que (1) los experimentos se realizaron utilizando una única cepa bacteriana, o (2) el sistema llega a una estancación que limita la reducción (por producción de  $\text{Fe}^{2+}$ , entre otros). En cualquier caso, se evidenciaría la necesidad de evaluar estos procesos biogeoquímicos con muestras naturales del fondo marino del lugar de vertido (con comunidad bacteriana autóctona), y con muestras de relaves representativas del proceso.

## 4 Análisis Crítico del Proyecto Desarrollado por SUMIRCO

El análisis crítico del proyecto desarrollado por SUMIRCO en colaboración con CIMNE se ha estructurado en tres secciones:

- Comentarios Generales
- Metodología Analítica
- Cálculos Numéricos del Transporte Reactivo

A continuación, se van a detallar los aspectos que se han considerado más relevantes en el análisis crítico del informe del proyecto. Hay que destacar que no se ha considerado alcance de dicho análisis los aspectos formales de presentación del documento.

### 4.1 Comentarios Generales

En primer lugar, hay que destacar que parte de las conclusiones enumeradas por los autores del estudio coinciden con las recomendaciones que SRK Consulting realizó con el “peer review” de la propuesta: la necesidad de caracterizar en detalle (1) los relaves reales, presentes y futuros, que podrían ser depositados en la Ensenada Chapaco en un contexto DSTP, y (2) las condiciones físico-químicas y biológicas del fondo marino específicas del área del en que se tienen proyectados los vertidos. Esta caracterización debiera incluir:

- Tipo y contenidos de óxidos de Fe y sulfuros de los relaves.
- Discusión acerca de la presencia de crisocola como mineral de alteración en los relaves.
- Condiciones redox de las aguas y los sedimentos en contacto con los relaves depositados.
- Tipo de comunidades bacterianas autóctonas del lugar.
- Tipos y contenidos de nutrientes para las comunidades bacterianas locales que se consideren relevantes desde el punto de vista del desarrollo de las reacciones de disolución reductiva de óxidos de Fe.
- Desarrollo y papel de la materia orgánica en el relave depositado, tanto en la etapa operativa de los vertidos, como durante el cese de dicha actividad.

El estudio que no lleve asociada esta caracterización, no puede considerarse representativo de los procesos geoquímicos que puedan darse en un DSTP en el sector específico de la zona de los vertidos.

El estudio realizado, y la síntesis bibliográfica incluida, han mostrado como estos parámetros son clave para el control de las cinéticas de los mecanismos de la disolución reductiva de los óxidos de Fe, y la liberación de metales traza a las aguas. Además, los resultados obtenidos son altamente sensibles a la variación de dichos parámetros, hasta tal punto que podrían, incluso, inhibir, ralentizar y/o parar los mecanismos de la reacción. Esto confirma la importancia de trabajar con los parámetros

específicos del área del vertido, teniendo en cuenta la naturaleza del material, presente y futuro, que se tiene previsto depositar. En el desarrollo del estudio que se ha evaluado, la indeterminación de algunos de estos parámetros en las condiciones de los ensayos ha ocasionado que exista una confusión de conceptos en la interpretación de los resultados analíticos. Así, a modo de ejemplo, a pesar de intentar reproducir condiciones anóxicas en los ensayos, no se descarta que algunos resultados sean debidos a la oxidación de los sulfuros contenidos en las muestras (evolución de las concentraciones de Cu de los ensayos abióticos con relaves).

También ha resultado clave para el desencadenamiento de las reacciones el uso de la cepa bacteriana correspondiente a la *Shewanella loihica*, en presencia de lactato como nutriente. El estudio realizado por SUMIRCO debiera haber justificado la representatividad de ambos factores como condiciones comunes en el medio marino donde se propone realizar la depositación de los relaves. Sin esta justificación, la representatividad del estudio como criterio para la evaluación medioambiental de DSTP pierde validez. Esta cuestión, entre otras, se esperaría que fuera tarea de un equipo de biólogos marinos expertos en la biodiversidad del litoral N chileno. En este sentido, se considera muy relevante en el desarrollo del estudio que no se hayan incluido oceanógrafos, biólogos ni ecotoxicólogos marinos que hayan podido colaborar en (1) la caracterización físico-química del medio marino (ni en la implementación de las mismas en las condiciones de los ensayos analíticos, o en las condiciones de contorno de los modelos numéricos), (2) la caracterización de las comunidades bacterianas locales, y disponibilidad y tipo de nutrientes existentes en las condiciones de las costas chilenas, y sobre todo, (3) la evaluación de los impactos sobre la biota marina, a partir de los resultados obtenidos del estudio. Esto se ha hecho de una manera meramente conceptual y simplista, lo que se considera claramente insuficiente teniendo en cuenta la relevancia e implicaciones del estudio. Los mismos desarrolladores del proyecto solicitan un estudio de detalle de estos temas. Sin embargo, se considera que esto debiera haber formado parte del estudio, ya que los cálculos y las conclusiones formuladas pierden en representatividad y rigurosidad.

De la lectura de la redacción de la propuesta se interpretó la inclusión de los profesionales anteriormente mencionados como parte integrante del equipo de trabajo. Esto, como otras cuestiones especificadas en la propuesta, no ha sido finalmente incluido en el estudio. Por ejemplo, no se ha modelizado con PHREEQC los resultados de los ensayos analíticos. Esto es fundamental para formular matemáticamente las leyes cinéticas de los mecanismos de disolución reductiva de los óxidos de Fe implementadas en los ensayos analíticos. Este sería uno de los objetivos específicos del proyecto, por lo que se considera una carencia fundamental del estudio. Tampoco se ha propuesto una metodología para un estudio de caracterización de las reacciones de disolución oxidativa de sulfuros en medio marino. Sí se ha incluido como parte de los resultados del estudio una revisión bibliográfica sobre los mecanismos de disolución reductiva de óxidos de Fe. Sin embargo, no se presentan los mecanismos termodinámicos responsables de la disolución reductiva de los óxidos de Fe. Dicha revisión adolece de una síntesis que indique su aplicabilidad como antecedentes del proyecto. En definitiva, no aporta al estudio desarrollado.

Como comentario general, hay que destacar lo que se considera que ha sido un deficiente criterio en el uso de los recursos del proyecto. Por una parte, se emplean gran cantidad de recursos en la caracterización de materiales que después no han contribuido a los resultados del estudio, y se han ensayado materiales y escenarios que tampoco han sido integrados en el análisis de impactos. Sin embargo, los parámetros que se han considerado clave para el desarrollo de las reacciones no han sido suficientemente caracterizados, o no se ha estimado conveniente el realizar análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de su variabilidad en los resultados obtenidos. También hay que destacar el desacoplamiento que se ha observado entre los análisis de laboratorio y los modelos

numéricos desarrollados, cuando se esperaría una retroalimentación entre las metodologías y los modelos conceptuales, y los resultados obtenidos por la aplicación de ambas técnicas.

Concluyendo, hay que destacar la existencia de demasiadas incertidumbres, tanto en la caracterización y representatividad de materiales, en la metodología de los ensayos, y en la simulación de los procesos. En este sentido, los resultados obtenidos no debieran ser considerados cuantitativamente representativos de los procesos que se esperarían en un escenario de DSTP específico del litoral chileno, con el material presente y futuro que se tendría previsto depositar. Estos resultados no proporcionan los criterios suficientes que necesita la Autoridad para evaluar medioambientalmente el proyecto de modificación de la depositación de los relaves de CAP en la Ensenada de Chapaco. Se considera que son estudios genéricos que pueden aportar como antecedentes a futuros estudios más específicos que sí pudieran ser utilizados como herramientas de gestión para la toma de decisiones.

Sorprende que, con todas estas limitaciones del estudio, se formulen conclusiones que pueden ser demasiado alarmistas y que están pobremente sustentadas técnicamente. En general, (1) se pone énfasis en los procesos que maximizan las tasas de liberación de metales, (2) sólo se consideran a nivel conceptual las reacciones de fijación de dichos metales, como co-precipitación, y/o sorción, o (3) se omiten los fenómenos de dispersión de dichos componentes en las aguas marinas. Así, se afirma que los metales liberados por las reacciones de disolución reductiva de los óxidos de Fe podrían ser biodisponibles. Entre ellos, el Cu procedente de la poco probable existencia de la crisocola en los relaves. También se afirma que el aporte de Fe a las aguas podría causar la expansión de la zona de mínimo oxígeno, alterando el ecosistema costero. Se habla de efectos globales, cuando el volumen de los vertidos es muy limitado, en comparación con el volumen de las aguas oceánicas que potencialmente podrían verse afectadas. Es curioso como los fenómenos de advección y dispersión de los solutos no han sido tenidos en consideración en los cálculos efectuados mediante los modelos numéricos. Sin embargo, sí se mencionan para predecir que en caso de co-precipitación de sulfuros en un ambiente anóxico con sulfato-reducción, la existencia de corrientes marinas podrían transportar aguas oxigenadas que pudieran disolver los sulfuros, liberando, de nuevo, estos componentes a las aguas. En definitiva, el discurso desarrollado a partir de la interpretación de los resultados parece dirigido a resaltar los posibles aspectos negativos del vertido de los relaves, sin presentar un apoyo técnico riguroso que pueda considerarse de manera objetiva para la toma de decisiones.

## 4.2 Metodología Analítica

Existen una serie de comentarios que deben ser destacados en lo que se refiere a las metodologías analíticas aplicadas en los ensayos de laboratorio.

### Caracterización de las Muestras

En primer lugar, no se ha presentado en el informe del proyecto toda la información referente a la caracterización geoquímica de las muestras. De este modo, no se dispone de criterios suficientes para evaluar, por ejemplo, la caracterización del relave, ni queda suficientemente justificado algunas de las decisiones referidas al diseño conceptual de los ensayos y los cálculos numéricos. Por otra parte, según lo indicado en el informe, no todas las muestras han sido caracterizadas siguiendo las mismas pautas metodológicas. Con esto se pierde el valor de la referencia entre los diferentes tipos de materiales.

Aparte de los análisis mineralógicos y multi-elementales, no se ha realizado otro tipo de caracterización. Consideramos que hubiera sido conveniente caracterizar geoquímicamente las

muestras (al menos las muestras de roca y relave) siguiendo los criterios definidos por las guías MEND y GARD, y recomendados por la “Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras” (2015) de SERNAGEOMIN. Este tipo de ensayos se aplica a las muestras procedentes de las operaciones mineras de manera estandarizada, por lo que hubieran dado un valor de referencia.

### **Implementación Condiciones de Laboratorio**

Una aparente debilidad de las técnicas analíticas es la diferencia en las implementaciones de las condiciones redox y de pH en los ensayos. Estas diferencias complican los términos de referencia entre los ensayos, por lo que no es posible determinar cuantitativamente la influencia de determinados parámetros sobre los resultados. Por ejemplo, el medio anóxico se reproduce por medio de (1) el consumo de oxígeno de las bacterias, o (2) desgasificación de la muestra. Esto crea una incertidumbre adicional en el control del redox como condición inicial de los ensayos. Prueba de esta incertidumbre es que en algunos de los viales se obtienen resultados contradictorios con la hipótesis de un ambiente anóxico inicial (se postula que quizás quede oxígeno en los viales que pueda desencadenar reacciones de oxidación de sulfuros en los experimentos abióticos).

Por otra parte, las condiciones de pH son diferentes en los experimentos bióticos y los abióticos. La variabilidad en la evolución del pH en los experimentos abióticos fue el argumento necesario para aplicar un mecanismo tampón del pH en los experimentos bióticos. Para ser rigurosos, se tendría que haber repetido los experimentos abióticos en las mismas condiciones.

### **Diseños de las Metodologías Analíticas**

Existe una serie de cuestiones referentes a las metodologías analíticas que no han sido suficientemente justificadas en la memoria del proyecto. Por ejemplo:

- No se entiende el objetivo del ensayo realizado con agua pura. No se ha realizado ninguna discusión de los resultados, o un análisis de sensibilidad, aplicando agua marina o desionizada.
- No se descarta que la metodología del muestreo de la solución acuosa a lo largo del desarrollo de los ensayos haya podido alterar el desarrollo del mismo por variación de la relación agua:sólido.
- No se explican los criterios para determinar la duración de los ensayos (variable en función del ensayo), y si los resultados obtenidos son representativos de un estado transitorio o estacionario de las reacciones. Únicamente en el caso del ensayo biótico con ferrhidrita se especifica que la reacción se detiene por agotamiento del lactato utilizado como nutriente para el metabolismo de la *Shewanella loihica*.

Otros factores han sido considerados como clave para control del desarrollo de las reacciones y no han sido debidamente justificados en la memoria del proyecto. Por ejemplo:

- En la propuesta se consideró como nutriente para las comunidades bacterianas al acetato. Con el desarrollo del proyecto se ha evidenciado que el acetato es un producto de las reacciones metabólicas que usan el lactato como nutriente, y que las reacciones en presencia de acetato quedan inhibidas (la *Shewanella loihica* no lo acepta como nutriente). No se menciona qué tipo de nutrientes que son representativos del medio marino escogido para la depositación, y qué tipo de análisis se podría efectuar para evaluar la sensibilidad del desarrollo de las reacciones de disolución reductiva de óxidos en función del tipo y concentración de nutrientes presentes en el

medio marino. En este sentido, da la sensación de que los ensayos no intentan reproducir las condiciones físico-químicas y biológicas del medio, si no que se intenta maximizar el efecto de la disolución reductiva de los óxidos sin considerar la representatividad del ensayo realizado. Este mismo razonamiento aplicaría a la selección de la *Shewanella loihica* como única cepa bacteriana en los ensayos.

- La posible presencia de crisocola en el relave no ha sido reproducida en los estudios analíticos, y no se ha determinado el papel que su presencia pueda jugar sobre las cinéticas de reacción, y las tasas de liberación de solutos. Se identificó en una muestra de relave (cuya caracterización no ha sido incluida en el informe), pero se le ha dado la relevancia suficiente como para considerar que debe constituir uno de los 4 escenarios que han sido modelados numéricamente. Sin embargo, como para el resto de los parámetros clave en el control de las cinéticas de reacción, no se ha realizado un análisis de representatividad de su presencia en el relave.

Como se acaba de mencionar, no existe un análisis de representatividad de los parámetros fijados en los ensayos. Aparte de los ya mencionados (tipo y concentración de las comunidades bacterianas y nutrientes), tampoco se hace un análisis de las condiciones físico-químicas del medio específico de la depositación, como salinidad, redox, temperatura o presión. Esta última es una variable que no se menciona en ninguna parte de la propuesta o del informe del proyecto, a pesar de que constituye una de las principales variables termodinámicas, y de que su valor debe variar sustancialmente en las condiciones de la depositación (a 200-800 m de profundidad) respecto a las condiciones simuladas en el laboratorio. Al igual que la función "presión", la variable "tiempo" tampoco es mencionada o discutida en la metodología analítica implementada, en los cálculos numéricos, o en la discusión de los resultados obtenidos.

### **Interpretación de los Resultados**

Como parte de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados, los autores del estudio destacan que las cinéticas de reacción obtenidas son bajas o muy bajas respecto a lo que en principio ellos esperaban. Argumentan la existencia, en los ensayos, de restricciones respecto a (1) la única cepa bacteriana utilizada en los ensayos, y (2) la cantidad y el tipo de nutrientes. También mencionan que la producción de Fe(II) podría inhibir el desarrollo de las reacciones. Es obvio que cualquiera de estas cuestiones podría influir en el desarrollo de las reacciones, y se considera que se tendría que haber diseñado experimentos adicionales como análisis de sensibilidad de estos parámetros. Hubiera sido propio de un estudio riguroso no trabajar con tantos tipos diferentes de materiales o escenarios, e incluir variantes en los ensayos específicos con algún material. En este sentido, se podría haber trabajado con la muestra del relave y/o con magnetita, por ejemplo (es el único óxido de Fe que finalmente se ha implementado en los cálculos numéricos), y haber ensayado una mayor variedad de situaciones referentes al tipo de cepa bacteriana o a la cantidad y tipo de nutrientes. Esto es relevante, sobre todo considerando que si se hubiera utilizado el acetato como nutriente (como se indicó en la propuesta del estudio), las cinéticas de las reacciones hubieran sido aún mucho más lentas.

Otras cuestiones que deben ser destacadas de los resultados obtenidos son:

- Las cinéticas de reacción más elevadas se dan utilizando como ferrihidrita. Este es un resultado que podría ser predecible como consecuencia de un análisis de la estabilidad termodinámica y las solubilidades, en las condiciones del ensayo, de los diferentes óxidos e hidróxidos.
- No se mencionan si los tiempos de los análisis corresponden a estados estacionarios o transitorios, y cómo sería la tendencia de la evolución temporal de las cinéticas teóricamente medidas en el laboratorio. A esta cuestión habría que añadir si se considera que los tiempos de

los ensayos han sido considerados como representativos del proceso que se desea simular. Como se ha mencionado anteriormente, únicamente para el caso de la ferrhidrita en condiciones bióticas se menciona como el limitante del progreso de la reacción la cantidad de lactato disponible en los viales.

- En ningún caso se formulan las cinéticas de reacción para los diferentes sólidos en las diferentes condiciones del ensayo. Si se llegó a resultados satisfactorios, es fundamental que dichas cinéticas sean especificadas como parte fundamental de los resultados de los ensayos.
- Hay que destacar, como parte de la falta de rigurosidad de los ensayos realizados, la argumentación que se da para explicar el comportamiento en las concentraciones de Cu de los ensayos abióticos usando el relave como muestra sólida. Se indica la posibilidad de que exista un ambiente oxidante en el vial que haya provocado la oxidación de los sulfuros contenidos en el relave. Esto es evidencia de que las condiciones de los ensayos no han sido debidamente garantizadas durante el desarrollo de los mismos (ni si quiera como condición inicial). Este hecho, entre otros, siembra la duda respecto la credibilidad de los resultados obtenidos para el resto de los ensayos, ya que podría cuestionarse que los ensayos se hayan realizado según las condiciones definidas para ello.

En general, a pesar de todas las incertidumbres anteriormente expuestas (que de por sí ya podrían invalidar el estudio), lo que destaca es la ausencia de un plan de trabajo donde se contemple un análisis de sensibilidad de los resultados respecto a parámetros que han resultado fundamentales para el desarrollo de las reacciones de disolución reductiva de los óxidos de Fe, como son el estado redox de la solución, y el tipo y concentración de comunidad bacteriana y nutrientes. Si existen dudas respecto a la representatividad de las condiciones impuestas en el laboratorio (respecto a las condiciones ambientales de los fondos marinos donde se podrían realizar los vertidos), esta falta de rigurosidad en el desarrollo de los ensayos hace que los resultados obtenidos pierdan el valor de referencia que debieran tener.

### 4.3 Cálculos Numéricos del Transporte Reactivo

Se ha escogido para implementar los cálculos numéricos el código RETRASO (Saaltink et al., 1998). Este código fue desarrollado para modelizar transporte reactivo en acuíferos porosos, donde son válidas las leyes de flujo de Darcy. En este sentido, hubiera sido necesario incluir en el informe las especificaciones del código, y las limitaciones del mismo para reproducir los procesos que son objetivo del estudio desarrollado por SUMIRCO en colaboración con el CIMNE. Entre estas limitaciones, hay que destacar que (1) no se pueden simular las velocidades de los flujos advectivos típicamente marinos sin tener errores de convergencia en los cálculos, y que (2) existen limitaciones respecto al número de componentes y elementos definidos en la discretización espacial para que los cálculos puedan ser desarrollados teniendo en cuenta tiempos realistas de computación. Estos podrían ser los motivos de la simplicidad de los modelos conceptuales que a continuación se van a exponer, y del por qué se ha optado por un modelo típicamente difusivo. En cualquier caso, esto debería ser argumentado en el informe del proyecto, identificando las limitaciones de representatividad de los resultados obtenidos.

Tampoco se ha incluido en el reporte del proyecto los criterios de elección de la base de datos termodinámica. Se menciona que se ha escogido la base de datos de "Wateq", pero no se menciona cómo se han implementado (1) las leyes cinéticas, (2) los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio, y (3) las reacciones bacterianas. Se tendría que justificar las limitaciones de esta base de datos para simular reacciones en medios salinos (y si se ha visto la necesidad o no de utilizar las

correcciones de Pitzer en los modelos), y si se ha tenido en cuenta el efecto de la presión en el cálculo de las constantes de equilibrio de las diferentes reacciones implementadas en los cálculos.

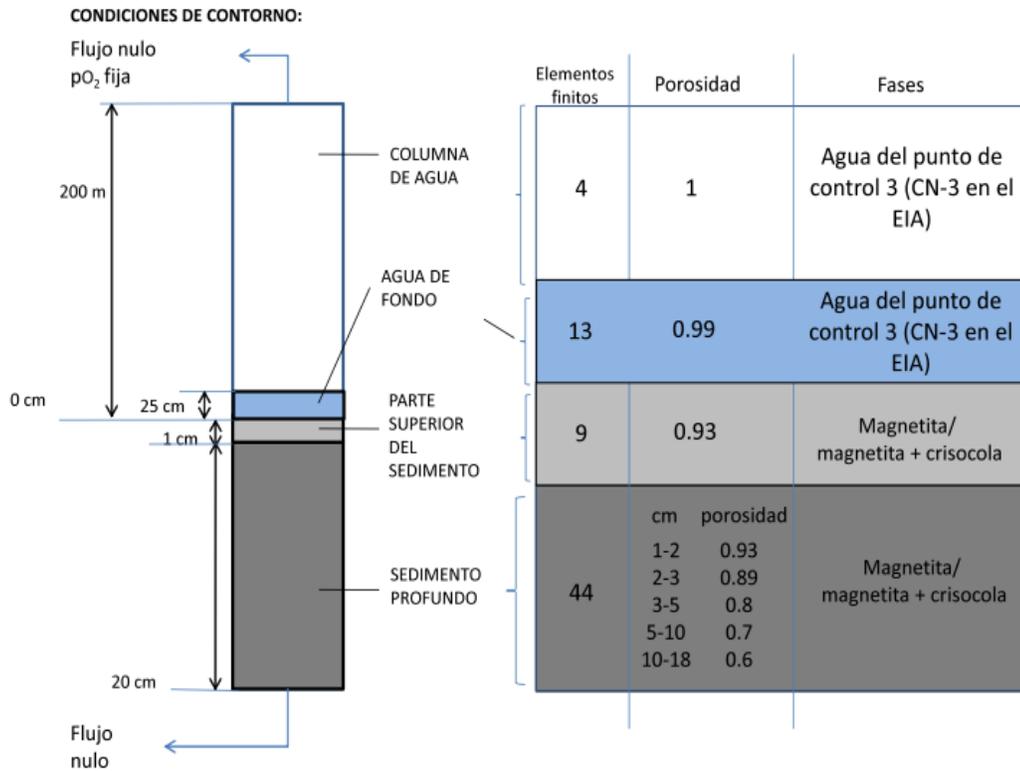
### **Modelo Conceptual Hidrológico, Físico y Geométrico**

Respecto a los cálculos realizados utilizando el código numérico RETRASO, hay que destacar la simplicidad de los modelos conceptuales utilizados. Formalmente, dichos modelos no se han presentado en el informe del proyecto como correspondería, añadiendo las tablas de datos donde se especifiquen los valores de todos los parámetros impuestos en los cálculos (discretización espacio-temporal, tolerancias numéricas, porosidad, coeficiente de difusión, condiciones iniciales de temperatura y presión, entre otros), y sus respectivas fuentes. El tipo de modelo implementado (modelo 1D con transporte difusivo, simulando un medio poroso, y a temperatura constante) se deduce, pero no se encuentra especificado en ningún lugar del informe.

Como se ha mencionado, se ha implementado un modelo de flujo y transporte 1D (Figura 4-1) en difusión que, claramente, no puede simular las condiciones del transporte de solutos en el medio marino. Esto podría ser representativo de una lámina de agua estancada, de pequeñas proporciones, y sin cambios laterales. En cualquier caso, al no especificarse el valor del coeficiente de difusión, no se puede hacer más comentarios del modelo de transporte utilizado en los cálculos. Es relevante que no se mencionen los mecanismos de transporte impuestos en los cálculos. Consideramos fundamental en un estudio riguroso que se identifiquen las hipótesis planteadas y, si por simplicidad se han tomado una serie de decisiones que menoscaban la representatividad de los modelos, poner de relevancia las limitaciones de los resultados.

Las condiciones de contorno implementadas en el borde superior del modelo han sido de flujo nulo (Figura 4-1), por lo que, dada la naturaleza del modelo, todos los componentes liberados en las reacciones simuladas quedarían "acumulados" dentro de la columna de agua, sin que exista un efecto que simule la dispersión de los solutos. Esto, indudablemente, maximiza los valores de las concentraciones que podrían ser medidas en el agua de contacto del relave. La condición de contorno del borde inferior (flujo nulo), y la del borde superior de presión parcial de  $O_2(g)$  prefijada parecen conceptualmente correctas.

El modelo conceptual supone una distribución isoterma de temperaturas, lo que no es realista, teniendo en cuenta la profundidad del modelo numérico que se ha implementado en los cálculos: 200 y 800 m (tampoco se ha indicado la temperatura a la que se han efectuado los cálculos). Es por ello, que las condiciones térmicas de la columna de agua tienen que ser muy variables. Por simplicidad, podría haberse considerado la temperatura del relave como constante, pero, en ningún caso, igual a la temperatura de la superficie del mar. Si implementar un modelo no-isotermo no ha sido considerado relevante, debería haber sido indicado en la memoria del proyecto, con el correspondiente respaldo técnico. Por otra parte, no se han mencionado los criterios para la discretización espacial, y si esta garantiza la buena convergencia de los cálculos.



**Figura 4-1. Modelo Conceptual Implementado en los Cálculos.**

### **Modelo Conceptual Químico y Geoquímico**

Respecto al modelo geoquímico implementado en los cálculos (Figura 4-1 y Tabla 4-1) también hay que destacar su simplicidad. Se han considerado, tan solo, 13 especies primarias, entre las que se encuentran H<sub>2</sub>O, H<sup>+</sup>, y O<sub>2</sub>. Otros componentes fundamentales en los modelos, como Fe, C, y S están representados por 6 especies primarias, correspondiente a una especie principal reducida y otra oxidada de cada uno de los 3 componentes totales. Aparte de los ya mencionados, únicamente se han considerado As, Cr, Cu, y Zn.

Por la definición de las especies primarias y secundarias, se deduce que los equilibrios entre los pares redox del Fe, C, S han sido desacoplados. En este sentido, estrictamente hablando, el modelo no calcula las reacciones de equilibrio redox entre los pares anteriormente mencionados. Esto queda confirmado por el hecho de que no se ha añadido la especie "e-", como especie secundaria. Como reacciones secundarias se han añadido, específicamente, las reacciones cinéticas correspondientes a la oxidación del Fe<sup>2+</sup> y H<sub>2</sub>S por O<sub>2</sub>, y la oxidación del H<sub>2</sub>S por Fe(III), como forma de "controlar" las reacciones de oxidación del Fe(II) y el S(II). Este es un artificio que, de ser considerado necesario para los cálculos, debería haber sido argumentado por los autores de los modelos numéricos, y haber identificado las limitaciones de representatividad de los resultados obtenidos. También han sido implementados con leyes cinéticas las reacciones de respiración aeróbica, sulfato-reducción, las reducciones de magnetita, y crisocola. No se ha especificado la fuente de estas leyes: si proceden de antecedentes bibliográficos, o son el resultado de la interpretación de los ensayos analíticos.

Tabla 4-1. Modelo Conceptual Geoquímico Implementado en los Cálculos.

Modelo geoquímico		
Especies primarias: $\text{HCO}_3^-$ , $\text{CH}_2\text{O}$ , $\text{O}_2$ , $\text{H}^+$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{CuCl}_2$ , $\text{Zn}^{2+}$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$		
Especies secundarias: $\text{OH}^-$ , $\text{CO}_2$ , $\text{CO}_3$ , $\text{HS}^-$ , $\text{FeSO}_4$ , $\text{Fe}(\text{HS})_2$ , $\text{FeCl}^+$ , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , $\text{FeOH}^+$ , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , $\text{FeHCO}_3^+$ , $\text{CuCl}_2$ , $\text{Cu}^+$ , $\text{ZnCl}^+$ , $\text{ZnSO}_4$ , $\text{ZnOHCl}$ , $\text{ZnCO}_3$ , $\text{ZnHCO}_3$		
Reacciones primarias	Reacción	Formulación cinética
R1: Respiración aeróbica:	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$	$r_{\text{O}_2, \text{O}_2} = k_{\text{O}_2, \text{O}_2} \cdot (\text{CH}_2\text{O}) \cdot \frac{[\text{O}_2]}{K_{\text{O}_2} + [\text{O}_2]}$
R2: Sulfato reducción	$2\text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{HCO}_3^-$	$r_{\text{O}_2, \text{SO}_4} = k_{\text{O}_2, \text{SO}_4} \cdot (\text{CH}_2\text{O}) \cdot \frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{K_{\text{SO}_4} + [\text{SO}_4^{2-}]} \cdot \frac{K_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2} + [\text{O}_2]}$
R3: Magnetita reducción	$\text{CH}_2\text{O} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 11\text{H}^+ \rightarrow 6\text{Fe}^{2+} + \text{HCO}_3^- + 6\text{H}_2\text{O}$	$r_{\text{O}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3} = k_{\text{O}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot \sigma_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot (\text{CH}_2\text{O})$
R4: Crisocola reducción	$\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{H}_4\text{SiO}_4$	$r_{\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}} = k_{\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}} \cdot \sigma_{\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}$
Reacciones secundarias		
R5: $\text{Fe}^{2+}$ oxidación por $\text{O}_2$	$\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{4}\text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	$r_{\text{Fe}^{2+}} = k_{\text{Fe}^{2+}} \cdot [\text{Fe}(\text{II})][\text{O}_2][\text{H}^+]^2$
R6: $\text{H}_2\text{S}$ oxidación por $\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	$r_{\text{H}_2\text{S}} = k_{\text{H}_2\text{S}} \cdot [\text{S}(\text{II})][\text{O}_2]$
R7: $\text{H}_2\text{S}$ oxidación por $\text{Fe}(\text{III})$	$\frac{1}{8}\text{H}_2\text{S} + \text{Fe}^{3+} + \frac{1}{4}\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \frac{1}{8}\text{SO}_4^{2-} + \frac{5}{4}\text{H}_2\text{O}$	$r_{\text{H}_2\text{S}/\text{Fe}^{3+}} = k_{\text{H}_2\text{S}/\text{Fe}^{3+}} \cdot [\text{S}(\text{II})][\text{Fe}(\text{III})]$
R8: $\text{FeCO}_3(\text{s})$	$\text{FeCO}_3(\text{s}) \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	EQUILIBRIUM: $K_{\text{FeCO}_3}$
R9: $\text{FeS}_2(\text{s})$	$\text{FeS}_2(\text{s}) + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{HS}^-$	EQUILIBRIUM: $K_{\text{FeS}_2}$
R10: $\text{Cu}_2\text{S}(\text{s})$	$\text{Cu}_2\text{S}(\text{s}) + \text{H}^+ \rightarrow 2\text{Cu}^+ + \text{HS}^-$	EQUILIBRIUM: $K_{\text{Cu}_2\text{S}}$
R11: $\text{ZnS}(\text{s})$	$\text{ZnS}(\text{s}) + \text{H}^+ \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{HS}^-$	EQUILIBRIUM: $K_{\text{ZnS}}$

Por otra parte, se menciona que las condiciones de química de las zonas de agua inicial se fijan en función de los datos que se disponen del punto de control 3. Estas condiciones no han sido especificadas en la memoria del proyecto. Tampoco se mencionan el tipo de condición para la química del agua. Como condición inicial para las aguas de poro se ha considerado el equilibrio con magnetita. Esto probablemente se ha impuesto por problemas de convergencia del modelo, pero se considera una restricción poco realista, teniendo en cuenta las propiedades termodinámicas y solubilidades de dicho mineral, y la composición mineralógica del relave. Por otra parte, esas condiciones de equilibrio exigen unas concentraciones de Fe en las aguas de poro iniciales que son altamente irrealistas. Los equilibrios con ferrihidrita, u otro hidróxido de Fe amorfo, hubieran sido mucho más realistas.

Respecto a la composición mineralógica de las zonas minerales sorprende que, después de disponer de los ensayos analíticos de un buen número de óxidos de Fe, y disponer de la composición mineralógica de un relave procedente de la operación de la Planta de Pellets de CAP (y de la información proporcionada por CAP), únicamente se considere como minerales reactivos presentes en el relave magnetita y crisocola. Ya se ha mencionado que se duda de la representatividad de la presencia de crisocola en el relave (los mismos autores del estudio lo ponen en relevancia). También sorprende que no se hayan considerado otras fuentes de Fe para las soluciones, ya que el relave también está teóricamente compuesto de magnetita, hematites, pirita, rutilo, y calcopirita, principalmente, y covelina, calcosina, ilmenita e hidróxidos de hierro, como fases secundarias y/o trazas. Tampoco se ha incluido un mineral cuya solubilidad pueda limitar las concentraciones de Fe en solución, como sería el caso de los hidróxidos amorfos. Hay que mencionar que en algunos escenarios se ha añadido la siderita, pero su precipitación está fuertemente condicionada por la

alcalinidad de las soluciones resultantes. En este sentido, creemos que se estaría maximizando el valor de las concentraciones de Fe en los cálculos donde no se ha implementado sulfato-reducción.

Como se ha mencionado anteriormente, se ha supuesto un escenario de precipitación de siderita en el relave. Según ha sido justificado por los resultados de los ensayos analíticos anteriormente descritos, se ha implementado este mecanismo para explicar las concentraciones analíticas de Co, Ni y Zn por co-precipitación en el carbonato. Las concentraciones de estos componentes no aumentan en los viales de manera asociada a la subida de las concentraciones de Fe. En este sentido, no se entiende como se ha simulado la posibilidad de precipitar siderita en los modelos, y no se haya implementado las reacciones de co-precipitación de los componentes anteriormente mencionados. Es por esto que las concentraciones de los elementos trazan anteriormente citados deben considerarse como maximizadas.

### **Escenarios**

Los diferentes escenarios que han sido modelizados no cuentan con el suficiente soporte técnico que justifique su elección. Se asumen ciertas decisiones (modelizar únicamente magnetita como óxido de Fe, incluir crisocola y siderita en algunos modelos, por ejemplo), sin justificarlo de manera adecuada. En general, se asume que:

- Durante los 50 años previstos para la vida útil de los vertidos no podrán desencadenarse reacciones de sulfato-reducción por la no proliferación de materia orgánica en el depósito.
- Después del cese de los vertidos proliferará materia orgánica en el depósito, lo que modificará las condiciones redox del depósito, y podrá desencadenarse las reacciones de sulfato-reducción.

Se comenta la existencia de modelos a 200 m de profundidad y a 800 m. Sin embargo, en la redacción del informe no se mencionan los resultados obtenidos con los modelos a 800 m. Es de suponer que los resultados deban variar de manera sustancial, ya que un aspecto identificado como clave para el desarrollo de las reacciones de disolución reductiva, el estado redox del sistema, varía sustancialmente en ambos modelos. A falta de información analítica del lugar, hay que suponer que la franja de mínimo oxígeno se da entre los 200 y los 500 m. A 800 m de profundidad, los niveles en las concentraciones de oxígeno aumentarían.

### **Resultados y Análisis de Impactos**

Los resultados obtenidos con los cálculos numéricos son los previsible, teniendo en cuenta la simplicidad de los modelos conceptuales implementados en los cálculos. El objetivo de los cálculos es simular los mecanismos de reacción por acoplamiento de diferentes procesos, y llegar así a una estimación de las tasas de liberación de solutos a las aguas. Sin embargo, la excesiva simplicidad de los modelos, y el desacoplamiento de procesos (equilibrios redox, mecanismos de transporte en las aguas marinas, entre otros) hacen que los resultados obtenidos no puedan ser representativos ni del material que se tendría previsto depositar, ni de las condiciones ambientales en el lugar de la depositación, ni de la complejidad de los procesos que se deberían simular. Por otra parte, como se ha argumentado anteriormente, se han formulado una serie de hipótesis irrealistas que contribuyen a la maximización de las concentraciones de Fe y los elementos traza en las aguas de poro.

Como se ha mencionado anteriormente, no se han incluido los resultados obtenidos con los modelos a 800 m. Probablemente, considerando las mismas tasas de reacción, en este escenario las concentraciones obtenidas hubieran sido mucho más bajas, por el simple efecto de la difusión de los solutos en una columna de agua mucho mayor que la considerada para los 200 m. También resulta

obvio que, si no se incluyen reacciones de co-precipitación de elementos traza en el escenario que supone la precipitación de siderita, la concentración de estos no varíe, a pesar del descenso en las concentraciones de Fe. En general, se ha dado mucho énfasis a los resultados obtenidos con hipótesis y escenarios muy poco realistas. Y se ha supuesto, en cualquier caso, que todos los elementos traza que se acumulan en la columna de agua modelizada en condiciones que no son las del agua marina en contacto con el depósito de relaves, son biodisponibles.

## 5 Conclusiones y Recomendaciones

Con independencia de las incorrecciones cometidas en la ejecución de los análisis de laboratorio, y la simplicidad y la poca representatividad de los modelos numéricos, los resultados obtenidos en el marco del proyecto no pueden considerarse como representativos de los procesos que se han querido simular. Esto es consecuencia de (1) la baja representatividad del material ensayado con respecto a los relaves presentes y futuros, y (2) la no inclusión en los ensayos y los modelos de la caracterización específica del medio marino en la zona de los potenciales vertidos. En este sentido, los resultados obtenidos no pueden considerarse como referencia para la evaluación medioambiental del proyecto que CAP presentó a la Autoridad para actualizar el sistema de depositación de relaves de la Planta de Pellets.

Sorprende que, con todas las limitaciones que han sido enumeradas, se formulen conclusiones que pueden ser demasiado alarmistas, y que están pobremente sustentadas técnicamente. En general, (1) se pone énfasis en los procesos que maximizan las tasas de liberación de metales, (2) sólo se consideran a nivel conceptual las reacciones de fijación de dichos metales, como co-precipitación, y/o sorción, o (3) se omiten los fenómenos de dispersión de dichos componentes en las aguas marinas. En este sentido, también se afirma que los metales liberados por las reacciones de disolución reductiva de los óxidos de Fe podrían ser biodisponibles. Entre ellos, el Cu procedente de la existencia no representativa de la crisocola en los relaves. También se afirma que el aporte de Fe a las aguas podría causar la expansión de la zona de mínimo oxígeno, alterando el ecosistema costero. Se habla de efectos globales, cuando el volumen de los vertidos es muy limitado, en comparación con el volumen de las aguas oceánicas que potencialmente podrían verse afectadas. Es curioso como los fenómenos de advección y dispersión de los solutos generados por las reacciones no han sido tenidos en consideración en los cálculos efectuados mediante los modelos numéricos. Sin embargo, sí se mencionan para predecir que en caso de co-precipitación de sulfuros en un ambiente anóxico con sulfato-reducción, la existencia de corrientes marinas podrían transportar aguas oxigenadas que pudieran disolver los sulfuros, liberando, de nuevo, estos componentes a las aguas. En definitiva, el discurso desarrollado a partir de la interpretación de los resultados parece dirigido a resaltar los posibles aspectos negativos del vertido de los relaves, sin presentar un apoyo técnico riguroso que pueda considerarse de manera objetiva para la toma de decisiones.

Como parte de las recomendaciones que se pueden plantear a partir del análisis crítico de las tareas reportadas del proyecto se recomendaría el desarrollo de un nuevo proyecto debidamente ejecutado. Esto incluiría:

- Recopilación de todos los antecedentes que CAP dispone referentes a la caracterización geoquímica de sus relaves, del medio marino en la Ensenada Chapaco, y del plan de producción de los futuros relaves. Estos deben ser incluidos como antecedentes del estudio.
- Caracterización geoquímica de los relaves presentes y futuros que debieran ser depositados el nuevo contexto de DSTP propuesto por CAP.
- Caracterización físico-química y biológica del enclave de los potenciales vertidos.
- Diseño de ensayos de laboratorio específicos con muestras de relaves representativas de la producción presente y futura de la Planta de Pellets, y que reproduzcan las condiciones ambientales anteriormente caracterizadas. Estos ensayos deben incluir variantes para los análisis de sensibilidad de las variables que se definan al efecto. Estos ensayos, como los de caracterización de las muestras de los relaves, deberían ser ejecutados en laboratorios

debidamente certificados que permitan un seguimiento, día a día, de los ensayos por parte de los responsables del desarrollo del proyecto.

- Como resultado de los ensayos de laboratorio se deben formular las leyes empíricas correspondientes a las cinéticas resultantes de las tasas de liberación obtenidas. Para esto se propone la modelización de los ensayos de laboratorio, tomando como parámetros de calibración los resultados obtenidos durante el seguimiento de los ensayos.
- Con los residuos de los ensayos realizados, se recomienda implementar técnicas analíticas de caracterización geoquímica y mineralógica. Con esto, y tomando como valor de referencia la caracterización inicial de las muestras antes de los ensayos, se podrían identificar los procesos geoquímicos acaecidos en la muestra durante los ensayos, y confirmar las hipótesis realizadas mediante la interpretación de los resultados.
- Posteriormente, se recomendaría seleccionar un código numérico y una base de datos que permita implementar las condiciones marinas en el sector de la depositación del material, con el objetivo de evaluar las concentraciones de las especies metálicas que pueden ser liberadas a las aguas durante las diferentes etapas de operación del depósito. También sería necesario seleccionar el equipo de modelización con experiencia en el uso de dicho código.
- La evaluación de los resultados y el análisis de impacto tendría que ser realizado por un equipo de profesionales especializado en eco-toxicología marina.

Por otra parte, creemos que sería un buen antecedente de los estudios que se proponen caracterizar los procesos geoquímicos que han podido sufrir los relaves que ya han sido depositados en la Ensenada de Chamaco durante los años de operación de la Planta de Pellets. Como un antecedente del estudio que se ha evaluado, se ha mencionado que los vertidos de relaves en la Ensenada de Chapaco han liberado diferentes elementos traza al medio marino: “En la primera adenda del EIA se presentó un nuevo estudio de la interfase de relaves y columna de agua en la Ensenada de Chapaco ejecutado por la Dra. Práxedes Muñoz, UCN. Este estudio claramente indica la liberación de elementos como Fe, Mn y Cu de los relaves al agua de los poros del sedimento y un flujo neto positivo de Fe y Mn a la columna de agua, sugiriendo que la disolución reductiva libera elementos de los relaves depositados en la Ensenada Chapaco en las últimas décadas por la empresa minera CAP”. Se entiende que la depositación del relave hasta la fecha de hoy se ha realizado en ambiente óxico y que, por lo tanto, no se habría producido al disolución reductiva de los óxidos de Fe. En caso que se haya producido esa liberación de elementos traza, podría ser consecuencia de otros procesos. En este sentido, sería preciso identificar los mecanismos que han podido afectar al relave ya depositado.

## 6 Referencias

CAP (2016). Aspectos Geológicos, Mineralógicos y Geoquímicos del Relave de la Planta de Pellets. EIA Proyecto Actualización del Sistema de Disposición de Relaves de la Planta de Pellets de Huasco. Autores: Jorge Alarcón y Mayasil García.

Saaltink, M.W., Ayora, C., y Carrera, J. (1998). A Mathematical formulation for reactive transport that eliminates mineral concentrations. *Water Resources Research*, 34 (7): 1649-1656.

SERNAGEOMIN (2015). Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Sernageomin, Corfo, Fundación Chile.

## 7 CV del Equipo Revisor

La revisión crítica del informe del proyecto “Estudio de las reacciones producidas en sedimentos y columna de agua por descargas mineras que afecten los recursos hidrobiológicos marinos” ha sido realizada por:

### **Marcela Curotto**

Ingeniero Civil Químico y Licenciada en Ciencias de la Ingeniería, con 18 años de experiencia profesional en temas ambientales mineros, habiendo participado en proyectos para el área minera, obras civiles y agroindustria. Se ha desempeñado como Jefe de Proyectos e Ingeniera Especialista en Planes de Cierre en el marco de la ley 20.551, Estudios Ambientales, Estudios Geoquímicos. Ha realizado asesorías en ingeniería ambiental en el planteamiento de soluciones ambientales para ingeniería de proyectos a nivel Conceptual, Básica y de Detalles, así como en caracterización geoquímica de materiales de botaderos, relaves, caracterización de la calidad del agua, manejo de residuos, estimación de emisiones. Se ha especializado en caracterización geoquímica, manejo de residuos sólidos (peligrosos y no peligrosos) de procesos mineros y metalúrgicos; caracterización, manejo y tratamiento de residuos industriales líquidos y aguas residuales, monitoreo de calidad de agua, así como también legislación ambiental, evaluación ambiental, y auditoría ambiental. Ha participado en la ejecución Due Diligence y documentos ro públicos para transacciones en la bolsa de valores (NI 43101).

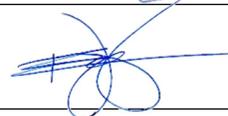
### **Joaquín Salas**

Geoquímico Sénior del Área de Geoquímica de SRK Consulting (Chile). Geólogo (Universidad de Barcelona; 1994), y Doctor en Ciencias (Universidad Politécnica de Cataluña, 2002), tiene más de 15 años de experiencia profesional en temas relacionados con la geoquímica de residuos mineros, caracterización de rocas, aguas naturales, y modelación de transporte reactivo. Ha realizado trabajos de gestión y caracterización de ambientes contaminados por diferentes tipos de residuos, y en proyectos de gestión medioambiental ligados al desarrollo de trabajos mineros. También ha trabajado en el análisis hidrodinámico de balance de aguas y sus interacciones, especialmente enfocado en la creación de herramientas numéricas de gestión hídrica. Ha usado códigos numéricos para simular la evolución hidro-termo-geoquímica de aguas subterráneas en eventos de formación de yacimientos minerales y facies diagenéticas, evolución a largo término de residuos radioactivos, y problemas medioambientales ligados al drenaje ácido de minas y contaminación de suelos. Ha realizado caracterización geoquímica de materiales de botadero, relaves, y paredes de rajo en faenas mineras, así como en la caracterización de la calidad del agua de los efluentes e infiltraciones derivados de las instalaciones mineras.

## SRK Registro de Distribución

No. de Informe	07-2362-16
Revisión	A
Emitido para	Revisión
No. de Copia	Digital

Nombre/Cargo	Empresa	Copia(s)	Fecha	Elaborado por	Firma
C. Masson	CMP	Digital	26-05-17	J. Salas	
archivo	SRK	1	26-05-17	J. Salas	

Revisión Técnica:	M. Curotto	
Jefe de Área:	M. Curotto	
Firma de Aprobación para envío a Cliente:	E. Hormazabal	

Este informe está protegido por derecho de autor por parte de SRK Consulting. Prohibida su reproducción o transmisión en cualquier forma o por cualquier medio a cualquier persona sin previa autorización escrita de SRK Consulting.

### Control de Cambios

No. de Informe	
No. de Copia	

Fecha	Rev	Cambio(s)	Elaborado por	Firma

Firma de Aprobación:		
----------------------	--	--



---

# REVISIÓN DE UNA PROPUESTA DE ESTUDIO CIENTÍFICO PARA DETERMINAR EL POTENCIAL PARA LIXIVIACIÓN DE LOS RELAVES MINEROS EN CHILE

---

**Edición 04**

**Mayo, 2016**



Compañía Minera del Pacífico

**Compañía Minera del Pacífico  
(CMP)**

SAMS Research Services Ltd.

Registered Office: Lismore Suite, Malin House,  
The European Marine Science Park, Oban, Argyll PA37

1SZ T: +44 (0) 1631 559470 F: +44 (0) 1631 559001

E: [info@srsi.com](mailto:info@srsi.com) W: <http://www.srsi.com>

Vat Registration No GB 828 9579 61 Company Registered in Scotland No. SC224404



<b>Título del Informe</b>	Revisión de una propuesta de estudio científico para determinar el potencial para lixiviación de los relaves mineros en Chile
<b>Nombre del Proyecto</b>	ChileAqua 3
<b>Cliente</b>	Compañía Minera del Pacífico (CMP)
<b>Referencia de Proyecto</b>	UI01830
<b>Número del Documento</b>	12345 0001

### Historia de la Revisión

Revisión	Cambios	Fecha
A	Primera emisión de borrador para revisión interna	01/04/2016
01	Primera emisión para el cliente	08/04/2016
01A	Revisiones de 01 comentario para revisión interna	05/05/2016
02	Segunda emisión para el cliente	09/05/2016
02A	Revisiones de 02 comentarios para revisión interna	27/05/2016
03	Tercera emisión para el cliente	27/05/2016
04	Cuarta emisión para el cliente	01/06/2016

	Nombre	Fecha
<b>Autor</b>	Lindsay Vare, Tracy Shimmiel	05/05/2016
<b>Verificado por</b>	Tracy Shimmiel	05/05/2016
<b>Aprobado por</b>	Mark Hart	01/06/2016

El presente informe fue producido por SRSL para su cliente, Compañía Minera del Pacífico (CMP), con el fin específico de revisar una propuesta de estudio científico. El presente informe no podrá ser utilizado por persona alguna aparte del Cliente de SRSL sin su autorización expresa. En cualquier caso, SRSL no acepta responsabilidad alguna respecto de ningún costo, pasivos o pérdidas que surjan como resultado del uso de o de haber confiado en los contenidos del presente informe por cualquier persona a excepción de su Cliente.

SAMS Research Services Ltd. (SRSL), Lismore Suite, Malin House, The European Marine Science Park, Dunbeg, Oban, Argyll, PA37 1SZ.

**ÍNDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
1.1	Antecedentes del Proyecto .....	4
1.2	Propósito del Documento .....	4
<b>2</b>	<b>VISIÓN GENERAL DE LA PROPUESTA CIENTÍFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Meta y Objetivos .....	5
2.2	Metodología propuesta para cada Objetivo.....	6
<b>3</b>	<b>REVISIÓN Y CRÍTICA DETALLADA DE LAS METODOLOGÍAS/ENFOQUES CIENTÍFICOS PRESENTADOS EN LA PROPUESTA .....</b>	<b>9</b>
3.1	Introducción a la Propuesta .....	9
3.2	Metodología .....	12
<b>4</b>	<b>RESUMEN .....</b>	<b>18</b>
	Visión general del presente Informe.....	18
<b>5</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Apéndice 1 .....</b>	<b>20</b>

**Siglas & Abreviaciones**

CIMNE	Centro Internacional para Métodos Numéricos en la Ingeniería
DSTP	Disposición Marina Profunda de los Relaves
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EIS	Declaración de Impacto Ambiental
ICP-AES	Espectroscopía de Emisión por Plasma de Acoplamiento Inductivo
ICP-MS	Espectrometría de Masas por Acoplamiento Inductivo
IDÆA-CSIC	Instituto de Evaluación Ambiental e Investigación Hídrica
LC/LP	Convenio de Londres y su Protocolo
PHREEQC	pH-REdox-EQUilibrium (sigla original, sin embargo el programa ha evolucionado para incluir la capacidad de modelar reacciones cinéticas y transporte en 1D)
SAMS	Asociación Escocesa de las Ciencias Marinas
SEIA	Servicio de Evaluación Ambiental
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SRSL	Servicios de Investigación SAMS Ltda.
STD	Disposición Submarina de Relaves
SUMIRCO	Investigación y Consultoría Minera Sustentable
USGS	Servicio de Levantamientos Geológicos de los Estados Unidos
XRD	Difracción de Rayos X

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes del Proyecto

1.1.1 La Planta de Pellets de Huasco, de propiedad de, y operada por la Compañía Minera del Pacífico (CAP Minería), es la mayor productora de mineral de hierro de Chile. Entre el inicio de las operaciones mineras en 1978 y hasta 1994, los relaves mineros fueron descargados directamente a la zona inter-mareal de la Ensenada de Chapaco. Luego de evaluar otras opciones, CAP Minería se volcó al sistema de la Disposición Submarina de los Relaves (STD) (25-35 metros bajo el nivel del mar) como método alternativo. Esta técnica de descarga eliminó la turbidez en las aguas inmediatas de la bahía, permitiendo la recuperación de los ecosistemas intermareales y submareales.

1.1.2 Dado el desarrollo a nivel mundial de las opciones para la Disposición Marina Profunda de los Relaves (DSTP), CAP Minería ha comenzado a evaluar las ventajas/desventajas de la DSTP en comparación con la STD.

1.1.3 Como alternativa a la actual STD, CAP Minería ha propuesto una nueva opción para la disposición DSTP de los relaves. El nuevo proyecto considera la colocación de los relaves a una distancia de 6.6 km de la costa, a una profundidad en el agua de entre 200 y 800 m, para una vida útil de proyecto DTSP de 50 años.

En Julio de 2013, CAP Minería presentó la Declaración de Impacto Ambiental (EIS) correspondiente al nuevo proyecto de DTSP, el cual se encuentra en la actualidad bajo evaluación. En respuesta a la información contenida dentro de la EIS, el Subsecretario de Pesca de Chile (SubPesca) comisionó un estudio científico para determinar el potencial para lixiviación de los relaves mineros. En calidad de tal, fue producida una propuesta técnica titulada “*Estudio de las reacciones entre los sedimentos y la columna de agua de las descargas mineras que afectan los recursos marinos hídricos*” escrito por Bernhard Dold, SUMIRCO (licitación 4728-81-LP15).

1.1.4 SAMS Research Services Ltd. (SRSL) ha sido contratada por parte de CAP Minería para entregar una revisión científica independiente de esta propuesta técnica.

1.1.5 La experiencia y competencia de SRSL puede ser tenida a la vista en el Apéndice 1, junto con el CV del Dr. Tracy Shimmield, el principal revisor del presente informe.

## 1.2 Propósito del Documento

1.2.1 El presente informe entrega una revisión científica independiente de la propuesta técnica “*Estudio de las reacciones entre los sedimentos y la columna de agua por las descargas mineras que afectan a los recursos marinos hídricos*” (de ahora en adelante conocido como la Propuesta) y que incluye a los siguientes elementos:

- Una visión general de la Propuesta científica, sus principales objetivos y resultados
- Una revisión y crítica detallada de las metodologías/ enfoques científicos presentados en la Propuesta científica

## 2 VISIÓN GENERAL DE LA PROPUESTA CIENTÍFICA

### Meta y Objetivos

- 2.1.1 La meta principal de la Propuesta es investigar las reacciones que ocurren entre el sedimento marino y la columna de agua al agregar los desechos de relaves mineros.
- 2.1.2 Para lograr la meta principal, la investigación incluirá seis objetivos específicos:
1. **Revisión de la literatura:** Un estudio detallado de la literatura científica, llevado a cabo para evaluar el cuerpo actual de los conocimientos científicos acerca de la interacción de los óxidos de hierro dentro del ambiente marino.
  2. **Tests de laboratorio de la fase 1:** Tests mono minerales simples con óxidos de hierro (p. ej. magnetita, hematita y goethita) que representan fuentes potenciales de contaminación dentro de los relaves. Tests por ser completados bajo condiciones similares a aquellas que se encuentran en el lecho marino, para determinar la disolución reductora de los óxidos de hierro en el lecho marino.
  3. **Tests de laboratorio de la fase 2:** Tests realizados con relaves mineros. Al igual que en el Objetivo 2, los tests por ser llevados a cabo bajo condiciones similares a aquellas que se encuentran en el lecho marino, para determinar la disolución reductora de los relaves mineros en el lecho marino.
  4. **Evaluación de la especiación y biodisponibilidad:** Una evaluación de la especiación y biodisponibilidad de los elementos liberados desde los minerales y relaves mineros a continuación de los tests de laboratorio llevados a cabo en los Objetivos 2 y 3.
  5. **Metodología propuesta:** Un esquema para una metodología propuesta para el estudio del comportamiento del azufre en el ambiente marino. Puede que el lecho marino contenga oxígeno disuelto; bajo estas condiciones, los sulfuros presentes en los relaves (piritas, arsenopiritas, calcopirita, bornita, calcocita, molibdenita, etc.), pueden ser una fuente de contaminación.
  6. **Difusión:** Difusión de los resultados, incluyendo un taller y publicaciones científicas.
- 2.1.3 El equipo de la Propuesta está formado por el Profesor Dr. Bernhard Dold, el Profesor Dr. Carlos Ayora, el Profesor Dr. Maarten Saaltink, el Dr. Jordi Bed, el Dr. Jordi Palau y la Dra. Ester Torres. El grupo de investigadores será subcontratado por parte de SUMIRCO (Sustainable Mining Research y Consultancy) (*Consultorías e Investigaciones Mineras Sustentables*) vía el Centro Internacional para Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), la Universidad Politécnica de Barcelona (UPC), Barcelona, España. El análisis experimental será llevado a cabo en los laboratorios del Instituto de Evaluación Ambiental e Investigación Hídrica (IDÆA-CSIC), Barcelona, España.
- 2.1.4 El SRSL no conoce a los científicos involucrados en la presente Propuesta. Sin embargo, se ha realizado una búsqueda simple en internet. Los científicos provienen de un rango de instituciones relacionadas con la geoquímica, la

biogeoquímica y la hidrogeología, incluyendo un científico especializado en modelamiento y métodos numéricos. La credibilidad de los científicos a partir de una breve investigación, parece ser elevada en las disciplinas correspondientes, incluyendo la experiencia previa en descargas marinas.

## 2.2 Metodología Propuesta para cada Objetivo

### Revisión de la literatura

- 2.2.1 Se acometerá una revisión completa de la literatura existente, incluyendo, entre otros, la investigación de fuentes de información públicas chilenas (SERNAGEOMIN, SEIA), y de bases de datos científicas internacionales pertinentes (Web of Science, Scopus, Science direct, Georef).
- 2.2.2 La información cotejada será analizada por parámetros que incluyen: tipo de depósito, tipo de relave y su composición y cantidad, tiempo de exposición dentro del ambiente marino, características oceanográficas de la descarga, efectos documentados y si hay actividades de remediación. Cualquier regulación legal también será evaluada.
- 2.2.3 Se reunirá un equipo de expertos nacionales e internacionales para prestar apoyo adicional al proyecto. Se pondrá énfasis especial en encontrar expertos idóneos en oceanografía y ecología marina (eco toxicología en particular).

### Tests de Laboratorio de la Fase 1

- 2.2.4 Se realizará un estudio mono mineral de los óxidos de hierro (magnetita, hematita y goethita) a fin de determinar la cinética de la disolución reductora de los minerales. Los tests se llevarán a cabo en un ambiente que simula las condiciones marinas del sitio de interés.
- 2.2.5 La composición mineralógica/ elemental de las muestras mono mineral será determinada mediante la difracción de rayos X (XRD) y microsonda electrónica (EMP). Estos análisis serán realizados antes del inicio de pruebas de laboratorio, y nuevamente luego de que las pruebas se hayan llevado a cabo. Esto contribuirá a determinar si ha habido algún cambio geoquímico o mineralógico en la fase sólida.
- 2.2.6 Las muestras mono mineral serán expuestas a un rango de condiciones ambientales en celdas cerradas controladas, las cuales serán anóxicas, oscurecidas, con un pH registrado de 8 y a una temperatura constante de 10°C.
- 2.2.7 Se prepararán las siguientes pruebas:
- i. Magnetita y agua des ionizada (control)
  - ii. Magnetita y agua de mar sintética
  - iii. Magnetita, agua de mar y bacterias marinas *Shewanella* spp.
  - iv. Magnetita, agua de mar y acetobacterias (materia orgánica)
  - v. Hematita y agua des ionizada (control)
  - vi. Hematita y agua de mar sintética
  - vii. Hematita, agua de mar y bacterias marinas *Shewanella* spp.
  - viii. Hematita, agua de mar y acetobacterias (materia orgánica)
  - ix. Goethita agua des ionizada (control)
  - x. Goethita y agua de mar sintética
  - xi. Goethita, agua de mar y bacterias marinas *Shewanella* spp.
  - xii. Goethita, agua de mar y acetobacterias (materia orgánica)

- 2.2.8 Respecto de todos los tests anteriores, se tomará una muestra a varios intervalos de acuerdo con el siguiente cronograma: cada 5, 10, 15, 30, 60 minutos, cada 2, 4, 6, 8, 16, 26 horas, cada 2, 3, 5, 7 días, cada 2, 3, 4 semanas, y luego una muestra cada mes hasta el término de los tests de laboratorio (un año). Esto es igual a  $36 \times 12$  muestras = 432 muestras de agua.
- 2.2.9 Cada muestra de agua tomada será analizada respecto de su pH, Eh y composición de elementos mediante análisis llevado a cabo por (ICP-AES) y por Espectrografía de Masas (MS). El control de calidad será asegurado mediante calibración de acuerdo con las normas internacionales.
- 2.2.10 La estrategia de muestreo permitirá una comprensión de la liberación estequiométrica de ciertos elementos de la estructura cristalina de los mono minerales, mediante procesos de desorción de la solución dependiendo de su superficie.

### **Tests de Laboratorio de la Fase 2**

- 2.2.11 De haber disponible relaves mineros de la Planta de Pellets de CAP en Huasco, se llevarán a cabo experimentos idénticos a los propuestos de Los Bronces-Andina, El Teniente, respecto de estos mono minerales (destacados más arriba). Sin embargo, en vez de mono minerales, la materia orgánica marina y la comunidad bacteriana asociada a los relaves mineros serían utilizados para inoculación.

### **Evaluación de la Especiación y Biodisponibilidad**

- 2.2.12 A partir de los resultados de las pruebas de laboratorio, se analizará la liberación de elementos tóxicos. El modelamiento acuoso se llevará a cabo utilizando el modelo PHREEQC (La sigla representa las capacidades originales del modelo pH-REdox-EQuilibrium, el programa ha evolucionado ahora para incluir la capacidad de modelamiento de reacciones cinéticas y del transporte en 1D).
- 2.2.13 El modelo calculará la tasa de transferencia de los contaminantes entre el sedimento y el ambiente marino. El impacto eco toxicológico potencial de los elementos liberados por los relaves sobre el ecosistema marino será discutido.

### **Metodología Propuesta**

- 2.2.14 Dada la existencia de oxígeno disuelto en el lecho marino, los sulfuros presentes en los relaves pueden representar una fuente potencial de contaminación. Se propondrá una propuesta de metodología para evaluar la disolución oxidativa de los sulfuros en los mono minerales y en las muestras de los relaves mineros. Los experimentos propuestos serían llevados a cabo bajo condiciones controladas, con agua de mar sintética, concentraciones variables de oxígeno disuelto y con la presencia y ausencia de bacterias *Acidithiobacillus*.

**Difusión**

- 2.2.15 Los resultados de esta Propuesta serán divulgados a los miembros del equipo en la Subpesca (Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, Chile), con un taller a continuación para la difusión de los resultados. Además los resultados serán presentados en conferencias nacionales e internacionales y publicados en revistas científicas de alto impacto.

### **3 REVISIÓN Y CRÍTICA DETALLADA DE LAS METODOLOGÍAS/ ENFOQUES CIENTÍFICOS PRESENTADOS EN LA PROPUESTA**

#### **3.1 Introducción a la Propuesta**

- 3.1.1 La introducción identifica correctamente la necesidad de contar con medios alternativos para la gestión de los desechos de relaves mineros, reconociendo que Chile tiene un problema mayor respecto de la gestión de relaves debido a la falta de terrenos disponibles para la construcción de represas para el almacenamiento de los relaves mineros. También la Propuesta reconoce que la presión pública sobre la gestión de los relaves mineros en Chile ha alcanzado un punto crítico para las operaciones mineras.
- 3.1.2 La Propuesta indica que la DSTP está prohibida en la mayoría de los países, especialmente en los países que han ratificado el Protocolo de Londres. Es importante tener en cuenta que el Convenio de Londres y su Protocolo (LC/LP) no cubre las descargas de fuentes basadas en tierra tales como tuberías y emisarios, los residuos generados en forma incidental a las operaciones normales de embarcaciones, o la colocación de materiales para fines distintos de su mera eliminación, siempre que dicha eliminación no sea contraria a las metas del convenio. Por lo tanto el Convenio de Londres no se aplica directamente a la DSTP.
- 3.1.3 Aunque las descargas de tuberías y otras fuentes terrestres de contaminación marina exceden el alcance regulatorio de LC/LP, se debe tomar nota que por parte de Grupos de Científicos de LC/LP, frecuentemente la descarga de dichos relaves va más allá del alcance de cualquier control regulatorio internacional efectivo. El LC/LP ha estado interesado en la eliminación fluvial y submarina de los relaves y residuos asociados, incluyendo la cooperación de la Secretaría de LC/LP en la Organización Marítima Internacional (IMO) con la cooperación de UNEP del GPA LC/LP, en la recolección de información sobre la materia. La Secretaría de LC/LP comisionó un informe sobre el tema, el cual fue presentado a los Grupos Científicos de LC/LP y se discutió en las reuniones de LC/LP en Noviembre de 2013.
- 3.1.4 Los Grupos Científicos de LC/LP estuvieron de acuerdo que existe una necesidad de dirección internacional y/o de códigos de conducta por ser desarrollados, pero según lo que GESAMP señaló, hay una brecha de gobernanza y no está claro cuál organismo internacional debería tomar la delantera. El LC/LP acordó establecer un grupo de correspondencia entre los períodos de la sesiones.
- 3.1.5 La preocupación internacional condujo a un taller internacional que tuvo lugar en Junio de 2015 en Perú, conducido por IMO-GESAMP y co-organizado por el proyecto MITE-DEEP (financiado por el Concejo de Investigación Noruego y el INDEEP) y la iniciativa de la DSTP chilena. El informe final del Taller actualmente está siendo preparado por parte de la Oficina de GESAMP Office y la Secretaría LC/LP. Además hay un grupo de trabajo en proceso del desarrollo de pautas; el

grupo es conducido por Perú. En la Tabla 1 se puede encontrar un resumen de la legislación.

**Tabla 1: Resumen de la legislación LC/LP**

<b>Puntos claves de la legislación LC/LP</b>
- La eliminación de los residuos de la minería en el mar ha sido permitida en muchas minas a nivel mundial en países signatarios del LC/LP.
- A pesar de la obligación de los organismos rectores bajo el LC/LP, de abordar todas las fuentes de contaminación marina, las descargas de tuberías y otras fuentes terrestres de contaminación marina caen fuera de su alcance regulatorio. Aunque tal como se indicó anteriormente, la eliminación de los relaves mineros ha sido reconocida como un tema mayor y actualmente está siendo abordado.
- El 'Dumping' dentro del LC/LP se define como la eliminación en el mar que tiene lugar a partir de las embarcaciones, aeronaves, plataformas y otras estructuras hechas por el hombre.
- Los residuos de la minería se incluyen si son descargados desde una embarcación, pero no si provienen de una tubería o estructura fija conectada a la tierra sólida. De hecho, frecuentemente la descarga de dichos residuos puede estar más allá de cualquier control regulatorio internacional efectivo, a pesar del claro potencial, en algunos casos, de contaminación de los ambientes marinos.
- Además, el LC/LP permite el vertimiento de 'materiales geológicos inertes'. Aunque no se encuentra definido dentro del LC/LP, " <i>generalmente se entiende que el foco se encuentra sobre los residuos provenientes de las actividades mineras</i> ".
- Las organizaciones mineras en el pasado han destacado esto, argumentando que los relaves mineros son de origen geológico, también son 'inertes', y por lo tanto no contravienen el LC/LP.

3.1.6 El LC/LP ha emitido las "*Pautas específicas para la evaluación de material inerte, inorgánico, geológico*" pero no define qué constituye dicho material. Sin embargo, generalmente se entiende que el foco está sobre los residuos resultantes de las actividades mineras.

3.1.7 El tema más pertinente que abordan las pautas del LC/LP e la minimización de los residuos y la minimización de los impactos físicos del material al ser vertido (p. ej. la sofocación de los organismos marinos, etc.).

3.1.8 Por lo tanto, aunque el LC/LP actualmente no se aplica a la DSTP, es probable que en el futuro se entreguen pautas. Por lo tanto, debe realizarse una caracterización detallada de los residuos, para que se pueda efectuar una evaluación apropiada de sus impactos potenciales sobre la salud humana y el medioambiente.

- 3.1.9 La Propuesta resume el uso de las descargas de relaves mineros en el mar, declarando con precisión que en Chile solamente hay un sitio de descarga marina activo, el cual se ubica en la Ensenada Chapaco (CAP Minería). Es la planta de pellets la que está presentando un plan para el uso de la DSTP. Debe tenerse en cuenta que la planta de pellets concentra a los 'pre concentrados' que son procesados en el sitio de la mina en Los Colorados, la mayor parte de los residuos iniciales permanece en el sitio de la mina.
- 3.1.10 La Propuesta establece "que la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto DSTP (CMP) sugiere que el depósito de los relaves de la planta de pellets de óxido de hierro (principalmente hematita y magnetita) de Chapaco ha producido la liberación al ambiente marino de elementos tóxicos asociados a estos minerales". La referencia provista en la Propuesta, Nystroem & Henriquez, 1994, discute las características magmáticas de los minerales de hierro del tipo Kuruna en Chile; estos no están directamente relacionados a los relaves mineros y la referencia no se refiere a los elementos tóxicos. Es difícil evaluar la declaración al comienzo de esta sección (3.1.11), sin una referencia relevante. La Propuesta debería incluir una referencia a la sección de la EIA que sugiere la liberación de elementos tóxicos al ambiente marino. Esto permitiría la identificación del origen de la declaración y permitiría investigar la calidad de la información utilizada para derivar aquella conclusión. El uso del término elementos tóxicos también debe ser utilizado con precaución. Los metales son elementos que ocurren en forma natural; su toxicidad depende de varios factores, incluyendo la dosis, ruta de exposición y especie química, además hay que considerar el tipo de especie (dentro de esto, edad, género y genética).
- 3.1.11 Se indica que los relaves no están compuestos principalmente por hematita y magnetita. Hay cinco minerales que constituyen más del 70% de la fase sólida de los relaves, y ellos son clinocloro, paragasita potásica, actinolita, ferrita magnésica y anortita; los silicatos constituyen la clase más abundante (CAP Minería, 2013).
- 3.1.12 La introducción a la Propuesta indica que hay grandes depósitos de tipo pórfido de cobre dentro de los depósitos de mineral de hierro, que contienen otros metales. Es importante que haya un conocimiento profundo de la composición de los relaves para entender su comportamiento en el ambiente marino. Además es importante que el ambiente marino y el lugar de disposición también sean bien entendidos. En el caso que los estudios experimentales no sean llevados a cabo con relaves de la Planta de Pellets de Huasco de CAP, bajo condiciones prevalentes similares al ambiente al cual estarán expuestos, cualquier información recolectada no podrá ser directamente comparada con la situación en la planta de pellets.
- 3.1.13 Adicionalmente, la Propuesta indica que no ha habido ningún estudio sistemático de procesos de disolución reductiva de magnetita y hematita en el ambiente marino, y ningún experimento acerca de la estabilidad de sulfuros oxidantes en el ambiente marino. Una vez más hay una necesidad de entender la química y la mineralogía de los relaves, ya que habrá que tener en cuenta también cualquier otra forma de óxido de hierro.

## 3.2 Metodología

### Revisión de la literatura

- 3.2.1 El primer Objetivo específico de la Propuesta es una revisión de toda la literatura disponible, usando una amplia gama de recursos, incluyendo tanto fuentes chilenas y otras bases de datos científicas internacionales. Este es un muy buen punto de partida, y SRSL recomendaría lo mismo. Ya hay una cantidad de documentos de revisión disponibles que resumen las condiciones e impactos de los sistemas de la DSTP operando actualmente (por ejemplo, Ramirez-Llodra *et al.*, 2016). Además los informes anuales de las DSTPs en operación deberían ser tenidos en cuenta de estar disponibles.

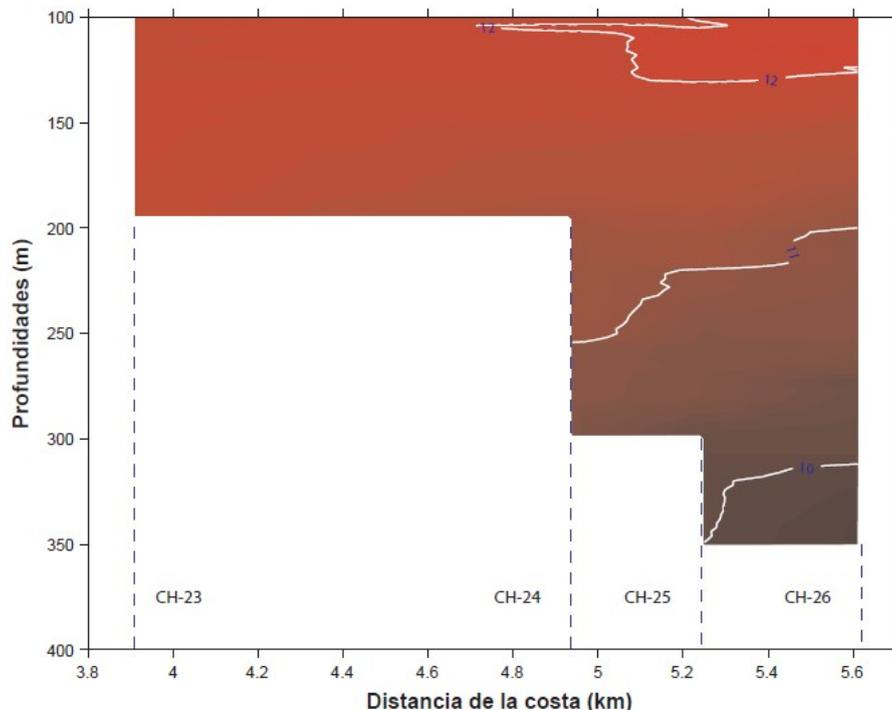
### Análisis

- 3.2.2 Respecto de los Objetivos dos y tres de la Propuesta, análisis de los mono minerales y de los relaves mineros utilizando XRD y EMP es una excelente primera etapa, permitiendo una plena descripción de la mineralogía y de la geoquímica de los mono minerales a determinar. Se debe tener en cuenta el hecho que habrá alteraciones en la composición una vez que los mono minerales/relaves sean introducidos al ambiente marino. Esto es reconocido en la Propuesta, mediante la declaración que *“este procedimiento también será llevado a cabo al final de las pruebas para estudiar si ha habido un cambio geoquímico o mineralógico en la fase sólida”*.
- 3.2.3 Respeto de todos los experimentos de lixiviación secuencial, análisis mediante ICP-AES e ICP-MS es la técnica correcta para determinar la composición de elementos. En la Propuesta, se dice que el control de calidad es asegurado mediante la calibración bajo normas internacionales. Adicionalmente a esto, el método analítico debería ser conducido preferentemente por un laboratorio acreditado por una norma reconocida; como mínimo debería detallarse un estándar de operación y aseguramiento de la calidad robustos. Esto es vital ya que las cantidades de metales en el agua de mar serán bajas, y el hecho de asegurar la precisión y la repetibilidad serán críticos en asegurar la información correcta y por lo tanto la robustez de los supuestos. Se necesitará una cantidad de pruebas que corran en paralelo para asegurar que se puedan realizar análisis estadísticos válidos de los resultados.
- 3.2.4 Los experimentos propuestos están diseñados en dos fases. La primera fase toma los mono minerales (magnetita, hematita y goethita) para determinar los elementos liberados desde los minerales para la disminución de las condiciones marinas. Esto entregará datos empíricos, pero no representará verdaderamente la composición de los relaves mineros, que será diferente, los relaves tienen una composición mucho más compleja (los mono minerales son solamente un componente menor de los relaves) y tendrán propiedades distintivas tales como un área de superficie, un estado de oxidación y un pH diferentes. Debido a estas diferencias, cualquier extrapolación a partir de los mono minerales involucrará un error. Por lo tanto, cualquier resultado debe ser interpretado con precaución y solamente proveerá información muy limitada al considerar las reacciones de los

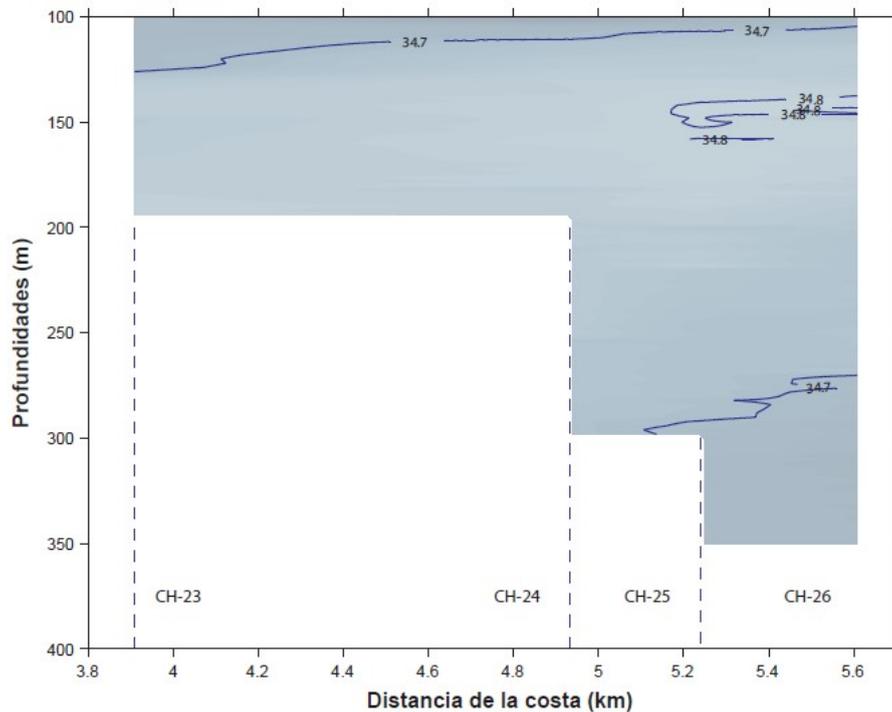
sedimentos y la columna de agua por parte de las descargas mineras que afectan a los recursos hídricos' (la meta de esta Propuesta).

3.2.5 La segunda fase de este experimento es utilizar los relaves mineros, lo cual resultará en experimentos mucho más aplicables. Es muy importante que estos relaves sean los relaves de hecho que habrán de ser descargados como parte de la operación DSTP propuesta. Los relaves deberían ser tomados desde el tanque de mezclado y de ser posible, desde el extremo del tubo de descarga. El método de recolección y almacenamiento de las muestras son críticos hacia asegurar que cualquiera de los resultados de los experimentos sean sólidos y válidos. Los procedimientos incorrectos conducirán a un cambio en la química de los relaves, con un posible cambio en la especiación de los elementos, rindiendo resultados poco fiables.

3.2.6 El método propuesto sugiere que todos los experimentos deberían ser llevados a cabo bajo condiciones controladas; atmósfera anóxica (nitrógeno), oscuridad, pH 8 y una temperatura constante de 10°C y con agua de mar sintética donde sea aplicable. Se sabe que el pH cambiará con el potencial redox del sistema de agua sedimento/poro. En 2002, Rescan publicó los resultados de temperatura, salinidad y oxígeno en las estaciones de muestreo ubicadas en las proximidades del nuevo punto de descarga de relaves (RESCAN, 2013). A 350 m de profundidad en el mar, las temperaturas registradas fueron inferiores a 9,9°C (Figura 1), con una salinidad de 34,7 psu (Figura 2); las concentraciones de oxígeno disuelto fueron ~ 0,2 mg/L a 350 m de profundidad. El pH a lo largo del ciclo anual fluctuó en el rango desde 7,2 a 8,5 en toda la columna de agua.



**Figura 1.** Perfil de contorno de la temperatura (°C) en la Ensenada de Chapaco, Chile, Abril de 2012. Estaciones CH-23, CH- 24, CH-25 y CH-26, todas ubicadas en las proximidades del nuevo punto de descarga de relaves fuera de la Ensenada de Chapaco en la plataforma continental (RESCAN, 2013)



**Figura 2.** Perfil del contorno de salinidad en la Ensenada de Chapaco, Chile, Abril de 2012. Estaciones CH-23, CH- 24, CH- 25 y CH-26, todas ubicadas en las proximidades del nuevo punto de descarga de relaves mineros fuera de la Ensenada de Chapaco en la plataforma continental (RESCAN, 2013)

- 3.2.7 Durante el régimen de lixiviación secuencial, los relaves deberían ser expuestos a condiciones lo más parecidas posible a aquellas que experimentarán en la columna de agua en el sitio de la descarga; cualquier cambio afectará las tasas cinéticas de las interacciones minerales. Este tipo de experimento determinará cualquier disolución/cambios cuando los relaves ingresen al ambiente marino, pero no darán información acerca del destino a largo plazo de los relaves, una vez que hayan arribado al sedimento superficial.
- 3.2.8 Para evaluar la influencia de las bacterias reductoras de hierro marino en disolución, un número de los experimentos agregan *Shewanella* spp. A las pruebas de celdas cerradas. Este género tiene una amplia gama de especies diferentes, que se distribuyen en una cantidad de hábitats diversos, incluyendo el suelo, el agua dulce, el sedimento marino y de estuarios. Sería de utilidad conocer las especies reales que están siendo propuestas, con una aclaración sobre la posibilidad de que las especies existan en el sitio. También se indica que es probable que haya una comunidad biológica diversa en el sitio de disposición DSTP y eso habrá de afectar el comportamiento físico y biogeoquímico de los relaves.

### Plazos

- 3.2.9 El plazo propuesto parece razonable, disminuyendo la frecuencia a través de un Revisión de una propuesta de estudio científico para determinar el potencial para lixiviación de los relaves mineros en Chile, 01830\_0001, Edición 04, 01/06/2016

período de tiempo significativo. Sin embargo, los intervalos de los muestreos más tardíos, menores, deberían encontrarse informados por los resultados a partir de los muestreos y resultados más tempranos. Debería permitirse flexibilidad si los resultados demuestran ser de interés.

- 3.2.10 Debería exigirse una aclaración respecto del número de muestras que están siendo analizadas. El número dado es de  $36 \times 12 = 432$  experimentos de muestras. Se supone que el 12 proviene de los 12 experimentos controlados planeados (sección 2.2.7). La frecuencia de muestreo que ellos sugieren es de 5, 10, 15, 30, 60 minutos, 2, 4, 6, 8, 16, 26 horas, 2, 3, 5, 7 días, 2, 3, 4 semanas, y luego una muestra cada mes, hasta el término de las pruebas de laboratorio (un año), que es igual a 29. SRSL no está seguro de dónde provienen las 7 muestras restantes.
- 3.2.11 Adicionalmente, en la consideración del número de muestras a ser analizadas, al parecer no hay ninguna repetición planeada de los experimentos o del análisis. La repetición será esencial hacia proveer una indicación del error en el método experimental. Se recomienda que las muestras sean analizadas por triplicado.

### Modelamiento

- 3.2.12 Para evaluar la especiación y la biodisponibilidad, se propone que se utilice el modelo PHREEQC. El PHREEQC es un modelo reconocido desarrollado por el Servicio de Levantamiento Geológico de los Estados Unidos (USGS), el cual está diseñado para desempeñar una amplia gama de cálculos geoquímicos hídricos. El modelo es apropiado para el uso indicado en la Propuesta.
- 3.2.13 Sin embargo, para que los resultados del modelamiento sean válidos es imperativo que hayan datos precisos respecto de todas las variables requeridas, y seguridad de que el modelo pueda enfrentar todas las variables ambientales y químicas.
- 3.2.14 Cualquier supuesto del modelamiento debería estar respaldado por observaciones del ambiente de sedimentos/agua al cual los relaves son vertidos, permitiendo determinar el destino de los relaves y contaminantes asociados.

### Difusión

- 3.2.15 La creación de un comité directivo es una idea sólida, y fue sugerida en un principio por T. Shimmiel hacia la administración de la DSTP en PNG: “*Se debe considerar asesoría independiente. Esto debería ser administrado por un comité directivo independiente.*” (Shimmiel et al., 2010).
- 3.2.16 La Propuesta sugiere la distribución de los hallazgos mediante reuniones, capacitaciones y talleres, así como también mediante publicaciones científicas. SRSL sería cauta respecto de sostener talleres de capacitación sobre la geoquímica de los relaves de Chile basado en esta Propuesta, ya que los relaves pueden variar dependiendo del cuerpo mineral y del método de extracción (o sea, uno no puede utilizar los mismos datos/supuestos respecto de relaves de oro y de hierro, dentro de los relaves de oro, el método de extracción del oro afectará el comportamiento de la descarga, etc.). Sin embargo, los datos empíricos

recolectados de la Propuesta, respecto de información directamente desde los relaves en sitios de disposición, conjuntamente con las condiciones ambientales específicas al sitio, proveerían un alcance suficiente para un taller de capacitación pertinente en forma exclusiva a este escenario particular.

### **Conclusión de la Metodología**

- 3.2.17 En general, la Propuesta indicada en el documento del estudio es científicamente sólida; los métodos experimentales propuestos respecto del muestreo de los lixiviados son los apropiados, permitiendo el cálculo de las tasas de las reacciones. Las técnicas analíticas, el plazo y los modelos sugeridos son todos idóneos y habrán de producir un conjunto de resultados que debería proveer un grado de comprensión acerca del *'estudio de las reacciones en los sedimentos y la columna de agua debido a las descargas minerales que afectan a los recursos acuáticos marinos'*
- 3.2.18 Sin embargo, aunque los experimentos sobre los mono minerales darán una idea acerca de la disolución posible, ellos entregan un valor limitado, en cuanto a que su comportamiento no reflejará el de los relaves mineros, la planta de pellets no descarga mono minerales, y los relaves son mucho más complejos en su composición. También debe indicarse que los mono minerales de óxido de hierro (hematita y magnetita), conforman sólo un pequeño componente de la mineralogía de los relaves mineros, La mayor parte de la fase sólida está formada por silicatos. Por lo tanto, tener en cuenta a los mono minerales para determinar el potencial de lixiviación de los relaves mineros de las plantas de pellets, sólo proveerá información limitada. No se podrá obtener ninguna conclusión concreta a partir de estos experimentos teniendo en consideración los relaves mineros.
- 3.2.19 Por lo tanto, para obtener los resultados de más valor, es importante que los experimentos se completen sobre los relaves mineros reales. También es importante que los relaves mineros sean tomados directamente desde CAP Minería, ya que los relaves de otras operaciones mineras serán diferentes en su composición; cada mina, planta procesadora y ambiente de disposición es específico al sitio y debe ser tratado de esa manera. La correcta recolección y almacenamiento de las muestras de los relaves mineros es imperativo y debe ser considerado cuidadosamente al muestrear los relaves mineros. La recolección y almacenamiento inadecuados podría hacer que los experimentos posteriores sean inservibles, debido a que es probable que la química de los relaves mineros sea alterada con anterioridad a que los experimentos tengan lugar.
- 3.2.20 Sin embargo, hay un número de consideraciones que deben ser tomadas en cuenta:
- La determinación precisa de cómo se comportarán los relaves una vez descargados solamente puede concluirse si se replican las condiciones ambientales exactas en el sitio de la DSTP. La simulación de estas condiciones es difícil de recrear en el laboratorio, especialmente cuando se consideran profundidades oceánicas mayores (o sea, efectos de presión difíciles de reproducir). Los experimentos de celdas cerradas entregarán algunas respuestas, pero también arrojarán algún margen de error, ya que no es posible recrear las condiciones exactamente.
  - Las condiciones actualmente indicadas en esta Propuesta son las

apropiadas para un a profundidad de 350 m (RESCAN, 2013). En el caso que el sitio de disposición se extienda a una profundidad de 800 m, las condiciones pueden variar (esto es, se puede esperar una menor temperatura).

- A primera vista la frecuencia de muestreo del experimento de lixiviación parece ser la adecuada, aunque esto puede ser revisado dependiendo de los resultados obtenidos en la medida que avanza el experimento.
- Actualmente no hay ninguna mención a repetición de los análisis. Para que estos resultados tengan algún sentido, es importante que los análisis sean duplicados o triplicados, permitiendo una completa comprensión de los errores asociados a las técnicas que están siendo utilizadas.
- Los experimentos de la Propuesta entregarán datos empíricos, los efectos tóxicos de cualquier lixiviación potencial a partir de los relaves mineros solamente puede inferirse. Se deberán realizar experimentos eco toxicológicos plenos para evaluar los impactos de cualquier lixiviación.

3.2.21 A fin de superar las limitaciones de los experimentos de laboratorio, sería preferible un estudio empleando testigos sedimentarios que contengan sedimento y relaves naturales del sitio de disposición. Las muestras sedimentarias deberían procesarse bajo nitrógeno para obtener una medición más precisa y detallada del ciclo biogeoquímico que está ocurriendo.

3.2.22 Debería recordarse al extraer cualquier conclusión de esta Propuesta, que la DSTP es específica a un sitio. Aunque se puede extraer un resumen general a partir de dicho estudio, la mayoría de las conclusiones solamente podrán aplicarse al sitio de la Ensenada Chapaco, y la información no puede extrapolarse para informar sobre proyectos de DSTP futuros.

## 4 RESUMEN

### 4.1 Visión General del Presente Informe

- 4.1.1 SRSL ha revisado la propuesta en detalle, evaluando la metodología científica y los enfoques delineados. Mayormente esta es una propuesta científicamente sólida y bien pensada si se aplica a los relaves mineros. Los experimentos realizados en los relaves mineros de CAP Minería entregarán una idea acerca de las reacciones que podrían tener lugar en el ambiente marino a continuación de una descarga de relaves mineros en el sitio de la DSTP.
- 4.1.2 El uso de mono minerales tiene un uso más limitado. La composición de los relaves mineros es mucho más compleja, donde en la composición de los relaves predominan los silicatos, en la cual la hematita y la magnetita solamente conforman una pequeña proporción de la composición total de los relaves, y por lo tanto no permitirá una evaluación completa del comportamiento de los relaves a continuación de una descarga.
- 4.1.3 Hay una cantidad de pequeñas mejoras que podrían realizarse a la Propuesta, más importantemente la introducción de la repetición de análisis, idealmente en triplicado, para proveer información sólidamente científica. También es primordial que se detalle y se examine un claro bosquejo de los métodos de recolección y almacenamiento de los relaves mineros, ya que un manejo inadecuado de los relaves mineros puede tener como consecuencia la invalidación de los resultados.
- 4.1.4 La principal limitación de la Propuesta es el hecho que es imposible recrear exactamente las condiciones en el sitio de la disposición DSTP en los experimentos con mesocosmos de laboratorio. Es más preciso llevar a cabo pruebas directamente en el sitio de disposición.
- 4.1.5 Los experimentos de la Propuesta entregarán datos empíricos, los efectos tóxicos de cualquier lixiviación potencial a partir de los relaves mineros solamente pueden inferirse. Deberán llevarse a cabo experimentos eco toxicológicos para evaluar los impactos de cualquier lixiviación.
- 4.1.6 También cualquier resultado debe ser ubicado en contexto teniendo en cuenta el cuadro mayor, ¿está teniendo algún efecto la cantidad de lixiviación que está ocurriendo?, ¿en qué grado?, ¿un efecto mínimo, un gran efecto, un efecto positivo o negativo? De haber un impacto, ¿se trata de un impacto aceptable al compararlo con otros métodos de gestión de residuos de relaves, teniendo en cuenta factores sociales y económicos?

## 5 REFERENCIAS

- CAP Minería (2013) Environmental Impact Assessment: Geochemical and Ecotoxicological Aspects Pellets Plant Tailings, pp. 49.
- Nystroem, J.O. & Henriquez, F. (1994). Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden; ore textures and magnetite geochemistry. *Economic Geology*, 89, pp. 820-839.
- Ramirez-Llodra, E., Trannum, H.C., Evenset, A., Levin, L.A., Andersson, M., Finne, T.E., Hilario, A., Flem, B., Christensen, G., Schaanning, M. & Vanreusel, A. (2015). Submarine and deep-sea mine tailing placements: A review of current practices, environmental issues, natural analogs and knowledge gaps in Norway and internationally. *Marine Pollution Bulletin*, 97 (1-2) pp. 13-35.
- Shimmiel, T., Black, K.D., Howe, J.A., Hughes, D.J. & Sherwin, T. (2010). Final Report: Independent Evaluation of Deep-Sea Mine Tailings Placement (DSTP) in PNG.
- Vogt (2013). International assessment of marine and riverine disposal of mine tailings. Study commissioned by the Office for the London Convention and Protocol and Ocean Affairs, IMO, in collaboration with the United Nations Environment Programme (UNEP) Global Programme of Action. International Maritime Organisation London, May 2014, 138 pp.

## 6 APÉNDICE 1

### 6.1 Recursos del proyecto y evidencia de la habilidad técnica

#### Resumen del suministro de servicios por parte de SRSL

- 6.1.1 Establecida en 2002, SRSL es una proveedora plenamente independiente de consultorías marinas especializadas y de servicios de levantamiento respaldados por ciencia de vanguardia. La misión de SRSL es permitir que sus clientes entiendan y mitiguen los riesgos involucrados en la interacción de la industria con el ambiente marino. SRSL ha sido contratada para llevar a cabo diferentes evaluaciones ambientales en una gama de ubicaciones internacionales tanto para clientes industriales como de gobiernos. Adicionalmente, SRSL provee consultorías e investigación a muchas de las agencias claves del RU, incluyendo la Secretaría del Commonwealth, el Comité Conjunto para la Conservación de la Naturaleza (JNCC), Marine Scotland, Patrimonio Natural de Escocia (SNH), la Agencia Escocesa para la Protección del Ambiente (SEPA), el Centro para el Medioambiente, Ciencias Pesqueras y de Acuicultura (Cefas) y la Agencia Normativa de los Alimentos (FSA).
- 6.1.2 SRSL es reconocida internacionalmente y ha realizado proyectos multimillonarios en Euros a nivel mundial, incluyendo Papúa Nueva Guinea, Sudamérica y el Medio Oriente. Estos proyectos han sido para Estados, agencias de Gobierno, reguladores y la industria. El personal de SRSL actualmente está involucrado en el proyecto MIDAS (Gestión de los Impactos de la Explotación de los Recursos del Mar Profundo), financiado por la UE, un proyecto que investiga los impactos de DSM, y han llevado a cabo un número de proyectos que investigan el impacto de la minería sobre el ecosistema marino y los propietarios locales de tierras, incluyendo el desarrollo de planes para el involucramiento de los stakeholders. Los consultores de SRSL han sido empleados como testigos expertos y han presentado y defendido el trabajo acometido. Adicionalmente, y donde sea aplicable, los resultados de los proyectos han sido publicados en literatura científica revisada por pares.
- 6.1.3 SRSL es una filial de la total propiedad de la Asociación Escocesa para las Ciencias Marinas (SAMS), y se encuentra basada en el European Marine Science Park (Parque Europeo para las Ciencias Marinas), en Oban. Fundada en 1884, SAMS es uno de los institutos oceanográficos más antiguos del mundo, y su compromiso es el de aumentar el conocimiento y la gestión del ambiente marino mediante la investigación, la educación y la difusión, el mantenimiento de infraestructura para investigación y la transferencia de conocimiento. Las actividades de investigación abarcan todo el ancho de las ciencias marinas y a menudo son de naturaleza multidisciplinaria. A través de la SAMS, SRSL tiene acceso a una comunidad de más de 150 empleados, incluyendo a una población de más de 90 investigadores científicos especialistas, todos los cuales son respetados en sus campos y algunos de los cuales son considerados como autoridades mundiales. Este fondo de conocimientos abarca todo el ancho de la investigación científica en el ambiente marino, desde la ecología a la

microbiología al modelamiento matemático, desde la geología del lecho marino hasta las ciencias sociales y los estudios de seguridad alimentaria para la industria de la acuicultura.

6.1.4 SRSL también ofrece análisis llevados a cabo por un equipo de especialistas de apoyo técnico altamente calificado, permitiendo la prestación de paquetes de servicios a la medida de los clientes. Estos servicios se fundamentan en equipos científicos precisos y exactos operados a un estándar certificado (ISO 17025), que también incluyen taxonomistas, químicos y profesionales de TI expertos. Respecto de este proyecto, la generación de informe será supervisada por un Gerente de Proyectos, quien será responsable de su realización a tiempo, y quien será responsable de supervisar la Gestión de Calidad del informe, asegurando que sea gestionado y entregado de acuerdo con los estrictos estándares de cumplimiento de calidad ISO 9001:2008 de SRSL. El tamaño y la ubicación de SRSL le permiten abordar las necesidades y presiones temporales de los cliente de forma responsiva y flexible, mientras que la capacidad respecto de sinergia y colaboración a lo ancho de toda la gama de ciencias marinas le permiten a SRSL lograr una visión sinóptica más aguda que lo que se puede lograr con una asesoría de disciplina única.

6.1.5 Para mayores detalles favor de ver: [www.srsl.com](http://www.srsl.com)

### Experiencia relevante de SRSL

6.1.6 SRSL provee investigación y asesorías imparciales a muchas agencias de gobierno claves, incluyendo a Marine Scotland, Scottish Natural Heritage, Joint Nature Conservation Council (JNCC), la Environment Agency (EA) así como también a Reparticiones de Gobierno a nivel internacional. Entre los hitos del suministro de servicios de SRSL pertinentes a este proyecto incluimos los siguientes:

Nombre o Región del Cliente	Breve Descripción del Proyecto	Cronograma del Proyecto
<b>Comisión Europea</b>	<p>Proyecto MIDAS Marco 7 de la UE (Gestión de Impactos de la Explotación de Recursos del Mar Profundo). Líder de paquete de trabajos sobre dinámica de plumas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Autoría del informe MIDAS:</li> <li>• "Informe sobre los efectos de un gama de regímenes hidrodinámicos característicos sobre las tres metodologías de descarga en términos de disoluciones de campos cercanos." Dale, Inall, Aleynik. Enero de 2015.</li> <li>• "Modelamiento hidrodinámico de dos sitios de casos de estudio." Aleynik, Dale, Inall. Mayo de 2015.</li> <li>• "Informe sobre mediciones hidrográficas efectuadas en dos sitios; áreas MAR y DISCOL". Rabitti, Dale, Maas. Feb. de 2016.</li> <li>• Invitado a participar en paneles relacionados con la minería en las profundidades marinas".</li> </ul> <p>- Panel de Políticas Científicas con miembros de la Comisión Europea, de la Industria y ONGs, Bruselas, Bélgica, Dic. de 2015: "Maximización del potencial para la recuperación del ecosistema luego de la minería en las profundidades marinas".</p>	2013 hasta el presente
<b>Compañía minera chilena</b>	SRSL llevó a cabo una revisión científica independiente e integral de toda la información en relación al uso propuesto de Colocación	2014 - 2105

	de Relaves Mineros en el Mar Profundo (DSTP) por parte de su cliente en una planta de pellets de minerales de hierro en Chile. Este trabajo involucró una visión general de alto nivel de los requerimientos para un enfoque exitoso a la DSTP, que se enfocó sobre muchos aspectos del proyecto, incluyendo los requerimientos detallados para una exitosa Declaración de Impacto Ambiental. Se llevó a cabo una detallada revisión de conjuntos de datos, evaluaciones de la calidad de la información y la identificación de brechas científicas, informadas al cliente con recomendaciones. También SRSL proveerá un taller para el personal del cliente a fin de compartir el conocimiento acumulado acerca de la disposición submarina de los relaves mineros.	
<b>Secretaría del Commonwealth para el Gobierno de las Seychelles</b>	Panel de asesoría ad hoc formado completamente por expertos de SRSL con experticia en aspectos claves de la Economía Azul, para otorgar asesoría técnica al Gobierno de las Seychelles en el desarrollo de la estrategia nacional para la implementación del concepto de economía azul a nivel nacional. El trabajo fue contratado a través de la Secretaría del Commonwealth.	2014 - 2015
<b>Secretaría del Commonwealth</b>	La Secretaría del Commonwealth amplió el trabajo en las Seychelles para incluir la pesca de captura y casos de estudio en todos los Estados Insulares Pequeños en Desarrollo.	2015 - 2016
<b>Compañía minera chilena</b>	Presentación de resultados y discusión de los impactos de los residuos de la minería sobre el ambiente marino.	2014 - 2015
<b>Compañía minera chilena</b>	Experto internacional facilitando y participando de un taller de conocimiento del impacto de los relaves en el mar profundo sobre el mar profundo.	2014
<b>Newcrest Mining</b>	El cliente de SRSL requirió de una revisión científica, independiente de su monitoreo marino y desempeño a la fecha en su faena minera de Lihir en Papúa Nueva Guinea (PNG). La meta principal fue emprender una síntesis de los discretos conjuntos de información, para proporcionar una comprensión del estado del medioambiente marino circundante. Esto facilitó un proceso hacia el mapeo de ruta y el costo de un sólido proceso de monitoreo ambiental y la identificación de áreas a mejorar y el establecimiento de indicadores claves de desempeño ecológico, y la predicción del futuro desempeño, que satisfizo las metas ambientales del cliente y los requerimientos regulatorios.	2013
<b>Ramu NiCo Management</b>	SRSL llevó a cabo un levantamiento marino para cumplir con los requerimientos de monitoreo del Plan de Gestión Ambiental Operacional para el Proyecto Ramu Nickel, PNG. Se llevó a cabo un estudio para asegurar que los requerimientos de monitoreo ambiental del plan de gestión operacional para el proyecto Ramu Nickel en PNG fueran cumplidos.	2013
<b>Noruega</b>	Revisión de las pautas de la DSTP para las compañías mineras noruegas	2013
<b>Autoridad de Recursos Mineros de Papúa Nueva Guinea</b>	Revisión de pautas de la DSTP para las empresas mineras noruegas.	2013
<b>Autoridad para los Recursos Minerales de Papúa Nueva Guinea</b>	En 2011 SRSL fue contactada por la Autoridad para los Recursos Minerales de Papúa Nueva Guinea para investigar la hidrografía a lo largo de la costa de Rai, con referencia específica al área de Basamuka y la mina de Nickel Ramu. Estos levantamientos fueron emprendidos para determinar el impacto de los relaves mineros en el mar profundo (DSTP) sobre el ambiente marino local, tanto para el Gobierno como para la industria misma. Este trabajo se construyó sobre los más de diez años de experiencia de SRSL en entregar evaluaciones de impacto ambiental marino	2012

	internacionalmente, incluyendo evaluaciones en las minas de Lihir y Misima en Papúa Nueva Guinea (2007-2010), y la línea de base ambiental de Basamuk (2008), el sitio de la planta procesadora de níquel Ramu. SRSL emprendió mediciones oceanográficas físicas y químicas para determinar la naturaleza de cualquier afloramiento oceánico, y así, los riesgos de que los relaves mineros sean atraídos hacia áreas que podrían impactar a otras industrias marinas, tales como la pesca y la recreación. El informe final describe los resultados de esta investigación oceanográfica física de un año de duración, además de observaciones complementarias que cartografiaron el comportamiento y la distribución del material particulado en suspensión en el área. El proyecto reforzó la inversión económica en la minería de PNG y entregó las herramientas necesarias a los organismos regulatorios ambientales del país.	
<b>MLP Chile</b>	Estudio eco toxicológico de relaves mineros	2012
<b>PNG</b>	Involucramiento de los stakeholders en la minería marina	2011
<b>Autoridad para los Recursos Minerales de Papúa Nueva Guinea</b>	Redacción de pautas Específicas a los Sitios respecto de la Colocación de Relaves Mineros en el Mar Profundo para PNG.	2011 - 2012
<b>Autoridad para los Recursos Minerales de Papúa Nueva Guinea</b>	Investigación de la posibilidad que ocurran afloramientos a lo largo de la Costa de Rai haciendo referencia específica al área de Basamuk.	2011 – 2012
<b>PNG</b>	Observación del comportamiento de los relaves durante el comisionamiento de un sistema de DSTP.	2011 – 2012
<b>PNG</b>	Revisión del Plan de Gestión Ambiental Operacional para la mina Ramu NiCo.	2011
<b>PNG</b>	Investigación Independiente de la Colocación de Relaves Minerales en el Mar Profundo.	2007 – 2009
<b>PNG/Oman</b>	Circulación de El Niño en el Océano del Sur.	2004 – 2006
<b>Autoridad para la Energía Atómica del RU</b>	EIA: Estudio de línea de base del ambiente marino alrededor de la Planta Nuclear de Dounreay.	2003 – 2004

## **CURRICULUM VITAE de TRACY SHIMMIELD**

ESPECIALISTA EN LA COLOCACIÓN DE RELAVES MINEROS EN EL MAR PROFUNDO

CARGO: DIRECTOR GENERAL, SAMS RESEARCH SERVICES LTD (SRSL)

La Dra. Tracy Shimmield, geoquímica marina, es la Directora General de SRSL y cuenta con más de 30 años de experiencia en geoquímica ambiental. Sus intereses de investigación incluyen la investigación y la evaluación del impacto humano sobre el ambiente marino mediante el monitoreo de los contaminantes y el estudio de los procesos biogeoquímicos involucrados en su redistribución. Ella también es una experimentada radioquímica y utiliza radionúclidos naturales y artificiales como trazadores de los procesos marinos, incluyendo las tasas de acumulación de sedimentos y de mezclado. La Dra. Shimmield también es Líder Central de la Industria y Océanos, y ha sido Investigadora Principal en un número de subvenciones para investigación y asuntos comerciales, financiadas por el Concejo de Investigación Ambiental Natural del RU (NERC), por el programa Marco de la Unión Europea y por compañías comerciales.

Las investigaciones encargadas incluyen el Estudio de Línea de Base Ambiental Costa Afuera de la Instalación Nuclear de Dounreay operada por la Autoridad para la Energía Atómica del RU y la evaluación Independiente de la Colocación de Relaves Mineros en el Mar Profundo (DSTP) en Papúa Nueva Guinea para el Gobierno de PNG, financiada por la Comisión Europea vía el 8° Financiamiento Europeo para el Desarrollo. La Dra. Shimmield gestionó los contratos de los proyectos, lo cual incluyó un extenso trabajo en terreno, que comprendió 4 cruceros y numerosas campañas en terreno en tierra. La Dra. Shimmield ha sido la supervisora de 8 estudiantes de PhD, ha publicado 30 publicaciones de revisiones para sus pares, 20 informes comerciales y ha gestionado 14 proyectos mayores de investigación y comerciales hacia su resultado exitoso. Ella también ha participado en doce cruceros de investigación de mayor envergadura.

### **EXPERIENCIA ESPECÍFICA EN RELACIÓN A LA DSTP**

- Trabajó desde 2006 con el Departamento del Ambiente y de la Conservación (DEC) y con la Autoridad para los Recursos Minerales (MRA) de Papúa Nueva Guinea investigando los impactos de la DSTP y los métodos de mitigación
- Desarrolló el Borrador de las Pautas Generales para su uso en la DSTP en PNG, las cuales están siendo adoptadas e incorporadas a la legislación.
- Desarrolló pautas específicas para su uso en la DSTP tanto en las minas de Ramu NiCo y de Lihir de Oro
- Testigo experto para el Estado respecto de asuntos ambientales
- A través de proyectos específicos de pautas, ha trabajado con DEC, MRA y el Departamento de Políticas Minerales y de Riesgos Geológicos en Papúa Nueva Guinea
- Desarrolló un Plan de Involucramiento de Stakeholders como parte del desarrollo de la DSTP para una compañía minera global
- Investigadora Principal para el Desarrollo de Programa de Monitoreo Ambiental para la DSTP para una Compañía minera global practicante de la DSTP
- Revisión de las Pautas para Compañías Mineras Noruegas

### Experiencia Laboral:

Fecha	Cargo	Empleador
2011-2013	Director Gerente de SRSL	Scottish Association for Marine Science (SAMS)
2009 – 2013	Director Asociado, Líder de Asuntos de SAMS y de Ciencias: La Industria y los Océanos	Scottish Association for Marine Science (SAMS)
2004 -2009	Promovida a Profesora Titular, Directora del Departamento de Geoquímica	Scottish Association for Marine Science (SAMS)
2002 – 2004	Se le ofreció el puesto permanente como Líder del Grupo Operacional de Geoquímica	Scottish Association for Marine Science (SAMS)
2000 – 2002	Líder del Grupo Operacional: Promovida a Profesora B en la Escala Universitaria	Scottish Association for Marine Science (SAMS)
1997- 2000	<u>Geoquímica Marina:</u> Investigadora Principal y directora del grupo de geoquímica	Scottish Association for Marine Science (SAMS)
1983 – 1997	<u>Radioquímica:</u> Estudios análogos naturales respecto a la disposición de residuos nucleares, geoquímica de los radionúclidos, estudio de contaminantes y reconstrucción de contaminación histórica. (Grado 7)	Scottish universities Research y Reactor Centre (SURRC) Glasgow University

### Publicaciones Relevantes

#### Publicaciones: Con referencias (listadas en SCI)

- Hughes, D.J., **Shimmiel, T.M.**, Black, K.D. and Howe, J.A. (2015). Ecological impacts of large-scale disposal of mining waste in the deep sea. *Scientific Reports* 5. Article number: 9985
- Kalantzi, I., **Shimmiel, T.M.**, Pergantis, S.A., Papageorgiou, N., Black, K.D. and Karakassis, I. (2013) Heavy metals, trace elements and sediment geochemistry at four Mediterranean fish farms. *Science of the Total environment*. 444: 128-137
- Priede, I.G., Bergstad, O.A. , Miller, P.I., Vecchione, M., Gebruk, A., Falkenhaus, T., Billett, D.S.M., Craig, J., Dale, A.C., Shields, M.A., Tilstone, G.H., Sutton, T.T., Gooday, A.J., Inall, M.E., Jones, D.O.B., Martinez-Vicente, V., Menezes, G.M., Niedzielski, T., Sigurðsson, P., Rothe, N., Rogacheva, A., Alt C.H.S., Brand, T., Abell, R., Brierley, A.S., Cousins, N.J., Crockard, D., Hoelzel, A.R., Høines, Å., Letessier, T.B., Read, J.F., **Shimmiel, T.M.**, Cox, M.J., Galbraith, J.K., Gordon, J.D.M., Horton, T., Neat, F. and Lorange, P. (2013). Does presence of a Mid Ocean Ridge enhance biomass and biodiversity? *PLoS ONE* 8(5): e61550. doi:10.1371/journal.pone.0061550
- Gutierrez, T., Biller, D. V.; **Shimmiel, T.**, et al. (2012). Metal binding properties of the EPS produced by *Halomonas sp.* TG39 and its potential in enhancing trace element bioavailability to eukaryotic phytoplankton. *Biometals*. 25 (6): 1185-1194 DOI: 10.1007/s10534-012-9581-3 Published: DEC 2012

- Hillenbrand, C.-D., Smith, J.A., Esper, O., Gersonde, R., Korte, M., Kuhn, G., Lart, R.D., Maher, B., Moreton, S.G. and **Shimmiel, T.M.** (2010). Age assignment of a diatomaceous ooze deposited in the western Amundsen Sea Embayment after the Last Glacial Maximum *Journal of Quaternary Science*. 25 (3): 280-295 DOI: 10.1002/jqs.1308
- Johnson, C., Sherwin, T.J., Smythe-Wright, D., **Shimmiel, T.M.** and Turrell, W. (2010). Wyville Thomson Ridge Overflow Water: Spatial and temporal distribution in the Rockall Trough. *Deepsea Research Part I-Oceanographic Research Papers*. 57(10): 1153-1162(10) DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr>. 2010.07.006
- Adey, E.A., Black K.D., Sawyer, T., **Shimmiel, T.M.** and Trueman, C.N. (2009). Scale microchemistry as a tool to investigate the origin of wild and farmed *Salmo salar*. *Marine Ecology-Progress Series*. 390: 225-235 DOI: 10.3354/meps08161
- Law, G.T.W., **Shimmiel, T.M.**, Shimmiel, G.B., *et al.* Manganese, Iron, and Sulphur cycling on the Pakistan margin. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*. 56 (6-7): 305-323 DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.06.011
- Gutierrez, T., **Shimmiel, T.M.**, Haidon, C., Black, K.D. and Green, D.H. (2008). Emulsifying and metal ion binding activity of a glycoprotein exopolymer produced by *Pseudoalteromonas* species TG12. *Applied and Environmental Microbiology*. 74(15): 4867-4876
- Howe, J.A., **Shimmiel, T.M.** and Harland, R. (2008). Late Quaternary glaciomarine sedimentation and contourites in the Fram Strait. *Sedimentology*. 55: 179-200
- Dean, R.J., **Shimmiel, T.M.** and Black, K.D. (2007). Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: An extensive survey. *Environmental Pollution*. 145(1): 84-95
- Howe, J.A., Wilson, C.R., **Shimmiel, T.M.** , Diaz, R. and Carpenter., L. (2007). Recent deep-water sedimentation, trace metal and radioisotope geochemistry across the Southern Ocean and northern Weddell Sea, Antarctica. *Deep-sea Research Part II-topical Studies In Oceanography*. 54: 1652-1681
- Jackson, D., Stone, D., Smith, K., Morgan, G. and **Shimmiel, T.M.** (2007). Assessing the environmental risk from hot particles in the vicinity of Dounreay - a case for inaction? *Journal of Radiological Protection*. 27(3A)(Sp.Iss): A111-A118(8)
- Gehrels, R.W., Marshall, W.A., Gehrels, M.J., Larsen, G., Kirby, J.R., Eiriksson, J., Heinemeier, J. and **Shimmiel T.M.** . (2006). Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century. *Holocene*. 16(7): 949-965
- Nørgaard-pedersen, N., Austin, W.E.N., **Shimmiel T.M.** and Howe J.A. (2006). The Holocene Record Of Loch Etive, Western Scotland: Influence Of Relative Sea Level And Catchment Area Changes. *Marine Geology*, 228 (1-4): 55-71
- Swan, S.C., Geffen, A.J., Morales-Nin, B., Gordon, J.D.M., **Shimmiel, T.**, Sawyer, T. and Massuti, E. (2006) Otolith microchemistry: an aid to stock separation of *Helicolenus dactyloperus* (bluemouth) and *Merluccius merluccius* (European hake) in the NE Atlantic and Mediterranean. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 504-513
- Morales-Nin. B., Swan, S.C., Gordon, J.D.M., Palmer, M., Geffen, A.J., **Shimmiel, T.M.** and

- Sawyer, T.T. (2005). Age-related trends in otolith chemistry of *Merluccius merluccius* from the north-eastern Atlantic Ocean and the western Mediterranean Sea. *Marine and Freshwater Research*. 56(5): 599-607
- Swan, S.C., Wright, P.J., Woodroffe, D.A., Gordon, J.D.M., **Shimmield, T.** (2004). Evidence for geographical isolation of the early life stages of the white anglerfish, *Lophius piscatorius*, based on otolith microchemistry. *J. Mar. Biol. Ass U.K.*, 84: 827-830
  - Swan, S.C., Gordon, J.D.M., Morales-Nin, B., **Shimmield, T.**, Sawyer, T. and Geffen, A.J. (2003). Otolith microchemistry of *Nezumia aequalis* (Pisces :Macrouridae) from widely different habitats in the Atlantic and Mediterranean. *Journal of the Marine Biological Association*. 83: 883-886
  - E. Viollier C. Rabouille, S. E. Apitz, E. Breuer, G. Chaillou, K. Dedieu, Y. Furukawa, C. Grenz, P. Hall, F. Janssen, J. L. Morford, J. -C. Poggiale, S. Roberts, **T. Shimmield**, M. Taillefert, A. Tengberg, F. Wenzhöfer and U. Witte. (2003). Benthic biogeochemistry: state of the art technologies and guidelines for the future of in situ survey JN: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. V285-286: 5-31
  - Howe, J.A., **Shimmield, T.**, Austin, W.E.N and Longva, O. (2002). Post-glacial depositional processes in a glacially-overdeepened sea loch, upper Loch Etive, Western Scotland. *Marine Geology*. 185: 417-433
  - Emeis, K., Christiansen, C., Edelvang, K., Jähmlich, S., Kozuch, J., Laima, M., Leipe, T., Löffler, A., Lund-Hansen, L.C., Miltner, A., Pazdro, K., Pempkowiak, J., Shimmield, G., **Shimmield, T.**, Smith, J., Voss, M. and Witt, G. (2002). Material transport from the nearshore to the basinal environment in the Southern Baltic Sea, II: Origin and properties of material. sub group 3a, *Journal of Marine System*, 35: 151-168
  - Christiansen, C., Edelvang, K., Emeis, K., Graf, G., Jähmlich, S., Kozuch, J., Laima, M., Leipe, T., Löffler, A., Lund-Hansen, L.C., Miltner, A., Pazdro, K., Pempkowiak, J., Shimmield, G., **Shimmield, T.**, Smith, J., Voss, M. and Witt, G.(2002) Material transport from the nearshore to the basinal environment in the Southern Baltic Sea, I: Process and mass estimates. sub group 3a, *Journal of Marine System*, 35: 131-150
  - Shimmield, G., Kroon, D., Austin, W., Chapman, M., Jones, J., Derrick, S., P Knutz & **Shimmield T.** (2000). Century to millennial-scale sedimentological-geochemical records of glacial-Holocene sediment variations from the Barra Fan (NE Atlantic). *Journal of the Geological Society*, London. 157: 643-653
  - Alexander, W.R. and **Shimmield T.M.** (1990). Microwave oven dissolution of geological samples: Novel application in the determination of natural decay series radionuclides. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry., Letters* 145 /4/ 301-310
  - Mackenzie, A.B., Scott, R.D. and **Williams T.M.** (1987). Mechanisms of northwards dispersal of Sellafield waste. *Nature*. 329 (6134): 42-45

### Informes:

- Pruebas Ambientales de Muestras de Relaves. (2013). **Shimmield, T.M.**

- Informe Final: Una investigación de los afloramientos marinos a lo largo de la costa de Rai, PNG. (2012). **Shimmiel, T.M.**, Sherwin T., Cottier F., Black, K.D. y Howe. J.A.
- Pautas Específicas para las minas de Lihir y de Ramu NiCo. (2012) **Shimmiel, T.M.**
- Mapa de Ruta para el Involucramiento de los Stakeholders. (2011) **Shimmiel, T.M.**
- Informe Final: Evaluación Independiente de la Colocación de Relaves Mineros en el Mar Profundo (DSTP) en PNG. (2010). **Shimmiel, T.M.**, Black, K.D., Howe, J.A., Hughes, D. y Sherwin, T.
- Evaluación Independiente de la Colocación de Relaves Mineros en el Mar Profundo (DSTP) en el Proyecto PNG Número: 8.ACP.PNG.18-B Informe Anual: (2008). **Shimmiel, T.M.**
- Evaluación Independiente de la Colocación de Relaves Mineros en el Mar Profundo (DSTP) en el Proyecto PNG Número: 8.ACP.PNG.18-B Informe Anual: (2007). **Shimmiel, T.M.**
- Una revisión y evaluación de información ambiental marina de la Colocación de Relaves en el Mar Profundo, con particular referencia a las minas de Lihir y de Misima, Papúa Nueva Guinea, **Shimmiel, T.M.**, Black, K.D., Howe, J.A., Hughes, D., Sherwin, T. y Leakey, R.
- Estudio de línea de base ambiental del ambiente marino alrededor de Dounreay. (2005). **Shimmiel, T.**, Smith, J. y Stone, D. (UKAEA)
- Informe Final del Mar Árabe (NERC), **Shimmiel, T.M.**, Shimmiel, G.B y Hughes D. (2005)
- Estudio de línea de base ambiental del Campo de Pruebas de BUTEC, Applecross, **Shimmiel, T.** (2004) (QinetiQ)
- Revisión de los datos existentes en el sitio de Dounreay en relación a una Evaluación de Línea de Base Ambiental Marina. (2003) (UKAEA)
  - Coordinación: Profesor Graham Shimmiel FRSE
  - Geoquímica: **Dr Tracy Shimmiel** y Dr Kenny Black
  - Física: Dr Mark Inall
  - Biología: Dr Martin Sayer, Dr Mike Burrows
- Estudio Ambiental de Escritorio: Impacto ambiental de las pruebas de Sonobuoy en las instalaciones de BUTEC en Applecross. (2002). **Shimmiel, T.M.**, Foster, J. y Shona Magill, S. (QinetiQ)
- Lixiviación de Contaminantes a partir de Cortes de Perforación de Pilas del Norte y del Centro del Mar del Norte: Resultados en terreno de los cortes de pilas de Berilo "A". (2000). Shimmiel, G.B., Breuer, E., Cuimmings, D.G., Peppe, O. y **Shimmiel, T.M.** (NERC)

- Informe científico final BASYS, EU MAST. (1999). **Shimmiel T.M.** y Shimmiel G.B.
- Informe acerca del control de calidad del análisis de sedimentos de Tranche 43 y una interpretación de los resultados. Un informe para Statoil Enero de 1999. **Shimmiel T.M.**
- Evaluación Ambiental a nombre de Enterprise Oil en 17<sup>th</sup> Round Licence Block 154/1: Data and Interpretation Geochemistry Section: **Shimmiel, T.M.**, Breuer, E. y Foster, J.
- EL Análisis <sup>210</sup>Pb de sedimentos de Tranche 43, resultados e interpretación. Un informe para Statoil Enero de 1999. **Shimmiel T.M.**
- Mackenzie, A.B., **Shimmiel, T.M.**, Scott, R.D, Davidson, C.M. y Hooker, P.J., (1989). Distribuciones de Cloruros, Bromuros y de Yodo en el Agua Sedimentaria Intersticial. Informe Técnico WE/90/2 British Geological Survey.
- Estudios de Degradación Natural de Series de Radionúclidos en el Sitio de Needles Eye Natural Analogue Site, III, 1993
- Mackenzie, A.B., Whitton, A.N., Shimmiel, **T.M.**, Jemielita, R.A., Scott, R.D. y Hooker, P.J. (1991). Estudios de Degradación Natural de Series de Radionúclidos en el Sitio de Needles Eye Natural Analogue Site, 11, 1989-1991. Informe Técnico WE/91/37 British Geological Survey

#### Con Referencias (No-listadas en SCI):

- Swan, S.C., Gordon, J.D.M., and **Shimmiel, T.** (2003). Preliminary Investigations on the Uses of Otolith Microchemistry for Stock Discrimination of the Deep-water Black Scabbardfish (*Aphanopus carbo*) in the North East Atlantic. Journal Northwest Atlantic Fisheries Science, Vol. 31:221-231
- **Shimmiel, T.M.**, MacKenzie, A.B., Price, N.B. (1995). Sediment Core reconstruction of pollutant metal inputs to Scottish Sea Lochs. In Heavy Metals in the Environment, vol. 1, 117-120, CEP Consultants, Hamburg
- **Shimmiel, T.M.**, Mackenzie, A.B. and Price, N.B. (1991). ICP-MS Analysis of Trace element concentrations in interstitial waters of Scottish sea loch sediments. In Heavy Metals in the Environment, vol. 1, 457-460, CEP Consultants, Edinburgh

#### Sin-referencias:

- Breuer, E., Peppe, O., Cowie, G and **Shimmiel T.** (2003). Advanced lander allows *in-situ* studies in the depths of the Arabian Sea. Ocean Challenge, Vol 13 No.1.