



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARISO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Memoria de Título
**“Diseño y Construcción de un Humedal Artificial Piloto Para la
Recuperación de las Aguas Superficiales de Escorial de Minería del
Cobre”**
Informe final

Memorista: Álvaro G. Barría A.
Profesor: José H. Torres T.
Co-referente: Sergio Carstens S.

26 de Julio del 2007

Resumen ejecutivo

El informe que a continuación se presenta, contiene el desarrollo de una investigación realizada en la División Ventanas de CODELCO Chile, para el departamento de sustentabilidad y medio ambiente. El objetivo de dicha investigación era comprobar si los humedales artificiales son una buena alternativa para el tratamiento y recuperación de aguas contaminadas con metales pesados.

Para ello se construyó una planta piloto de humedales artificiales y se escogió como líquido a tratar las aguas superficiales del escorial perteneciente a la División Ventanas, esta agua al estar en contacto con la escoria, especialmente la proveniente del antiguo horno de reverbero, posee una concentración de metales pesados, cobre y arsénico, que excede los estándares necesarios (0,1 mg/lit) para su evacuación.

Para la construcción de la planta piloto se usaron criterios de diseño recomendados, por lo tanto este es un humedal tipo, y su fin es obtener los datos experimentales necesarios para el diseño de un humedal artificial definitivo y orientado a las necesidades de este caso en particular.

Los resultados obtenidos de la medición de las concentraciones de metales pesados a la entrada y la salida del sistema, muestran una evolución positiva, entregando, por ejemplo, disminuciones de hasta un 85% en la concentración de cobre.

En base a los resultados se puede concluir que los humedales son una buena alternativa, de menor costo y más fácil operación que una planta convencional de tratamiento de agua.

Por otro lado los costos asociados a la construcción, puesta en marcha y operación son bajos. Basta con considerar que el factor de mayor influencia en el costo es el terreno y en este caso ya era propiedad de la empresa. Si eliminamos el valor del terreno el siguiente factor en importancia sería el relleno sólido, es decir, grava.

Sin considerar el valor del terreno la EPA estima que la proporción entre los costos de un humedal artificial y una planta convencional es de 1 a 4, ratificando la conveniencia

económica de esta tecnología alternativa. La comparación fue hecha sobre plantas para tratar 0.1 mgd de residuo líquido.

Una estimación conservadora nos lleva a un costo de construcción de 20 millones de pesos, considerando materiales y mano de obra.

Tabla de Contenidos

1. Objetivos.	7
1.1. Objetivo General.	7
1.2. Objetivos Específicos.	7
2. Introducción.	8
3. Marco Teórico.	9
3.1. Descripción de la Tecnología.	9
3.1.1. Ventajas.	9
3.1.2. Desventajas.	9
3.2. Tipos de Humedales Artificiales.	10
3.2.1. Humedales de Flujo Superficial (FWS).	10
3.2.2. Humedales de Flujo Subterráneo (SFS).	11
3.3. Procesos de Retiro.	12
3.3.1. Adsorción e intercambio catiónico.	13
3.3.2. Procesos Microbiano-mediados.	13
3.3.3. Filtración.	14
3.4. Selección de la vegetación.	14
3.5. Metales Pesados en Humedales.	15
3.5.1. Comportamiento de Algunos Metales Pesados.	18
4. Situación actual.	23
4.1. Condiciones geotécnicas del emplazamiento del botadero.	25
4.1.1. Ubicación.	25
4.1.2. Procedencia de escorias.	25
4.2. Antecedentes geológicos.	26
4.2.1. Marco geológico general	26
4.2.2. Características climáticas de la zona	27
4.3. Depósito de escoria	27
4.3.1. Capacidad y Vida Útil.	28
4.4. Características químicas de las escorias.	28
5. Hipótesis de Trabajo.	30
6. Diseño Planta Piloto.	31
6.1. Modelo de Diseño.	31
6.1.1. Modelo de Retiro del Contaminante Limitante.	31
6.1.2. Modelo Térmico.	33

6.1.3. Modelo Hidráulico.	34
6.1.3.1. H. de Flujo Superficial.	35
6.1.3.2. H. de Flujo Subterráneo.	37
6.2. Discusión del Modelo.	41
6.3. Detalle del Diseño de la Planta Piloto.	41
6.3.1. Estructura.	43
6.3.2. Vegetación.	46
6.3.3. Esquema Definitivo del Sistema.	54
6.4. Procedimientos de Operación.	55
7. Resultados y Métodos.	57
8. Cálculos y Diseño de la Planta Tamaño Real.	65
8.1. Diseño de la Planta Tamaño Real.	70
9. Conclusiones.	76
10. Bibliografía.	78
11. Anexos.	82
A. Decreto Supremo 90.	82
B. Tabla 1 "Concentración de cobre y pH en aguas superficiales".	87
Tabla 2 "Concentración de cobre y pH en aguas freáticas".	88
Tabla 3 "Ubicación de los piezómetros".	88
C. Tabla 4 "Comparación entre el humedal Campiche y las lagunas del escorial".	89
D. Tabla 5 "Propiedades físicas de agua".	90
E. Tabla 6 "Características típicas de los medios para humedales SFS.	91
F. Métodos de análisis de laboratorio.	92
G. Cálculos.	98
H. Estimación de Costos.	105
I. Reseña Histórica División Ventanas.	107
J. Organigrama de la División.	112
K. Carta Gantt de la Memoria.	113

Índice de Figuras.

Figura 1. Esquema. Humedales de flujo superficial.	12
Figura 2. Esquema. Humedales de flujo subterráneo.	13
Figura 3. Vista aérea del escorial.	24
Figura 4. Vista aérea del escorial con la ubicación de la planta piloto.	43
Figura 5. Vista del lugar donde se emplazará la planta piloto.	44
Figura 6. Vista 2 del lugar donde se emplazará la planta piloto.	44
Figura 7. Esquema. Celda de PVC con especificaciones.	44
Figura 8. Vista de la planta piloto en seco.	45
Figura 9. Vista 2 de la planta piloto en seco.	45
Figura 10. Vista 3 de la planta piloto en seco.	45
Figura 11. Esquema. Estructura de la Scirpus californicus.	47
Figura 12. Gráfico. Desempeño de Scirpus c.	48
Figura 13. Gráfico. Desempeño de Scirpus c. 2	49
Figura 14. Esquema. Proceso de precipitación de metales pesados.	50
Figura 15. Vista de planta piloto usada como modelo.	51
Figura 16. Gráfico. Rendimiento de planta piloto-modelo.	51
Figura 17. Vista aérea de un humedal escala industrial.	52
Figura 18. Vista frontal de un humedal escala industrial.	52
Figura 19. Esquema. Estructura de la Typha angustifolia.	53
Figura 20. Vista de la planta piloto con nominación de válvulas.	55
Figura 21. Vista de la planta piloto con nominación de celdas.	55
Figura 22. Vista de la distribución de la vegetación en la planta piloto.	55
Figura 23. Gráfico. Comportamiento de la concentración de Cu.	63
Figura 24. Gráfico. Comportamiento de la concentración de As.	64
Figura 25. Gráfico. Comportamiento de la concentración de Pb.	64
Figura 26. Gráfico. Comportamiento del pH.	65
Figura 27. Gráfico. Comportamiento de la K_T para el Cu.	69
Figura 28. Vista aérea del escorial con la ubicación de la planta diseñada.	74
Figura 29. Gráfico. Comportamiento de la K_T (As) versus la temperatura.	75
Figura 30. Gráfico. Comportamiento de la K_T para el As.	102
Figura 31. Gráfico. Comportamiento de la K_T para el Pb.	105
Figura 32. Organigrama de la División Ventanas de Codelco 2006.	113
Figura 33. Carta Gantt del desarrollo de esta memoria.	114

Índice de Tablas

Tabla 1. Concentraciones típicas de metales pesados en la naturaleza.	17
Tabla 2. Conc. de Cu y As en el H. Campiche y en el escorial.	24
Tabla 3. Composición típica de la escoria de horno eléctrico.	28
Tabla 4. Evaluaciones de la escoria (test EPA).	29
Tabla 5. Resumen consideraciones de diseño.	31
Tabla 6. Dimensiones de la celda de la planta piloto.	43
Tabla 7. Programa de actividades de la planta piloto.	56
Tabla 8. Flujos por celda.	57-58
Tabla 9. Temperatura diaria promedio.	58-59
Tablas 10-21. Campañas de muestreo en la planta piloto.	59-61
Tabla 22. Temp., flujo y concentración de Cu en la serie 1.	65
Tabla 23. Temp., flujo y concentración de Cu en la serie 2.	65
Tabla 24. Temp., flujo y concentración de Cu en la serie 3.	66
Tabla 25. Temp., flujo y concentración de Cu en la serie 4.	66
Tablas 26-29. Cálculo de la K_T (Cu) en las 4 series.	67-68
Tabla 30. Cálculo de área por contaminante y por serie.	70
Tabla 31. Cálculo del largo, ancho y de la razón L/A.	71
Tabla 32. Cálculo del número de celdas y re-cálculo de L/A.	71
Tabla 33. Dimensiones de los humedales por serie.	72
Tabla 34. Características del líquido a tratar.	72

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

- Generar una alternativa para recuperar las aguas superficiales del escorial utilizando un sistema de tratamiento natural en la regulación del pH y el retiro de metales pesados desde las aguas en cuestión.

1.2 Objetivos Específicos

- Recopilación de antecedentes en lo referente al uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados procedentes de procesos relacionados con la minería.
- Diseño y construcción de una planta piloto de humedales artificiales, para la recuperación de las aguas superficiales del escorial.
- Evaluación del desempeño de este sistema desde el punto de vista operativo y de proyección.

2. Introducción

La industria de explotación minera es una de las actividades más problemáticas en todo el mundo. La extracción minera y su proceso son fuente de muchos contaminantes que invaden el ambiente circundante, de ahí la contaminación de los cursos de agua, del suelo y del aire. En la mayoría de los casos la transferencia de contaminantes al medio ambiente es directa pero, hay casos en que este traspaso no es inmediato. En el caso particular de este trabajo, el traspaso es producto de la exposición de un escorial a aguas de distinta procedencia (lluvia, napas, esteros, etc), dicha agua generó dos cuerpos de agua inscritos en el área del escorial, debido a la naturaleza de su origen el agua en estos cuerpos contiene metales pesados en niveles que hace imposible su descarte inmediato. Si esta agua contaminada alcanza los cuerpos del agua naturales, las alteraciones del ecosistema de hecho ocurrirán. La flora y la fauna pueden ser afectadas y los recursos hídricos pueden tornarse dañinos para el consumo humano o para los propósitos agrícolas e industriales. También la infiltración de estas aguas puede contaminar suelos y el agua subterránea.

Los humedales construidos se han considerado como una de las posibles soluciones a largo plazo para los residuos líquidos de la minería. Varias investigaciones han revelado los resultados positivos con respecto al uso de humedales artificiales para tratar las aguas contaminadas por actividades mineras.

Esta tecnología permite optimizar los mismos procesos que se encuentran en humedales naturales: filtración, sedimentación, inmovilización física y química, y descomposición química y biológica. Además, los humedales construidos proporcionan a un método efectivo y de bajo costo para remover agentes contaminadores de los residuos líquidos de la minería.

Aunque en algunos casos el tratamiento en humedales construidos no puede alcanzar el estándar de efluentes, centenares de estos sistemas son ahora usados para disminuir concentraciones de contaminantes de minas activas, reclamadas y abandonadas antes de que el agua sea liberada.

3. Marco Teórico

3.1 Descripción de la Tecnología

El término "humedales construidos" se refiere a un área diseñada y construida para contener la planta de humedales a través de la cual, las aguas residuales pasan para ser tratadas. El propósito de los humedales construidos para tratamiento es permitir que ocurra la reacción química y biológica natural en el sistema de tratamiento, y no en el cuerpo de recepción de agua. Las plantas y los microorganismos desempeñan un papel importante. Las plantas proporcionan un área superficial para microbios y transportan el oxígeno produciendo una zona de oxidación en la zona circundante donde adicionalmente existen poblaciones microbianas. Este complejo de vegetación y microbios tiene una alta eficiencia en modificar nutrientes, metales y otros compuestos.

Esta tecnología se está volviendo atractiva para tratamiento de RILes de minería puesto que ofrece mayores ventajas sobre sistemas de tratamiento convencional (como tratamiento químico). El uso de químicos y energía están virtualmente eliminados. Sin embargo después del tratamiento, el agua puede requerir un tratamiento químico adicional.

3.1.1 Ventajas

Los humedales construidos ofrecen varias ventajas (Hammer, 1989), porque son:

- Relativamente económicos para construir y operar.
- Fáciles de mantener.
- Eficaces y confiables para el tratamiento de aguas residuales.
- Relativamente tolerantes a los cambios de carga hidráulica y biológica.
- Puede proporcionar beneficios ecológicos reconocidos como una buena alternativa de tratamiento por muchos reguladores y grupos ambientales.

3.1.2 Desventajas

Sin embargo, también tienen algunas desventajas (Hammer, 1989), y estas son:

- Requisitos de área a ser usada relativamente grandes.
- Criterios de diseño y operación actual imprecisos.

- Complejidad biológica e hidrológica.
- Diferencias en funcionamiento con el cambio de las estaciones.
- Posibles problemas con olor y mosquitos.

3.2 Tipos de Humedales Artificiales

Hay dos tipos básicos de humedales construidos clasificados por régimen hidrológico. Los sistemas de aguas superficiales y los sistemas de aguas subterráneas. Ambos tipos son excavaciones bajas, aisladas para prevenir la infiltración y llenadas de grava o de piedra. La grava o la piedra soporta las raíces de la planta y proporciona superficies en las cuales los microorganismos crecen. Las plantas y los microbios están implicados en el proceso del tratamiento de aguas residuales. Muchos humedales construidos consisten en dos o tres células en series. Las plantas que son usadas en el humedal varían de entrada a salida con las plantas cercanas a la entrada que son arraigadas y capaz de manejar grandes cantidades de aguas residuales; plantas arraigadas más profundas están situadas cerca del extremo del empalme.

Varias encuestas indican que tanto los humedales superficiales, como los subterráneos se pueden utilizar con eficacia en el tratamiento de aguas con metales pesados.

3.2.1 Humedales de Flujo Superficial (FWS)

Este sistema consiste en canales donde el nivel del agua está sobre la superficie de la tierra y la vegetación se arraiga y emerge hacia la superficie del agua. Las bajas velocidades y la presencia de plantas proporcionan las condiciones propicias para la sedimentación y la filtración. "Biofilms" en la superficie de la planta transforman a los agentes contaminadores en formas inofensivas.

La mayoría de los humedales de flujo superficial son piscinas bajas con una profundidad de agua de 10 a 50 centímetros. La figura 1 (Gamonal, 1996) ilustra conceptos básicos de humedales superficiales construidos.

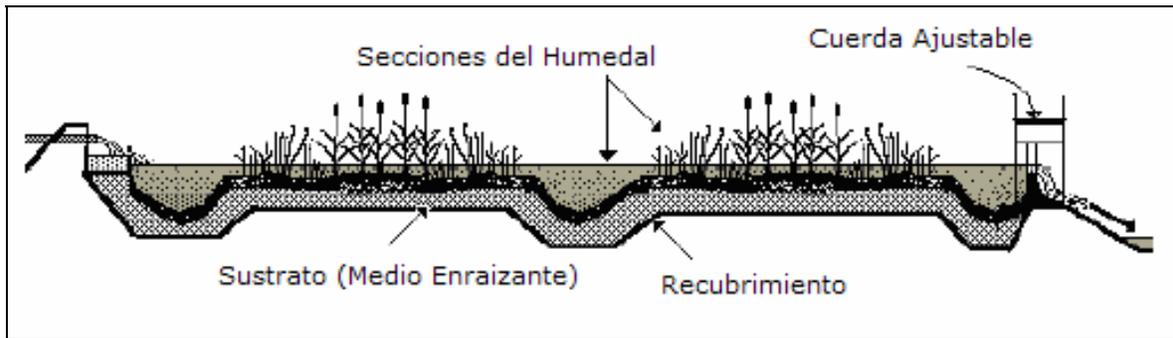


Fig. 1

3.2.2 Humedales de Flujo Subterráneo (SFS)

Este sistema consiste en canales donde las aguas residuales se infiltran por un medio poroso, tal como rocas, grava o arena gruesa que utilizan el sistema de raíces de vegetación. Las plantas de humedales fueron seleccionadas para contribuir al retiro y transformación de la contaminación proporcionando superficies biológicamente activas, a través de la captación de nutrientes y con la creación de una rizosfera oxidada. La última característica resulta del transporte activo del oxígeno a las raíces sumergidas de las plantas.

Las profundidades están típicamente entre 0,6 y 1,0 m y el fondo del cauce se inclina para reducir al mínimo el flujo superficial de agua.

Este sistema ofrece algunas ventajas como: (1) menos área requerida, ya que las áreas superficiales para la absorción, filtración y los biofilms son mucho más altos; y (2) se reducen los insectos y los problemas del olor, puesto que las aguas residuales permanecen debajo de la superficie de la grava. Sin embargo, un problema común es el inadecuado gradiente hidráulico, que da lugar a flujos superficiales y también que estos humedales son más difíciles de mantener. (Gamonal, 1996)

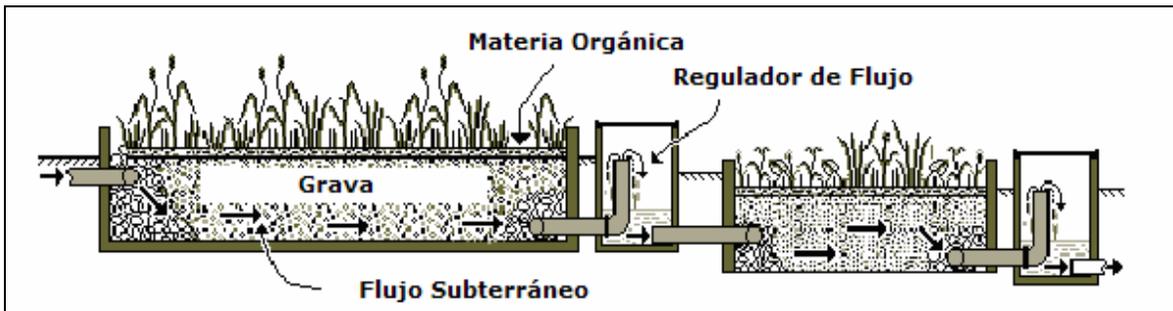


Fig. 2

3.3 Los procesos de retiro

Los humedales artificiales son ocupados para el tratamiento de aguas con una gran diversidad de contaminantes siendo los residuos orgánicos, es decir aguas servidas, su principal uso. Sin embargo en este caso el tratamiento en humedales construidos está dirigido a la remoción de los metales pesados y al aumento del pH, la mayoría de los residuos líquidos de la minería son ácidos, aunque este no es el caso de todos modos hacemos referencia a esta propiedad debido a que es importante al considerar que tipo de residuos pueden ser tratados con esta tecnología. En esta sección se explican ambos procesos.

El retiro del metal

La aplicación de los humedales para remover los metales desde corrientes líquidas es relativamente reciente, comenzando en los años 80's. Sin embargo, en los últimos 20 años, el conocimiento referente a esta capacidad de humedales construidos está creciendo y, hoy en día, éstos son altamente apreciados por su alta capacidad de acumular los metales pesados principalmente por la adsorción, la precipitación y formación de complejos, pero incluso cuando los estudios muestran resultados positivos, se sigue buscando los mecanismos exactos y a los factores que controlan.

El retiro del metal se asocia altamente a la acción de plantas y de microorganismos. Varios investigadores destacan las capacidades de plantas para contribuir al retiro del

metal. Los macrofitos juegan un papel importante en estos procesos puesto que pueden proveer oxígeno y la materia orgánica a la matriz.

Adicionalmente, las plantas del humedal pueden potencialmente estimular el crecimiento de bacterias que oxidan el metal por transferencia del oxígeno en la rizosfera. Y de la misma manera acentúa la capacidad de las plantas de los humedales de estimular procesos microbianos. Los procesos principales implicados en el retiro del metal se explican como siguen:

3.3.1 Adsorción e intercambio catiónico:

Implica el atascamiento de partículas o de sustancias disueltas en la solución ya sea en la planta o la superficie de la matriz. En una reacción del intercambio catiónico, los iones positivamente cargados del metal en la solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material de la adsorción. Las características del intercambio catiónico de los substratos de los humedales se han atribuido a los grupos funcionales del carboxy (- COOH) en los ácidos de los tejidos finos celulares de las plantas.

Debido a las características de los metales, agentes orgánicos como setas, abono y aserrín se agregan a los suelos para realizar el retiro del metal. Por ejemplo, la absorción sobre turba y aserrín es responsable de eliminar el 50% a 80% de los metales en residuos ácidos de minería. Por otra parte, la presencia en los suelos de arcilla en un sistema superficial, potencia las oportunidades del retiro por la adsorción.

3.3.2 Procesos Microbiano-mediados:

Zonas aerobias y anaerobias pueden estar presentes en un humedal construido. Las bacterias que oxidan el metal están presentes en la zona aerobia y causan la precipitación de los óxidos de metal, mientras que las bacterias sulfato reductoras están presentes en las zonas anaerobias y causan la precipitación de sulfatos.

La oxidación de metal mediada por microbios, *Thiobacillus ferrooxidans*, seguida por la precipitación del hidróxido de hierro, se considera el mecanismo más importante del retiro de metales de los humedales que tratan aguas residuales ricas en metal. La

oxidación del metal tiene la desventaja de producir iones de hidrógeno, de tal modo que la acidez aumenta.

La reducción de sulfato por medio microbiano consume iones de sulfato y produce hidrógeno sulfuroso y alcalinidad en forma de ion de bicarbonato. Además se produce H_2S que disuelve e ioniza para dar los iones del sulfuro, que reaccionan con una parte de los iones del metal para producir precipitaciones del sulfuro del metal. La precipitación de metales como los sulfuros tiene las siguientes ventajas (en comparación con los óxidos):

- La alcalinidad producida por la reducción del sulfato ayuda para neutralizar la acidez.
- Los precipitados del sulfato son más densos que los precipitados del óxido, de tal modo el desarrollo es más rápido.
- Los sulfuros se precipitan dentro de los sedimentos orgánicos y así son menos vulnerables a la perturbación por las oleadas repentinas en flujo.

La reducción del sulfato se reconoce como el mejor tratamiento para aguas con metales pesados, porque no solamente quitan los metales sino que también se aumenta el pH alcanzando niveles cercanos a neutro.

3.3.3 Filtración:

Las plantas pueden contribuir al retiro del metal actuando como filtro para absorber algunos metales del flujo.

Para realzar la capacidad de filtración, la entrada de sustancia artificial y materia orgánica es usada como una estrategia exitosa. Se hace esto porque la capacidad de filtración física de un humedal será la última instancia de intercambio del metal para convertirse en metal saturado.

3.4 La selección de la vegetación

La vegetación desempeña un papel importante en este sistema de tratamiento, especialmente en el estímulo de procesos microbianos de retiro del metal. La selección de las plantas es una importante etapa para alcanzar un tratamiento acertado. Sin

embargo, poco trabajo existe en la selección apropiada de la especie de planta para los humedales, todo esto puede tener implicaciones importantes para el éxito a largo plazo de un proyecto. Puesto que el residuo generalmente tiene un pH no neutro y contiene altas cantidades de metales, las plantas tienen que ser seleccionadas considerando su capacidad de resistir estas condiciones. Además, la selección de la vegetación se debe hacer basándose en el conocimiento de condiciones locales, y su capacidad de proporcionar las funciones requeridas.

Dos especies principales se utilizan en el tratamiento de residuos ácidos en humedales construidos: totora (typha) y turba (Sphagnum). Ambas son tolerantes al ácido y capaces de prosperar bajo variedad de condiciones ambientales.

El typha es fácil de propagar, produce una biomasa grande, y puede crecer en aguas con concentraciones del hierro de hasta 100 mg/l. Existe en la mayoría de los sistemas de humedales. Esta versatilidad y resistencia, junto con su capacidad de fijar el hierro y el manganeso por adsorción, le hacen una excelente alternativa.

Los estudios en Sphagnum muestran influencia significativa en la eliminación de los metales y el aumento del pH. Sin embargo, el Sphagnum es difícil de establecer y mantener. Este problema de desarrollo la hace menos viable que el uso de typha. También es utilizada la Scirpus Californicus que como habilidades principales tiene, mantener el sustrato reducido, es una fuente de carbono orgánico para la bacteria reductora de sulfatos y se degrada lentamente lo que aumenta la cantidad de sitios orgánicos activos.

Existe una amplia variedad de plantas que han sido utilizadas con objetivos similares al expresado en este proyecto; sin embargo, es nuestra intención centrarnos en las especies que existen en esta zona y sobre todo en el humedal del estero Campiche.

3.5 Metales pesados en humedales

Los metales pesados son de gran importancia debido a su enorme impacto medioambiental. Son elementos acumulativos y no biodegradables: algunos de ellos son esenciales a bajas concentraciones, y tóxicos cuando superan un cierto umbral, mientras que otros son tóxicos "per se".

En la actualidad no se dispone de una definición oficial generalmente aceptada, ni de un listado de estos elementos, ni de una referencia clara y exacta de las propiedades o caracteres de los metales pesados que provenga de alguna sociedad científica u organismo referente de alto nivel, como podría ser la IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) o la EPA, (Agencia de Protección Ambiental de los EUA), por ejemplo. Por la razón anterior se emplean diversos criterios o pautas para definir los metales pesados. Entre las principales propiedades consideradas para ello, se cuentan, la densidad, el peso atómico y la masa atómica. (Schinitman, 2004).

Técnicamente se denomina metales pesados a aquellos elementos químicos que poseen un peso atómico comprendido entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg), y que presentan un peso específico superior a 4 (g cm^{-3}), como también los elementos metálicos cuya densidad es igual o superior a 6 (g/cm^3) cuando está en forma elemental (Kabata-Pendías y Pendías, 1992).

Algunos autores consideran ambigua esta denominación y la cambian por metales traza (Ward, 1995). Esta denominación engloba a todos los elementos presentes, no detectables a través de técnicas analíticas clásicas, por lo que se considera metal traza a los elementos detectables en un rango de concentración de 100 a 0.01 (mg / kg).

En adelante se utilizará el termino metales pesados, ya que en algunos casos están presentes en concentraciones que superan los 100 (mg / kg).

Algunas de las características peculiares de los metales pesados son (Fechinelli et al, 2001):

- Poseen carácter acumulativo, su concentración no experimenta disminución en el tiempo.
- Son necesarios y beneficiosos para las plantas, pero si excede los niveles de concentración se tornan tóxicos.
- Se encuentran siempre en los suelos a niveles denominados fondo, concentraciones que no son externas, sino que provienen del material parental originario de las rocas y de las transformaciones de estas.

- Con frecuencia se encuentran como cationes que interactúan fuertemente con la matriz suelo, lo que en ocasiones se traduce en que incluso a altas concentraciones pueden encontrarse en forma química no dañina o inerte. Sin embargo estos pueden movilizarse o cambiar de forma química debido a los cambios en las concentraciones medioambientales, cambios por el uso de suelo o por la saturación de la capacidad de tamponamiento de suelo. Por esta razón se les ha catalogado como bomba de relojería química.

En la siguiente tabla se resume la composición típica en metales pesados de diferentes entes naturales.

Tabla 1

Elemento	Suelos (mg/kg)	Plantas Terrestres (mg/kg)	Agua Marina (ug/l)	Agua Continental (ug/l)	Lluvia (ug/l)
As	6	0.2-7	1.3-2.5	0.5	-
Cd	0.35	0.1-2.4	<0.025	0.1	0.02-0.06
Co	8	<1	0.020	0.2	0.17-0.95
Cr	70	0.03-10	0.09-0.55	1	-
Cu	30	5-15	0.01	3	0.01-15
Fe	4	70-700	2	500	0.4-84
Hg	0.06	<0.02	<0.012	0.1	-
Mo	1.2	0.06-3	10	0.5	-
Pb	35	1-13	<0.02	3	-
Se	0.4	0.03	0.06-0.12	0.2	0.01-0.77
Sn	4	0.02-2	0.004	<0.01	<0.01
Zn	90	20-400	0.6	10	0.05-100

(Mas y Azcue,1993)

Aqua

Los metales pesados se encuentran en aguas como coloides, partículas minerales (sólidos en suspensión), o fases disueltas (cationes o iones complejos).

Las formas coloidales suelen dar lugar a la formación de hidróxidos, mientras que las partículas sólidas incluyen una gran variedad de minerales. Las fases disueltas pueden

a su vez ser capturadas por adsorción o absorción en arcillas o hidróxidos. Adicionalmente, los compuestos orgánicos pueden constituir fases con gran capacidad de captura de cationes metálicos, que en ocasiones dan lugar a fases extremadamente tóxicas (p.ej., metilmercurio: CH_3Hg).

A su vez la química del sistema acuoso regula las tasas de adsorción- absorción en el sistema agua-sedimento. La adsorción remueve el metal de la columna de agua; la desorción lo incorpora nuevamente a ésta. Los parámetros que regulan el sistema son: la salinidad, el potencial redox (Eh), y el pH:

- Un incremento de la salinidad conlleva una competencia, entre metales pesados y metales grupos I y II, por los sitios de ligazón (p.ej., espaciado interlaminaar en las arcillas), lo que se traduce en la expulsión de los metales pesados, y su devolución a la columna de agua.
- Un incremento del Eh genera la inestabilidad de los compuestos reducidos (p.ej., sulfuros), poniendo el metal en solución.
- Un decrecimiento del pH tiene dos efectos: 1) induce la disolución de compuestos metal-carbonato (p.ej., cerusita: PbCO_3); y 2) aumenta la solubilidad de los metales disueltos.

La disminución del pH puede ligarse directamente a la serie de fenómenos físico-químicos que se derivan de la oxidación de especies sulfuradas (particularmente la pirita: FeS_2). La consecuencia directa es la formación del denominado drenaje ácido. El sistema se encuentra así fuertemente regulado por: 1) las cantidades iniciales de pirita en el yacimiento (de sulfuros o carbones piritosos) o la escombrera (*mineral dump*); 2) por la presencia de bacterias oxidantes (p.ej., *T. ferrooxidans*); y 3) los niveles de oxígeno.

3.5.1 Comportamiento de algunos metales pesados relevantes

Arsénico

La absorción de iones arsenicales en el suelo por compuestos de hierro y aluminio, restringe enormemente la disponibilidad de As para las plantas.

El grado de absorción del As en las plantas se relaciona aparentemente con la concentración de As soluble en el suelo, la composición química del suelo y la especie de plantas. (Friberg et. al., 1980)

Varios informes sobre la relación lineal entre el contenido de As de la vegetación, las concentraciones en el suelo del As total y soluble sugieren que las plantas absorben As en forma pasiva con el flujo de agua. (Kabata-Pendías y Pendías, 1986)

El arsénico en los suelos puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por las arcillas o la materia orgánica. Muchos de estos procesos son mediados por la materia orgánica la que puede producir transformaciones del tipo:

- Cambios de redox que inducen la transformación arsenito-arsenato.
- La reducción y metilación del arsénico.
- La biosíntesis de compuestos de arsénico.

Las formas solubles del arsénico son fuertemente tóxicas.

Es poco probable que el As adsorbido en el suelo sea difundido nuevamente. Generalmente, la retención de As por el suelo aumenta con los años. Sin embargo, el As combinado con óxidos de hierro y aluminio puede ser liberado en la hidrólisis, con la reducción del potencial del suelo (Kabata-Pendías y Pendías, 1986).

Cadmio

El Cd es absorbido fácil y rápidamente por los vegetales, tanto por el sistema radicular como por los estomas foliares, con una alta tasa de absorción condicionada por el pH del suelo, esto es por la fracción soluble del Cd, y por factores propios de las plantas.(Eriksson, 1989)

En general, el Cd es absorbido y translocado hacia órganos aéreos por la mayoría de las especies siguiendo una función lineal o de acumulación, en función del contenido disponible en los suelos, sin asociación con el rendimiento al menos en un rango limitado. (Kabata-Pendías y Pendías, 1986)

En la gran mayoría de las especies, el contenido de Cd en hojas y tallos es proporcional al contenido soluble en suelos pero no ocurre así con los órganos reproductivos, hacia donde la translocación es de baja magnitud; si la absorción es radicular, las mayores acumulaciones se producen en las raíces. En todo caso, las especies y genotipos varían en la capacidad para absorber Cd y en los modelos de distribución interna. (Mengel y Kirby, 1987)

Su movilidad en suelos esta controlada principalmente por el pH y el estado de oxidación, sin embargo el principal estado de oxidación en ambientes naturales es Cd+2 (Kabata-Pendías y Pendías, 1986).

La adsorción del Cd+2 en el suelo está fuertemente ligada al pH: a mayor pH, mayor adsorción, menor solubilidad y menor disponibilidad para las plantas. (Fernández y Henríquez, 1989)

Se estima que la adsorción competitiva por arcillas es el proceso predominante en la retención de Cd por los suelos, aunque también coparticipa la materia orgánica, que incluso retiene Cd con mayor energía que las arcillas. (Eriksson, 1988)

Cobre

En el suelo, el Cu tiene una alta afinidad con sustancias inorgánicas y orgánicas. Sin embargo, también puede existir como iones solubles y complejados. El cobre en forma soluble esta mucho más biodisponible y es más propenso a migrar en el ambiente, que si se encuentra asociado a materia orgánica y presente como precipitado insoluble. (Davies, 1992)

El Cu se encuentra en los suelos mayormente como Cu⁺². Sin embargo, la reducción de Cu⁺¹ y Cu⁰ es posible bajo condiciones reducidas (McBride et al., 1997). El cobre se asocia mayormente a sulfuros, los cuales son muy insolubles bajo condiciones anóxicas, es por esto, que en suelos reducidos, el Cu tiene muy baja movilidad. Los sulfuros se disuelven bajo condiciones óxicas vía oxidación de sulfatos.

El Cu⁺² es la forma más biodisponible y más tóxica, tanto en suelos como en agua (Adriano, 2001). Este ión forma los complejos y compuestos de coordinación más estables con la fracción orgánica del suelo, también con las arcillas y con otros compuestos inorgánicos, esta adsorción aumenta con el incremento de pH (McBride et al., 1997).

Hierro

Un contenido mínimo en las plantas es esencial tanto para el desarrollo vegetal como para la salud humana y de animales. Es clasificado como oligoelemento, metal necesario para el desarrollo de la vida de determinados organismos, requerido en pequeñas cantidades.

La absorción de Fe por las plantas está controlada metabólicamente, aunque puede ser absorbido como, Fe^{2+} o como quelatos de Fe. Se cree que la habilidad de las raíces para reducir Fe^{3+} a Fe^{2+} es fundamental en la absorción de este catión por la mayoría de las plantas. A niveles normales de pH del suelo, los complejos orgánicos de Fe aparentemente juegan un papel importante en la nutrición de la planta. La separación del Fe complejado, previo al paso de absorción de la raíz, requiere de la reducción de Fe^{+3} a Fe^{+2} en la superficie de la raíz. Generalmente, las raíces absorben el catión Fe^{2+} . En los exudados del xilema, el Fe parece presentarse no-complejado; sin embargo, su transporte es mediado ampliamente por quelatos de citrato. En los tejidos de la planta, el Fe móvil se ha identificado como citratos y ferredoxinas solubles. El Fe no es transportado fácilmente al interior de las plantas y de este modo su deficiencia aparece primero en las partes jóvenes de la planta. El contenido de Fe es relativamente bajo en los tejidos de crecimiento intensivo. (Kabata-Pendías y Pendías, 1986)

Se cree que el Fe en suelos se presenta principalmente en forma de óxidos e hidróxidos, como pequeñas partículas o asociado a las superficies de otros minerales. Sin embargo, en horizontes de suelos ricos en materia orgánica el Fe parece estar principalmente en forma quelatada. Tanto los compuestos minerales de Fe como los orgánicos son fácilmente transformados en los suelos, y la materia orgánica parece tener una influencia significativa en la formación de óxidos de Fe. Las transformaciones de los compuestos de Fe son afectados también por microorganismos. Algunas especies de bacterias (por ejemplo *Metallogenium* sp) están envueltas en el ciclo de Fe y se sabe que acumulan este metal sobre la superficie de las células vivas. (Kabata-Pendías y Pendías, 1986).

Plomo

Existe de manera natural en todas las plantas, al igual que en el suelo, el aire y el agua. Aunque se han determinado concentraciones variables de Pb en las plantas. (OPS, 1979)

La mayor parte de plomo de las plantas obtenido del suelo se localiza en el sistema radicular y solo pequeñas cantidades llegan a las partes aéreas de las mismas. (Stoker y Seager, 1981).

Los suelos ácidos tienen generalmente un contenido de Pb inferior al de los suelos alcalinos. La naturaleza de la materia orgánica del suelo también influye considerablemente sobre el contenido de Pb. Algunas materias orgánicas son ricas en componentes quelantes y forman enlaces con el Pb, ya sea favoreciendo su salida del suelo o fijando el metal, según las propiedades de solubilidad del complejo. (OPS, 1979)

En suelos y sedimentos, el destino del Pb se ve afectado por procesos similares que a menudo llevan a la formación de complejos metálicos orgánicos relativamente estables. La mayor parte del plomo queda retenido y muy poco se transporta a las aguas superficiales o subterráneas. Sin embargo, es posible que se produzca el reingreso a las aguas superficiales como resultado de la erosión de suelo con contenido de plomo o mediante la conversión en sulfato de plomo, forma relativamente soluble, en la superficie del suelo o sedimento (ATSDR, 1997; Sadiq, 1992; Alloway, 1990)

4. Situación Actual

Al interior de las instalaciones de la División Ventanas de CODELCO, existe un escorial que recibe los desechos de los hornos de concentrado (HTE). Esta escoria, rica en metales pesados, es almacenada al aire libre en dicho escorial, luego de ser enfriada y picada generando pilas de escoria.

Como se puede ver, en la imagen, el escorial colinda con un humedal natural y las pilas de escoria están en contacto con las aguas de dicho humedal. Además el escorial y el humedal deben mantener una estrecha relación subterránea, ya que el escorial no cuenta con barreras diseñadas para aislarlo del medio.

De esta relación y producto de otros factores, como excavaciones en el escorial, han surgido dos lagunas internas del escorial, que también se pueden ver en la figura 3.



Fig. 3

No se tiene certeza del volumen de estas lagunas, solo se han hecho análisis para conocer el contenido de metales pesados y pH, siendo los resultados no muy alentadores. La Universidad de Playa Ancha ha realizado un estudio de comparación entre las lagunas del escorial y las lagunas del humedal, cuyos resultados se muestran en la tabla que sigue. En la tabla, ESC11 Y ESC12 son muestras de la laguna sur del escorial y ESC2 es de la laguna norte, por otro lado HC1, 2 y 3 son muestras del humedal natural.

Tabla 2

RESULTADOS DE MUESTRAS DE AGUA Y SEDIMENTOS							
PARAMETROS mg/lit - mg/kg	MATRIZ	PUNTOS DE MUESTREO					
		ESC11	ESC12	ESC2	HC1	HC2	HC3
As TOTAL	Agua	0,462	0,522	0,568	0,271	0,298	0,209
	Sedimentos	338		86		20	45
Cu TOTAL	Agua	0,14	0,1	0,08	0,2	0,17	0,1
	Sedimentos	24600		1536		252	786

Según el decreto D.S. 90 los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de aguas superficiales continentales indican para cobre y arsénico valores máximos de 0.1 mg/lit.

El arsénico se encuentra totalmente sobre la norma en todos los puntos de muestra por otro lado el cobre se encuentra en el límite, incluso en solo un punto está bajo la norma.

La norma no es completamente aplicable ya que técnicamente no se está vertiendo ningún líquido, pero es innegable que el traspaso de metales pesados desde la escoria al medio ambiente ocurre por medio del agua que se encuentra en el escorial. Actualmente no hay contacto superficial entre los cuerpos de agua, pero un pretil de entre 1 o 2 metros de tierra sin impermeabilización no es una barrera efectiva y el traspaso de agua con metales pesados ocurre en forma subterránea.

Para complementar estos datos la UPLACED esta iniciando un estudio sobre la lixiviación de la escoria, con el fin de determinar si existe reacción y en el caso que así

ocurra determinar la carga de metales pesados que la escoria es capaz de liberar al medio.

En el caso que no existiera lixiviación, nuestra situación no cambia demasiado ya que la contaminación de las aguas superficiales del escorial es un hecho.

Como dato anexo se incluyen los resultados de unos análisis encargados por el departamento responsable de la administración y operación del escorial (anexo B). Estos análisis incluyen datos del agua superficial y de la freática para lo cual se construyeron 4 pozos. Solo se realizaron para cobre y pH, pero los resultados son aún peores. (Vera, 2005)

Para clasificar estas lagunas del escorial se tienen dos posibilidades; primero considerarla una laguna de retención de aguas contaminadas, en tal caso no cuenta con las características estructurales necesarias y segundo si la consideramos un cuerpo natural de agua parte de un sistema hídrico mayor, el problema reside en que el agua esta más contaminada que la de su entorno y con niveles por sobre la norma pertinente.

4.1 Condiciones geotécnicas del emplazamiento del botadero.

4.1.1 Ubicación.

La división Ventanas de Codelco está ubicada en la bahía de Quintero a un costado de la ruta F-30E. Esta fundición se encuentra operando desde 1964 produciendo escoria, principalmente proveniente de la fundición de minerales de cobre.

De acuerdo al plano regulador P.I.V. MS E-7 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo Secretaría Ministerial V Región perteneciente a la comuna de Puchuncaví, el Uso de Suelo del lugar se encuentra catalogado como de Industrias Peligrosas y jamás ha tenido otro uso que el actual.

4.1.2 Procedencia de escorias.

La fundición y refinería comenzó sus operaciones en 1964 con un horno de reverbero y 3 convertidores Pierce Smith, este horno operó hasta 1990 cuando fue eliminado,

como parte del plan de descontaminación de la zona. El año 1985 se incorporó un convertidor teniente el cual opera actualmente con un horno eléctrico que procesa las escorias provenientes de este convertidor.

Enami, anterior administrador de la fundición y refinería, vendió gran parte de la escoria del horno de reverbero las cuales tenían una ley metálica aún aprovechable por otras tecnologías.

4.2 Antecedentes geológicos.

La zona del botadero corresponde a una zona baja de borde costero con gran presencia de arenas de origen eólico y aguas de origen meteórico que se acumulan en esta zona depresionaria. Al norte del escorial se encuentra el estero de Puchuncaví (Campiche) el que desemboca en la bahía de Quintero, en las cercanías de Ventanas, este estero podría aportar con aguas subterráneas a la zona en estudio, por lo cual la presencia de aguas superficiales y subterráneas es un factor constante en la zona

4.2.1 Marco geológico general

De acuerdo a H. Thomas (1958) y la actualización del Instituto de Investigaciones Geológicas (1968), el marco geológico general del lugar permite distinguir las siguientes unidades:

- Macizos de rocas intrusivas graníticas con predominio de granodioritas que configuran las penínsulas de los molles.
- Cordones continuos graníticos y cuerpos sedimentarios y volcánicos estratificados supuestamente de edad Jurásica y rocas metamórficas del Paleozoico que conforman el límite oriental de la zona de Quintero, ubicados entre 6 y 10 Km de la línea de la costa actual.
- Materiales sedimentarios ubicados en el perímetro encerrado por los macizos y cordones mencionados anteriormente, y que se han originado entre el terciario superior (Plioceno) y el cuaternario más reciente. Estos últimos están expuestos en superficie y quedan configurados por depósitos de arena de origen eólico y depósitos fluviales, preferentemente de granulometría arenosa.

De acuerdo con las conclusiones citadas en los trabajos mencionados, el principal factor de control en el proceso de relleno y modelación del paisaje actual, habría sido el cambio de nivel experimentado por el mar.

4.2.2 Características climáticas de la zona

Corresponde a una zona templada cálida con precipitaciones concentradas en los meses de invierno y estación seca prolongada de unos seis meses, las oscilaciones térmicas y estacionales son pequeñas debido a la influencia moderadora del Océano, la temperatura media anual es de 14 °C a 15 °C. Las precipitaciones presentan un promedio anual (10 años) de 396.12 mm (www.directemar.cl)

4.3 Depósito de escoria

Las escorias que constituyen el botadero son transportadas aún fundidas por un sistema de ferrocarril y depositadas por volteo a muy altas temperaturas en la zona destinada al botadero. Debido al sistema de depositación y a la manipulación mecánica que se realiza del material durante la operación normal del botadero, este exhibe en terreno 2 tipos de estructuras características.

Uno de los estados en que se encuentra y que es el que predomina en el lugar, corresponde a un material granular con una distribución granulométrica similar a la que presentan las gravas sueltas. El otro estado en que se encuentra corresponde a una escoria estratificada la que es generada por la deposición en estado líquido del material fundido el que al enfriarse se fragmenta quedando en un estado similar al que presenta una roca muy fracturada.

En general el botadero de escorias presenta material granular en los taludes y en la superficie del mismo, y solo en zonas aisladas de los taludes se presenta el material estratificado, el cual ha sido expuesto por excavaciones ejecutadas en los bordes del botadero.

Un estudio encargado por Enami a "E.C. Rowe & Asociados" 2004 analizó la estabilidad de los taludes, abarcando aspectos como suelo de fundación, resistencia al corte,

sismos y consolidación del material. Concluyendo que los taludes del escorial son estables y seguros.

4.3.1 Capacidad y Vida Útil.

De acuerdo a los antecedentes disponibles la producción media anual de escoria es de 247.080 ton y considerando el espacio libre sin contar con el área de la laguna adyacente a los taludes, se tiene un volumen disponible equivalente a 2.248.918 m³ (Vera 2004).

La densidad del material depositado es 2.5 ton/m³, entonces, la vida util del botadero en las condiciones actuales es de 22,7 años (Vera 2004).

4.4 Características químicas de las escorias.

La composición de la escoria proveniente del horno eléctrico es variable, sin embargo, para algunos metales y compuestos de interés, los valores típicos son:

Tabla 3

Cu	0.800 %
As	0.006 %
Sb	0.008 %
SiO ₂	25.950 %
S	0.372 %
Fe	41.760 %
Fe ₃ O ₄	10.000 %

(Lab. Control de Calidad.)

Se realizó un estudio encargado por el Consejo Minero y la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI) para determinar si algunos residuos sólidos de minería, como relave de flotación, escorias de fundición, relave de cianuración, etc. son peligrosos. Para definir la peligrosidad se realizó una serie de estudios de toxicidad por lixiviación utilizando dos test, el SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) US EPA 1312 y el TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) US EPA 1311.

Las pruebas fueron realizadas para los siguientes elementos; As, Se, Hg, Ba, Cd, Cr, Pb y Ag. Se seleccionaron, para este estudio, 9 minas de cobre, 4 fundiciones de cobre y 3 minas de oro. La Fundición y Refinería de Ventanas fue considerada en el estudio, aportando con muestras para los análisis de escoria. Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4

Elemento		Conc.	Máx. conc. EPA
As	mg/L	0.01	5.0
Se	Mg/L	<0.01	100.0
Hg	Mg/L	<0.01	1.0
Ba	Mg/L	0.019	5.0
Cd	Mg/L	<0.005	5.0
Cr	Mg/L	<0.01	0.2
Pb	Mg/L	<0.5	1.0
Ag	Mg/L	<0.01	5.0
pH		8.97	

El valor incluido como máxima concentración EPA corresponde a la norma "Current Drinking Water Standards". Como se puede ver la escoria de fundición de Ventanas no sería un residuo peligroso. En general el estudio concluye que ninguno de los materiales estudiados son residuos peligrosos.

5. Hipótesis

Una vez analizados los datos entregados anteriormente, se puede resumir la situación a lo siguiente, dentro de las instalaciones de la empresa, específicamente el escorial, existen dos cuerpos de agua, esta agua presenta elevadas concentraciones de metales pesados. La causa de dichas concentraciones no esta clara, puede ser la presencia de la escoria y el íntimo contacto de esta con el agua o bien se trata de un estado natural de las aguas de la zona reforzado por la existencia de relaves mineros, de otras empresas, adyacentes a los afluentes del humedal. Cabe destacar en este punto un estudio presentado que concluye que la escoria que, actualmente, se produce en la Fundición de Ventanas no puede ser considerada un residuo peligroso dado que aprobó los test propuestos por la EPA para la clasificación de residuos.

De todos modos la aguas deben ser tratadas antes de ser liberadas. Debido a que la zona en que se encuentran no es industrial sino mas bien de almacenaje se propone un sistema pasivo de tratamiento utilizando humedales artificiales, además este método concuerda con la próximas modificaciones al plan regulador que clasificaría a esta zona como de protección de la flora y fauna, impidiendo la construcción de otro tipo de planta de tratamiento, modificaciones que además obligaría el traslado del escorial.

Para poder generar una solución definitiva es necesario construir un humedal piloto con el fin de encontrar los parámetros de diseño pertinentes al caso.

6. Diseño de Planta Piloto

La planta piloto fue diseñada en base a una serie de criterios surgidos de otras experiencias similares ajustándolos a la existencia de materiales y disponibilidad de espacio.

El primer paso para diseñar es caracterizar el fluido a tratar, composición, flujo y temperatura, si fuese necesario. En general, el proceso de caracterización es más complicado de lo que parece debido a determinados problemas que se presentan, por ejemplo, el valor del pH que es, generalmente, muy bajo, metales, compuestos biológicamente tóxicos, y gran variación estacional, de flujo y concentraciones de contaminantes.

Recopilando información relacionada se puede generar la siguiente tabla:

La tabla 5 resume algunas consideraciones del diseño.

Profundidad de agua (cm)	<45
Número de células	Múltiple
Razón largo/ancho	<4/1
Velocidad de flujo (pie/s)	0.1 – 1
Tiempo de retención (días)	0.25 - 75
Sustrato	Hongos, turba, aserrín, estiércol y fertilizante

(Gamonal, 1996)

6.1 Modelos de Diseño

6.1.1 Modelo de Retiro del Contaminante Limitante (Lara, 1999)

Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo pistón para la remoción de diversos contaminantes. Trataremos modelos de diseño para los dos tipos de sistemas, flujo libre (FWS) y flujo subterráneo (SFS), así como las consideraciones de tipo hidráulico y térmico.

Los modelos de diseño presentados son los sugeridos por Sherwood C. Reed en su libro *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, por considerarlos los más completos y acordes a los objetivos de este trabajo.

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo a pistón:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T \cdot t} \quad (1)$$

donde:

C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

K_T : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

t : tiempo de retención hidráulica, d

Este tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$t = \frac{L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q} \quad (2)$$

donde:

L: Largo de la celda del humedal, m

W: Ancho de la celda del humedal, m

y: Profundidad de la celda del humedal, m

n: porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La vegetación y los residuos ocupan algún espacio en los humedales tipo FWS, y el medio, raíces y otros sólidos hacen lo mismo en los del tipo SFS. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q: Caudal medio a través del humedal, m^3/d

$$Q = \frac{Q_e + Q_0}{2} \quad (3)$$

donde:

Q_e : Caudal de salida, m^3/d

Q_o : Caudal de entrada, m^3/d

Puede ser necesario calcular el caudal medio mediante la anterior expresión, para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal. Un diseño conservador debe asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de la operación. Esto requiere una primera suposición del área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Es usualmente razonable para un diseño preliminar suponer que los caudales de entrada y salida son iguales.

Es entonces posible determinar el área superficial del humedal combinando las ecuaciones (1) y (2):

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln(C_o / C_e)}{K_T \cdot y \cdot n} \quad (4)$$

donde:
 A_s : Área superficial del humedal, m^2

El valor de K_T para las ecuaciones (1) y (4) depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura.

6.1.2 Modelo Térmico

Como las reacciones biológicas del tratamiento dependen de la temperatura, es necesario para un buen diseño, estimar la temperatura del agua en el humedal. El rendimiento y la viabilidad de los humedales de tipo FWS en climas muy fríos están también influidos por la formación de hielo en el sistema. En el caso extremo, un humedal relativamente poco profundo podría congelarse, lo que daría lugar a un cese del proceso. Por tanto, existe también un procedimiento de cálculo para estimar la temperatura del agua en el humedal y el grosor de la capa de hielo.

Considerando el clima de la zona en cuestión y para no extender innecesariamente esta memoria, las ecuaciones correspondientes al modelo térmico serán omitidas, debido a la poca diferencia de temperaturas tanto entre estaciones como entre día y noche.

6.1.3 Modelo Hidráulico (Reed, 1998)

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo a pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

En un humedal SFS este concepto es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subterráneo se mantienen en circunstancias normales durante todo el periodo de funcionamiento del sistema. Esto solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico y unos métodos constructivos apropiados.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los FWS, y el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los SFS. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo-ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas FWS, Por tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo.

6.1.3.1 Humedales de Flujo Superficial

El flujo de agua en un humedal FWS es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal es descrita por la ecuación (5), depende de la profundidad del agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la vegetación. Otras aplicaciones de la ecuación de Manning para canales abiertos suponen que la resistencia por fricción solamente ocurre en el fondo y en las paredes del canal. En los humedales artificiales FWS la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que no es completamente válido pero es una aproximación aceptable.

$$v = \frac{1}{n} \cdot y^{2/3} \cdot s^{1/2} \quad (5)$$

donde:

v: velocidad de flujo, m/s

n: coeficiente de Manning, s/m^{1/3}

y: profundidad del agua en el humedal, m

s: gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m/m

Para los humedales, el número de Manning (n) es función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar según la localización o la estación. La relación está definida por:

$$n = \frac{a}{y^{1/2}} \quad (6)$$

donde:
a: factor de resistencia, s*m^{1/6}.

0.4 s*m^{1/6} para vegetación escasa de y >0.4 m

1.6 s*m^{1/6} para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de y > 0.3 m

6.4 s*m^{1/6} para vegetación muy densa y con capa de residuos, en humedales con profundidad (y) <=0.3 m

En muchas situaciones, con vegetación emergente típica, es aceptable asumir para propósitos de diseño valores de a entre 1 y 4. Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) tenemos.

$$v = \frac{1}{a} \cdot y^{7/6} \cdot s^{1/2} \quad (7)$$

Sustituyendo y reorganizando términos es posible llegar a una ecuación para determinar la longitud máxima de una celda de humedal.

$$v = \frac{Q}{W \cdot y} \quad W = \frac{A_s}{L} \quad s = \frac{(m) \cdot (y)}{L}$$

donde:

Q: Caudal, m³/d

W: Ancho de la celda de humedal, m

A_s: Área superficial de la celda de humedal, m²

L: Longitud de la celda de humedal, m

m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

Sustituyendo en la ecuación (7) y reordenando obtenemos:

$$L = \left[\frac{A_s \cdot y^{8/3} \cdot m^{1/2} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right]^{2/3} \quad (8)$$

El área superficial del humedal (A_s) se determina primero mediante el modelo de diseño de remoción del contaminante limitante. La ecuación (8) permite el cálculo directo de la longitud máxima aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Es aconsejable usar el gradiente hidráulico más

pequeño posible para tener una reserva en caso de necesitarse ajustes futuros. Una relación largo-ancho $\leq 3:1$ suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo eficiencia, pero otras combinaciones de longitud y gradiente hidráulico son posibles también de modo que se pueda ajustar la forma del humedal al sitio y su topografía. El valor de (m) usado en la ecuación, está típicamente entre 10 y 30% de la pérdida de carga disponible. La máxima pérdida de carga disponible es igual al total de la profundidad del agua (y) del humedal cuando $m=100\%$. Este no sería un diseño conservador, porque el humedal podría estar seco al final y no tendría capacidad de reserva si la resistencia al flujo aumentara en el futuro.

El valor de Q en la ecuación (8) es el caudal promedio entre la entrada y la salida, para tener en cuenta las pérdidas o ganancias de agua debidas a la evapotranspiración, filtración y precipitación. Es usualmente aceptable para un diseño preliminar suponer los caudales de entrada y salida iguales. Para el diseño final del sistema será necesario tener en cuenta estas pérdidas y ganancias.

6.1.3.2 Humedales de flujo subterráneo

La ley de Darcy, definida en la ecuación (9), describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales tipo SFS usando suelo y arena como medio del lecho. El mayor nivel de turbulencia en el flujo ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces la ecuación de Ergun es más apropiada para este caso.

La ley de Darcy no es estrictamente aplicable a los humedales de flujo subterráneo dadas las limitaciones físicas en el actual sistema. Este asume condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos en el flujo que pueden llegar a presentarse por una desigual porosidad o mala construcción. Si se utiliza una grava de tamaño pequeño o medio, si el sistema está apropiadamente construido para minimizar los cortocircuitos, si el sistema esta diseñado para tener una mínima dependencia del gradiente hidráulico y si las pérdidas y ganancias del sistema están

adecuadamente reconocidas, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal tipo SFS.

$$v = k_s \cdot s \quad \text{y dado que: } v = \frac{Q}{W \cdot y} \quad \text{Entonces: } Q = k_s \cdot A_c \cdot s \quad (9)$$

donde:

Q: Caudal promedio a través del humedal, m³/d [(Q_o+Q_e)/2]

k_s: Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/d.

A_c: Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m²

s: Gradiente hidráulico o "pendiente" de la superficie del agua en el sistema. m/m

v: Velocidad de "Darcy", la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d

Sustituyendo y reorganizando los términos es posible desarrollar una ecuación que determine de manera aceptable el ancho mínimo de una celda de humedal SFS que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{(m) \cdot (y)}{L} \quad L = \frac{A_s}{W} \quad A_c = (W) \cdot (y)$$

donde:

W: Ancho de una celda del humedal, m

A_s: Área superficial del humedal, m²

L: Longitud de la celda de humedal, m

m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

y: profundidad del agua en el humedal, m

$$W = \frac{1}{y} \cdot \left[\frac{Q \cdot A_s}{m \cdot k_s} \right]^{1/2} \quad (10)$$

El área superficial del humedal (A_s) se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño para remoción de contaminante limitante. La ecuación (10) permite calcular directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda de humedal compatible

con el gradiente hidráulico seleccionado. Otras combinaciones de ancho - gradiente hidráulico pueden ser posibles a fin de ajustar el diseño a las condiciones topográficas existentes en el sitio propuesto. El valor de m en la ecuación (10) típicamente se encuentra entre 5 y 20% de la pérdida de carga potencial. En este caso se aplica la misma recomendación acerca de no seleccionar la máxima pérdida de carga disponible. Es realmente recomendable tomar un valor de la conductividad hidráulica efectiva (k_s) $\leq 1/3$ y que m no sea mayor del 20% para tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento del diseño.

Las ecuaciones (9) y (10) son válidas cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir, cuando el número de Reynolds es menor a 10. El número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la ecuación (11). En muchos casos N_R será mucho menor de 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{v \cdot D}{\tau} \quad (11)$$

donde:

N_R : Numero de Reynolds, adimensional

v : Velocidad de Darcy (de la ecuación (9)), m/s

D : Diámetro de los vacíos del medio, tomarlo igual al tamaño medio del medio, m

τ : Viscosidad cinemática del agua, m^2/s (anexo D)

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua:

$$\frac{k_{sT}}{k_{s20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad (12)$$

donde:

k_s : Conductividad hidráulica a una temperatura T y $20^\circ C$.

μ : Viscosidad del agua a una temperatura T y $20^\circ C$. (anexo D)

Los efectos de la viscosidad pueden ser significativos en climas fríos, con humedales SFS operando durante los meses de invierno. Por ejemplo, la conductividad hidráulica de un agua a una temperatura de 5° C podría ser el 66% de la de a 20° C. Este efecto ya está considerado en la recomendación previa del factor de seguridad (diseñar con $k_s \leq 1/3$ del k_s efectivo).

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) también varía con el número y tamaño de vacíos en el medio usado para el humedal. La Tabla 6 presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal SFS. Es recomendable que la conductividad hidráulica se mida en el terreno o en laboratorio antes del diseño final.

Es aconsejable que la porosidad (n) del medio también se mida en el laboratorio antes de hacer el diseño final. Esta puede ser medida usando el procedimiento estándar de la ASTM. Valores de porosidad para estos tipos de suelo y grava están publicados en muchas referencias, pero pueden ser mucho menores que los de la Tabla 6 (anexo E) ya que pueden estar dados para depósitos naturales de suelo y grava que han pasado por un proceso de consolidación natural y, por tanto, esos valores no son los apropiados para el diseño de un humedal tipo SFS. Es posible usar una relación basada en la ecuación de Ergun, para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o rocas:

$$k_s = n^{3.7}$$

Esta ecuación, así como los valores de la Tabla 6 (anexo E) son útiles solamente para un diseño preliminar o para estimar un orden de magnitud. El diseño final de un humedal SFS debe basarse en mediciones reales de los dos parámetros, conductividad hidráulica y porosidad.

La recomendación previa de que el gradiente hidráulico de diseño se limite a no más del 20% de la pérdida de carga disponible es el efecto parcial de limitar la relación de forma del sistema a valores relativamente bajos ($\leq 3:1$ para lechos de 0.6 m de profundidad, $\leq 0.75:1$ para lechos de 0.3 m de profundidad). En Europa, se han construido sistemas SFS usando suelo en lugar de grava, con pendientes del 8% para

asegurar un adecuado gradiente hidráulico y continúan experimentando flujo superficial causado por un inadecuado factor de seguridad en el diseño.

6.2 Discusión del Modelo.

Este modelo es muy utilizado en la construcción de humedales para el tratamiento de aguas servidas, pero los humedales para el abatimiento de metales pesados no tienen, aún, tanta difusión o se encuentran en etapa experimental. Es por esto último que datos referentes a metales pesados como contaminantes limitante (K_T) no existen, lo que hace imposible calcular un área superficial mínima y por lo tanto descarta el uso de esa parte del modelo en esta etapa. Sin embargo un dato experimental puede obtenerse a partir de una planta piloto.

Con respecto al aspecto térmico, la temperatura no llega a menos de 10 °C en la zona y rara vez sube sobre los 30 °C, es decir se mantiene en el rango óptimo para el crecimiento de las plantas de humedal y la proliferación de la vida bacteriana.

Las dimensiones del humedal proyectado son tan pequeñas que no exige un diseño hidráulico intensivo, sin embargo las limitantes de proporción y distribución sí son consideradas en la tabla de diseño. Esto último sumado a las existencias de material sirve de base para la política aplicada en el diseño de esta planta piloto.

La razón principal para presentar este modelo, a pesar de casi no usarlo, es que con los datos que se obtendrán de la planta piloto, el modelo se transforma en una herramienta potente para proyectar un humedal a mayor escala con mayor precisión, que vendría ser la solución definitiva.

6.3 Detalle de Diseño de la planta piloto.

La planta consta de tres grandes partes relacionadas, pero que se diseñan por separado estas son:

- Las cubas.
- El sistema de alimentación.
- Las plantas (vegetales).

A estas debe sumarse la selección del lugar donde se emplazará la planta piloto y si corresponde la preparación del lugar.

El primer paso fue seleccionar el lugar. Las características necesarias son disponibilidad de espacio, cercanía al agua, una pendiente que permitiera el uso de la fuerza de gravedad como fuerza impulsora del líquido y que tuviera una fuente de energía cercana.

El sitio escogido esta cercano a la toma de agua para enfriamiento de escoria por lo que cuenta con energía eléctrica y esta lejos de la zona de trabajos, por lo que no será una molestia para los trabajadores del escorial.

En esta imagen (fig. 4) se muestra la ubicación desde el aire, corresponde a la ribera



oeste de la laguna que se encuentra más al norte y que es la más pequeña.

Abajo se puede apreciar el lugar desde más cerca. En la figura 5 se ve la pendiente del sitio y en la figura 6 se aprecia la toma de agua de enfriamiento de escoria que se realiza con una bomba sumergible por lo que el suministro de energía eléctrica llega hasta el borde mismo de la laguna.

Fig. 4



Fig. 5



Fig. 6

6.3.1 Estructura

Las cubas fueron construidas en PVC de 5 y 3 mm según existencias, en el caso del PVC de 3 mm se reforzaron para asegurar su integridad en el traslado e instalación. Las dimensiones se definieron en base a la cantidad de material disponible, el espacio disponible y las consideraciones de diseño propuestas en la sección correspondiente, dando como resultado:

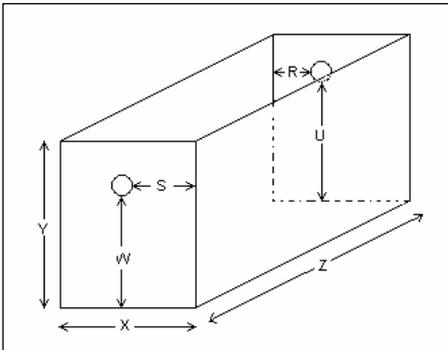


Fig. 7

Tabla 6

Cubas de PVC	
X :	40 cm.
Y :	40 cm.
Z :	100 cm.
W :	34 cm.
S :	20 cm.
U :	37 cm..
R :	20 cm.

Diámetro orificios:
d : 2,5 cm.

Estas cubas fueron construidas en el taller de plásticos de la División Ventanas de Codelco. Son 8 en total y serán ordenadas en 4 pares y estos ubicados en paralelo. Para poder realizar experiencias diferentes en paralelo, diferenciando la vegetación, flujo y sustrato.

El sistema de alimentación fue diseñado con la idea de darle el máximo de autonomía a la planta piloto. Consta de una bomba sumergible, la misma que se utiliza para enfriar la escoria; de un estanque de 1 m³ y de una red de cañerías de PVC de ¾ pulgada. La bomba debe llenar el estanque, que se encuentra en altura a unos 150 cm,

en aproximadamente 5 minutos a través de una manguera de goma de 3 pulgadas de diámetro y este por gravedad alimenta a las celdas a través de la red de cañerías. Los flujos son regulados por válvulas ubicadas a la salida del estanque, la entrada y salida de cada par celdas. Además se instaló una válvula, para toma de muestras o purga, en la salida del estanque.

El sistema completo se aprecia en las siguientes imágenes.



Fig. 8



Fig. 9



Fig. 10

Con estas especificaciones basta con definir un tiempo de residencia para poder estimar el flujo. Para escoger el tiempo de residencia se consideró que durante el fin de semana nadie operará la planta, es decir llenar el estanque, y que tener un flujo de lunes a viernes y otro para el fin de semana es contraproducente y puede originar deficiencias en el proceso. Por lo tanto un tiempo de residencia de 48 hrs. parece lo más apropiado y bastante conservador. Quizás más adelante se pueden explorar otras alternativas, si los resultados de esta son prometedores.

Usando la ecuación 2 (pág. 31), con el tiempo de residencia definido y estimando la profundidad y la porosidad, podemos hacer un cálculo estimativo del caudal que debemos hacer pasar por las celdas. Para la porosidad se consideró una del 80%, que es un valor recomendado, y la del 100%, que es el equivalente a que no haya obstrucción al flujo. La formula está multiplicada por 4 debido a que son 4 celdas.

$$t = \frac{L \cdot W \cdot y \cdot n}{Q}$$

$$48 \cdot 3600 = \frac{2 \cdot 0.4 \cdot 0.2 \cdot 0.8}{Q} \cdot 4 \quad Q = 2.962 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$48 \cdot 3600 = \frac{2 \cdot 0.4 \cdot 0.2 \cdot 1.0}{Q} \cdot 4 \quad Q = 3.703 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Considerando que debe operar desde las 16:00 hrs. del viernes a las 9:00 hrs. del lunes, es decir, 65 horas (234000 segundos), podemos calcular el volumen mínimo necesario en el estanque.

$$V(n = 0.8) = 2.962 \cdot 10^{-6} \cdot 234000 = 0.695 m^3$$

$$V(n = 1.0) = 3.703 \cdot 10^{-6} \cdot 234000 = 0.861 m^3$$

En ambos casos no supera el volumen del estanque que corresponde a 1 m³ lo que garantiza el funcionamiento continuo de la planta piloto.

Utilizando la misma ecuación podemos determinar que con el flujo máximo, el estanque demorará en vaciarse aproximadamente 75 horas, lo que nos da un margen de error aceptable.

La configuración de celdas nos permite realizar varias experiencias en una, ya que cada par de celdas es independiente, es decir, pueden tener distinto flujo y distinta vegetación. Es por esto que se ha pensado en dos tipos de experiencia, una con una especie de planta en especial, para este caso se están considerando dos candidatas de las que más adelante se hablará. Y otra experiencia con un grupo de plantas que se asemeje a las existentes en el humedal natural adyacente en cuanto a especies y proporción, para obtener esta información se recurrió al informe de caracterización del humedal natural de Campiche realizado por la Universidad de Playa Ancha.

Otro aspecto relacionado con la vegetación del humedal artificial es el sustrato, por lo general se utiliza arena en un 85% y materia orgánica como aserrín más fertilizantes en un 15%, en este caso se cuenta con el suelo del humedal natural que es arenoso y rico en materia orgánica. Se evalúa la posibilidad de agregar escoria al sustrato de un par de celdas para estudiar si su presencia causa algún efecto en el proceso.

6.3.2 Vegetación

Principalmente se está estudiando la posibilidad de utilizar una de estas dos especies:

- *Scirpus Californicus* (Estoquilla)
- *Typha angustifolia* (Totora).

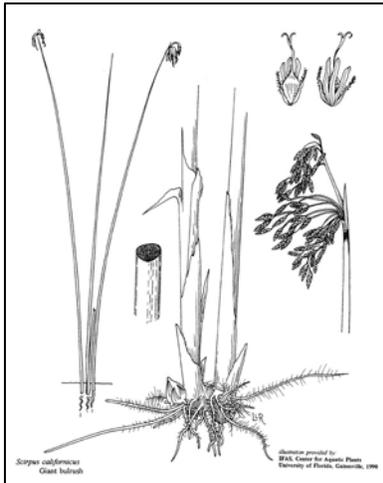


Fig. 11

- *Scirpus Californicus*

Planta perenne de 20-30 cm. de alto con una espiguilla solitaria, es bien consumida por ganado ovino, bovino y en el norte de Chile y sur de Perú es alimento de las alpacas. Soporta pH de 4 a 9.

Esta planta ha sido utilizada en otras experiencias similares, como por ejemplo:

Una experiencia fue llevada a cabo en EE.UU. (Gladden, 2001) con el objetivo de comparar el trabajo de dos humedales uno ubicado en el lugar de la empresa y otro en una universidad.

El primero consistía en 4 sets de dos celdas en serie con las siguientes dimensiones 24x0.6x0.9 (largo, ancho, profundo en metros) cada celda. Solo se utilizó una especie vegetal, la *scirpus californicus* distribuidas a 25cm entre centros y un sustrato compuesto por 83% arena, 15% lodo y 2% materia orgánica (aserrín, residuos agrícolas y fertilizantes). Además se utilizó un tiempo de residencia de 48 hrs. lo que a priori resultaba muy conservador, por último el desecho a tratar era de características similares a un desecho minero con la diferencia de que este tenía un pH mas neutro, una concentración de cobre muy variable que promediaba los 50 micro-gr/lit.

Obteniéndose los siguientes resultados:

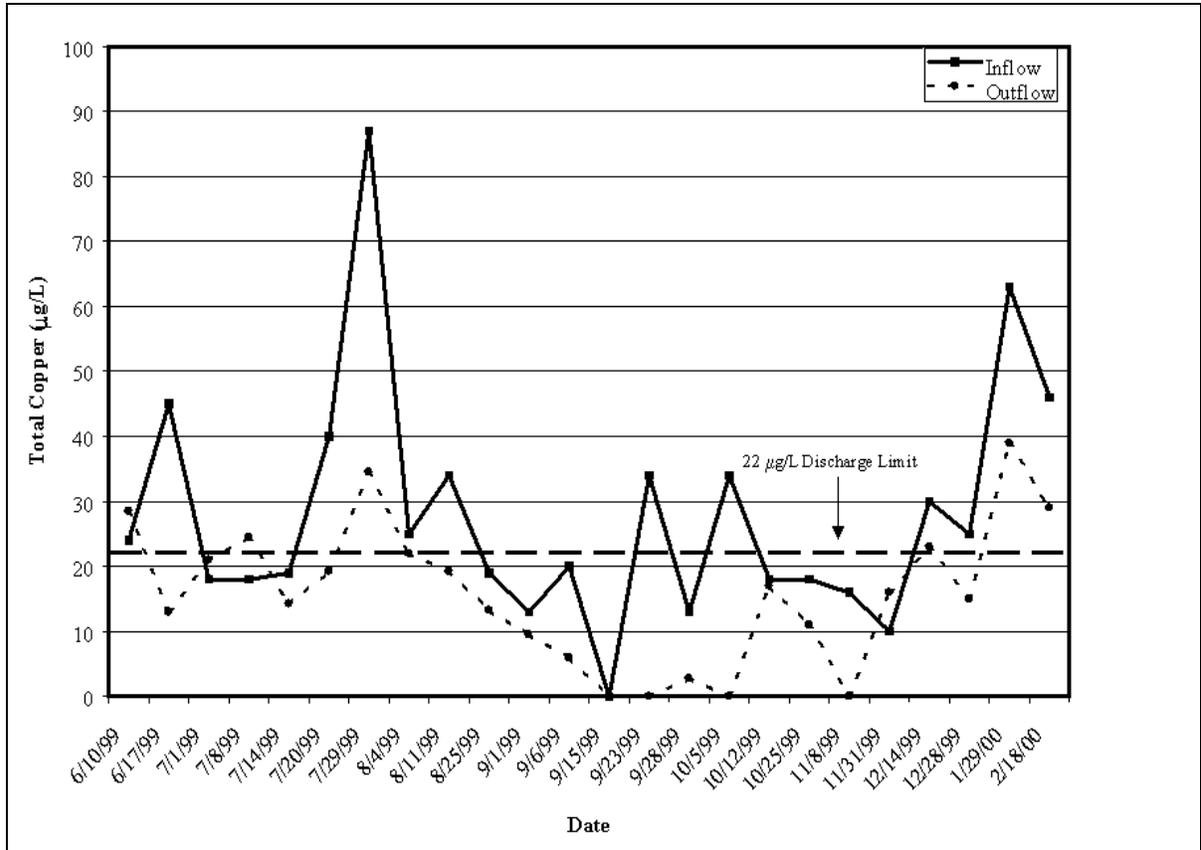


Fig. 12

La línea continua representa la concentración de cobre en la alimentación y la punteada en la salida, la línea recta es el máximo permitido en desechos líquidos en EE.UU.

Simultáneamente se construyó otro humedal en la universidad de Clemson EE.UU. que consistía en 5 sets de 2 celdas en serie cuyas dimensiones eran 0.69x0.64x0.61 (largo, ancho, profundo en metros). En cuanto a vegetación, sustrato y tiempo de residencia este humedal era idéntico al anterior, solo cambia el hecho que el desecho a tratar es agua potable enmendada con sulfato de cobre hasta alcanzar concentraciones similares a las del otro humedal.

Los resultados obtenidos se observan en la siguiente gráfica:

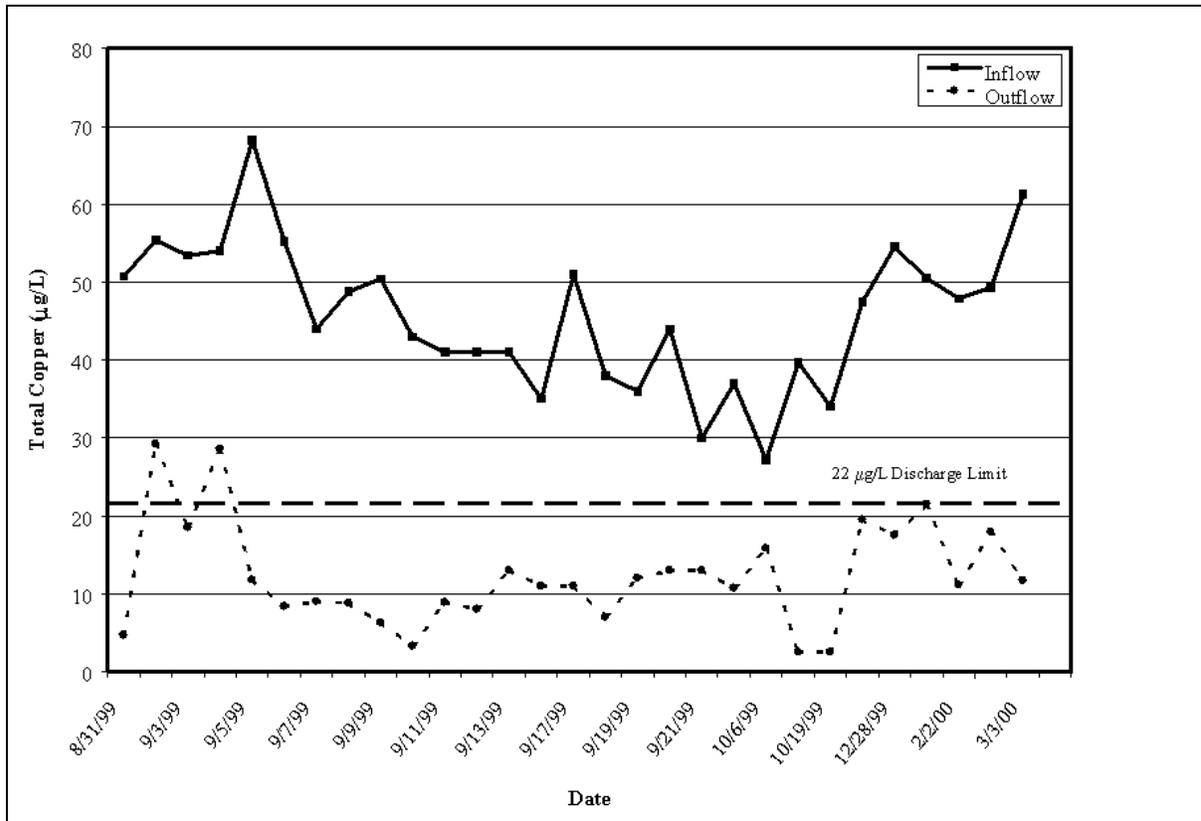


Fig. 13

Igual que el gráfico anterior, la línea continua representa la concentración de cobre en la alimentación y la punteada en la salida, la línea recta es el máximo permitido en desechos líquidos en EE.UU.

En ambos casos los resultados son satisfactorios considerando la pobreza de la población vegetal del humedal y las dimensiones de estos, en el caso del humedal construido en el lugar de la empresa en superficie totalizaba 3.2 hectáreas y lograba tratar 0.04 m³/s lo que equivale a 3456 m³ diarios.

Otro problema fue la mortalidad de plantas producto de bruscas variaciones en las características del fluido de desecho, esto no ocurrió en el humedal universitario, pero si en el otro, como se ve en el gráfico (fig. 12) tanto entre el 7/8/99 y el 7/20/99; y entre el 11/31/00 y el 12/14/99 la concentración de cobre en la salida fue mayor que en la entrada esto se produjo por la "deforestación" del humedal.

Un esquema generalizado del proceso que toma lugar en el humedal esta representado por la siguiente figura:

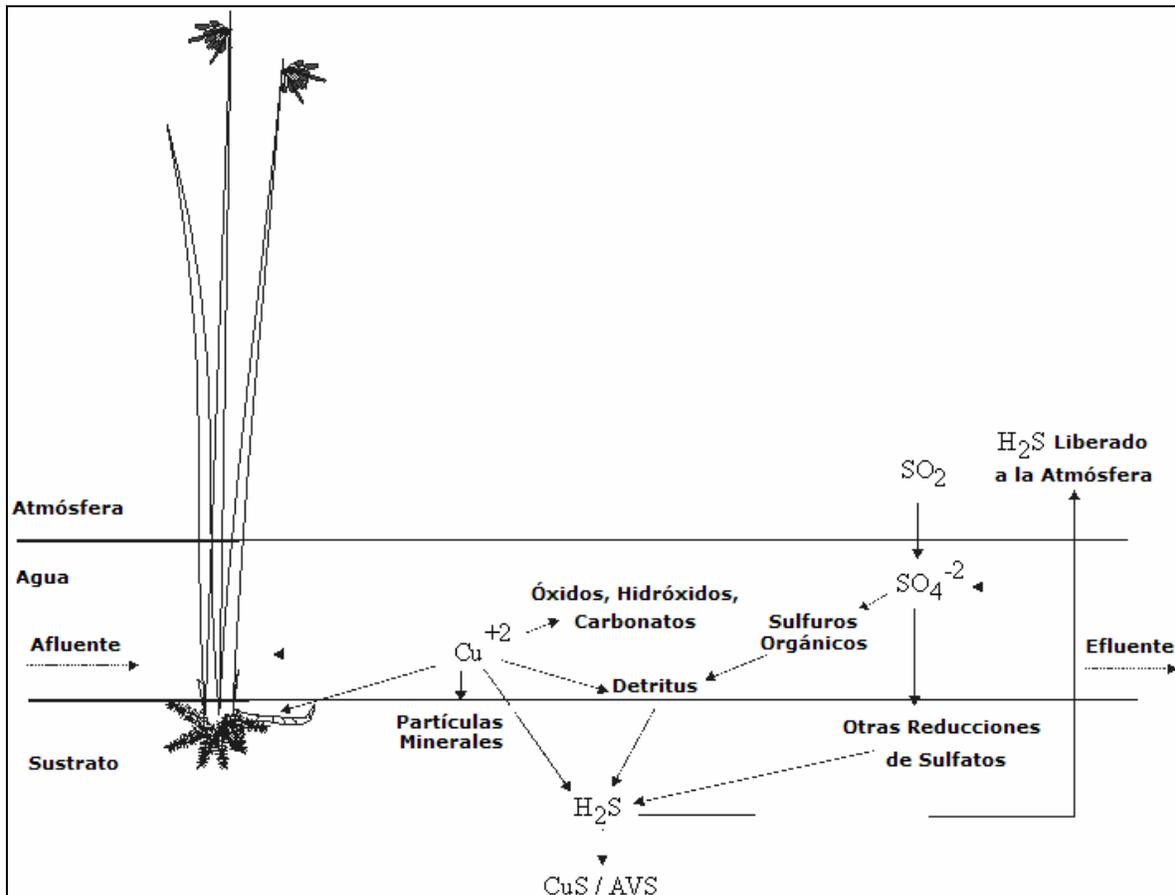


Fig. 14

Además, también en EE.UU., se realizó la siguiente experiencia:

Lugar: Río Savannah, Carolina del Sur, EE.UU.

Tipo de residuo: El afluente es un combinado de 8 fuentes industriales más agua lluvia. Los contaminantes principales son Cu, Zn y Hg. El flujo promedio es de 0.972 MGD.

Descripción del sistema de tratamiento: El humedal consistía en 4 series independientes compuestas por 2 celdas, cada una de ellas de 100 por 400 pies, alimentadas por gravedad. La planta escogida fue *Scirpus Californicus* por su

reconocida habilidad para tratar residuos con metales pesados. Con el fin de perfeccionar el modelo se construyo un humedal de laboratorio, que se muestra a continuación:



Fig. 15

Consistente en 5 series de 2 celdas (fig. 15), alimentadas por gravedad. Este humedal a escala entrego resultados satisfactorios para los tres principales contaminantes.

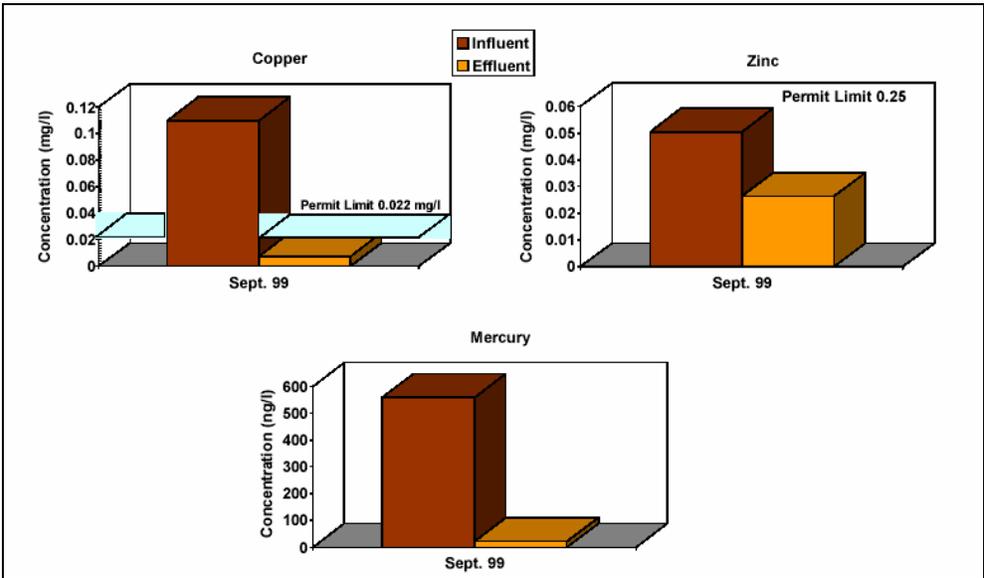


Fig. 16

Debido a los buenos resultados se procedió a la construcción del humedal industrial. Al momento de la investigación, aún los resultados no eran oficiales, pero extraoficialmente el cobre en efluente estaba en el rango de 0.012 a 0.013 mg/l.



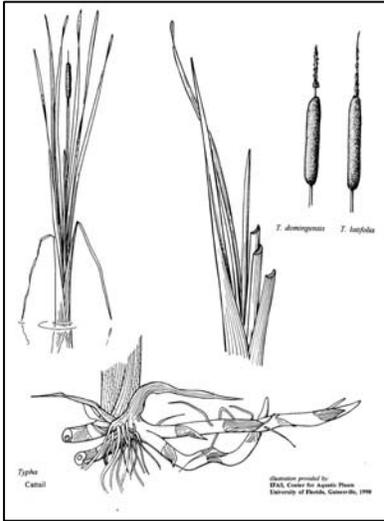
Fig. 17



Fig. 18

En ambas experiencias se utilizó solo *Scirpus Californicus* con excelentes resultados incluso, como se puede apreciar en las figuras 17 y 18, se llegó a construir un humedal artificial a gran escala que opera en forma correcta actualmente.

- Typha Angustifolia



La Typha angustifolia es una especie más pequeña con unos tallos de 1,5 m. de alto. Sus hojas tienen unos 8 mm. de ancho. Las flores masculinas y femeninas están algo separadas. Estas últimas miden entre 4 y 7 mm. de ancho y son de color marrón.

Un estudio realizado por la Universidad de Playa Ancha el año 2005 en el humedal natural de Campiche reconoce a esta planta como la predominante, e incluye análisis de metales pesados en ella. Algunos de estos resultados incluimos a continuación.

Fig. 19

Concentración de Metales Pesados en *Tytha*. (Céspedes, 2005)

Arsénico: De acuerdo a los valores de concentración de arsénico obtenidos en las diferentes estructuras de las macrófitas, la mayor concentración se encontró en las raíces con un valor de 53 ppm. Los contenidos de este elemento para hojas y tallos en todos los puntos, tuvo un valor de < 0,05 ppm, asociados a los límites de detección analítica.

Cobre: Los contenidos de cobre en los distintos puntos muestreados están en un rango con un valor máximo de 653 ppm y un valor mínimo de 48 ppm.

Las concentraciones de este elemento en tallo, en todos los puntos muestreados estuvieron entre 60 y 2490 ppm.

Con respecto a la acumulación de cobre en raíces, las concentraciones se registraron enter valores de 2664 y 4061 ppm.

Plomo: En general los más altos contenidos de plomo se encuentran en raíces con un valor máximo de 160 ppm y la menor concentración se encuentra en tallos con un valor de 0,6 ppm.

Cadmio: Las concentraciones de cadmio para las estructuras de hojas y tallos se mantuvieron constantes, con un valor bajo el límite de detección analítico de < 0,01 ppm y en el caso de las raíces los valores fluctuaron entre 0,05 y 3,00 ppm.

De acuerdo a la segunda campaña realizada, en todos los puntos muestreados para hojas y tallos las concentraciones aumentaron con valores que fluctuaron entre 0,01 y 0,52 ppm en hojas y valores entre 0,50 y 1,50 ppm para el caso de tallos

Hierro: Las mayores contenidos de hierro se encontraron en las raíces, con un valor máximo de 3992 ppm.

De acuerdo a los contenidos de hierro en hojas, la mayor concentración fue de 587 ppm, mientras que en los demás puntos los valores fluctuaron entre 124 y 152 ppm.

Los valores de las concentraciones en tallos para los cuatro puntos muestreados fluctuaron entre 122 y 587 ppm.

Las concentraciones de hierro en raíces, fueron notablemente mayores en la primera campaña con un valor mínimo de 1050 ppm y un máximo de 3992 ppm, mientras que en la segunda campaña los valores se mantuvieron entre 182 y 342 ppm.

Zinc: Los contenidos más altos de zinc se constataron en las raíces, con valores de 328 y 336 ppm.

Las concentraciones de zinc en hojas arrojaron un valor máximo de 172 ppm y un mínimo de 30 ppm.

En tallos las concentraciones se encuentran entre los valores 31 y 241 ppm.

Las muestras fueron tomadas en 4 sitios dentro del humedal y en dos oportunidades para estudiar el efecto estacional sobre los resultados, es por ello que los datos experimentan cambios tan grandes. De todos modos el estudio prueba que esta planta es capaz de vivir en un ambiente contaminado con metales pesados y no solo eso, además los retiene en su estructura, lo cual es una característica interesante a la hora de la selección para el proyecto de un humedal artificial.

6.3.3 Esquema Definitivo del Sistema

Como se muestra en el esquema (fig. 20 y 21) y se mostró anteriormente en esta memoria, el sistema consta de 8 celdas ordenadas en 4 pares y de un estanque más red de cañerías. Cada par de celdas posee una configuración vegetal diferente, pero con el mismo flujo y agua.

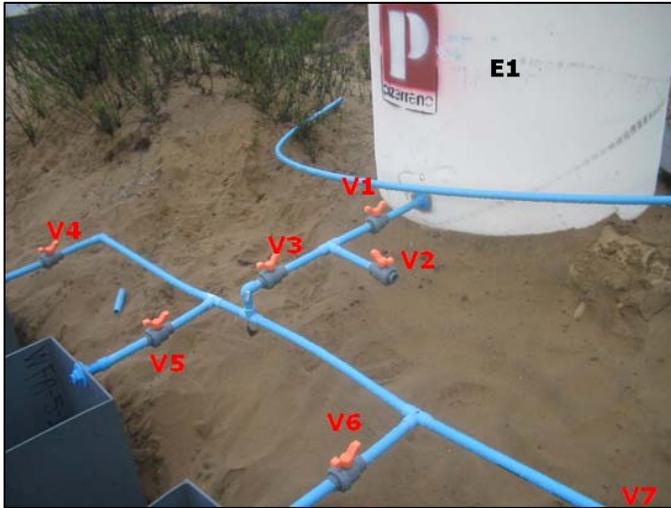


Fig. 20



Fig. 21

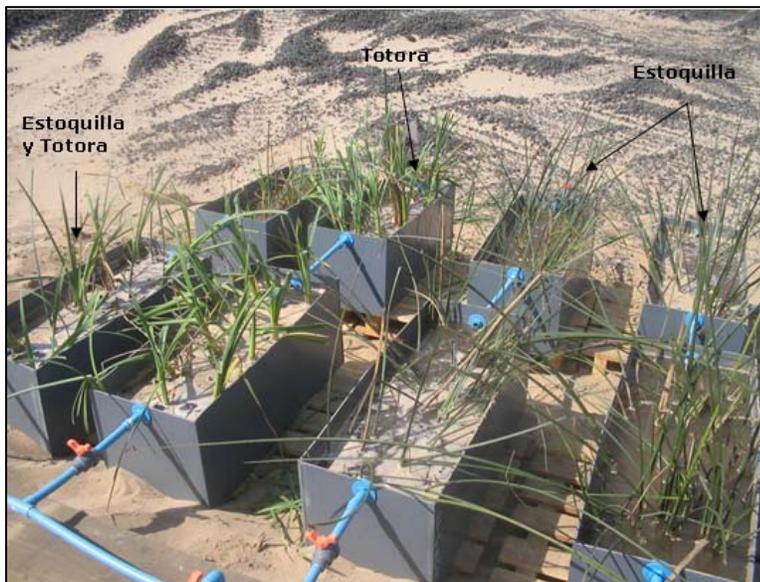


Fig. 22

Como se muestra en la figura 22 las celdas ya están pobladas. Los dos pares de celdas de la izquierda solo tienen Estoquilla (*s. californicus*), el tercer par (de izquierda a derecha) solo tiene Totorá (*t. angustifolia*) y el par del extremo derecho posee una mezcla de las dos especies.

En uno de los pares con estoquilla se está estudiando agregar escoria en el sustrato para comparar su desempeño en distintas condiciones. Además en la celda de especies combinadas se está verificando la posibilidad de agregar algunas otras especies existentes en el humedal Campiche como lo son algunas plantas flotantes, integrar otras es problemático debido a que la mayor diversidad de vegetación existe en la orilla del humedal y las celdas simulan un punto medio entre la orilla y el centro de laguna.

6.4 Procedimientos de Operación

La operación y mantención de la planta piloto se divide en la siguiente serie de simples tareas periódicas:

- Llenado de estanque.

Esta labor consiste en llenar el estanque de 1 m³ con la bomba sumergible existente en el escorial. Toma alrededor de 5 min. Y se realiza con ayuda de un operario del escorial. Debe mantenerse cerrada V1 (fig. 20).

- Limpieza de cañerías.

La materia orgánica generada por la vegetación tiende a flotar y puede obstruir las salidas de las celdas. Las cañerías deben limpiarse una vez al día. Preferentemente un par de horas antes de tomar muestras.

- Regulación de flujo.

Como se ha calculado el flujo debe ser de 3.7 cc./seg. Debe medirse dos veces al día y regular la apertura de las válvulas (V4, V5, V6 y V7) (fig. 20), si fuese necesario. El método es simple, al no haber flujómetros instalados, debe usarse probetas de 100 cc. Para medir durante 10 seg. el flujo que debe ser en promedio 3.7 cc./seg. (mín.: 3 cc./seg.; máx.: 4 cc./seg.). El proceso debe repetirse hasta que en dos mediciones consecutivas no se aprecie variación.

- Toma de muestras.

Se toman 5 muestras de 250cc. Por semana. 1 en la alimentación, tomada desde la válvula V2. Y 4 en cada una de las salidas de las celdas (C2, C4, C6 Y C8) (fig. 21). Estas muestras serán llevadas al laboratorio de la división para su análisis.

Además, existen una serie de tareas que no son de una periodicidad definida, pero que de todos modos deben realizarse:

- Control de vegetales.

Se debe mantener control sobre el estado de las plantas ya que por efecto del transplante pueden morir algunas al no poder adaptarse o bien por causa del agua que se les suministra.

- Control de contingencias.

Una serie de factores influyen en el desarrollo de la actividad al ser realizada al aire libre, tales como viento, presencia de animales (coipos y perros) y aves del sector (gaviotas, patos, etc.). Un control de ellas es necesario, complementándose con los operarios del escorial.

Programación de las actividades

Tabla 7

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
08:30	Llenado de estanque		Llenado de estanque		
08:45	Limpieza de cañerías				
09:00	Regulación de flujo				
09:30					
14:00				Toma de muestras	Llenado de estanque

7. Resultados y Métodos

Las variables que se controlan en este tipo experiencias son el flujo, la temperatura y las concentraciones de los contaminantes en cuestión, tanto a la entrada del sistema, como a la salida.

Los flujos se controlaron, simplemente con una probeta de 100 ml y un cronómetro, durante 10 segundos a la entrada y a la salida de cada par de celdas, siendo regulado con la válvula de alimentación correspondiente al par de celdas controlado. Como en este sistema la fuerza impulsora del agua es la gravedad, es decir, el peso de la columna de agua, y esta va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo, la regulación periódica del flujo es fundamental para asegurar un funcionamiento continuo, se consideró un periodo de 24 horas.

El flujo está determinado, en el modelo presentado, por el tiempo de residencia seleccionado. En este caso se ocupó un tiempo de 48 horas, lo que da un flujo de 3.7 ml/seg, en total, aproximándolo a 4 ml/seg y dividiéndolo por 4, debido a los cuatro pares de celdas, da un flujo a controlar, por par de celdas, de 1 ml/seg.

Los datos comenzaron a recopilarse a un mes de la puesta en marcha y una semana antes de comenzar a tomar muestras, los datos incluidos en la tabla son promedios diarios. Los pares de celdas están identificados como:

S1: Serie 1, celdas con Scirpus Californicus.

S2: Serie 2, celdas con Scirpus Californicus.

S3: Serie 3, celdas con Typha Angustifolia.

S4: Serie 4, celdas mixtas (scirpus y typha).

Tabla 8

Fecha	S1	S2	S3	S4
24-Oct	1,54	1,24	0,88	0,54
25-Oct	1,30	3,76	1,62	2,96
30-Oct	2,11	2,01	0,72	0,71
31-Oct	1,53	2,11	1,88	1,35
2-Nov	1,68	1,36	1,81	1,08
6-Nov	0,67	0,93	0,76	0,72
7-Nov	0,63	0,96	0,98	0,60
8-Nov	0,79	1,26	0,75	1,05
9-Nov	0,99	1,33	0,79	1,08
13-Nov	1,23	1,55	0,75	0,57

15-Nov	0,56	1,62	0,89	0,94
16-Nov	0,62	1,32	0,58	0,68
17-Nov	0,75	0,76	0,39	0,38
20-Nov	1,29	2,28	0,91	0,87
21-Nov	1,03	1,41	0,94	0,99
22-Nov	1,28	1,41	0,97	0,95
23-Nov	0,99	1,23	1,10	0,65
27-Nov	1,41	1,89	1,72	1,07
28-Nov	1,03	1,17	0,95	0,96
29-Nov	1,04	1,85	1,17	1,39
30-Nov	0,89	1,48	0,85	1,42
7-Dic	1,05	1,56	0,96	1,11
18-Dic	1,13	1,34	1,16	0,98
20-Dic	1,28	1,34	1,14	2,47
21-Dic	0,82	0,44	1,05	0,92

En rojo se encuentran los valores máximos y mínimos para cada par de celdas en serie.

La temperatura no fue controlada in-situ, si no que se ocuparon los datos provistos por el departamento de meteorología de la división ventanas de Codelco, correspondientes a la zona en cuestión y en la forma de temperatura promedio día.

Tabla 9

FECHA	°C	FECHA	°C	FECHA	°C	FECHA	°C
23-Oct	13,9	9-Nov	12,1	26-Nov	13,2	13-Dic	16,8
24-Oct	14,1	10-Nov	13,3	27-Nov	12,8	14-Dic	16,3
25-Oct	13,6	11-Nov	13,8	28-Nov	14,7	15-Dic	17,1
26-Oct	13,6	12-Nov	15,4	29-Nov	14,1	16-Dic	17,7
27-Oct	14,3	13-Nov	14,1	30-Nov	13,9	17-Dic	16,7
28-Oct	13,9	14-Nov	14,6	1-Dic	14,5	18-Dic	16,3
29-Oct	13,4	15-Nov	13,4	2-Dic	13,2	19-Dic	16,7
30-Oct	13,2	16-Nov	13,1	3-Dic	13,6	20-Dic	15,6
31-Oct	13,1	17-Nov	13,1	4-Dic	13,8		
1-Nov	12,6	18-Nov	14,3	5-Dic	14,5		
2-Nov	13,6	19-Nov	14,5	6-Dic	14,6		
3-Nov	13,4	20-Nov	14,5	7-Dic	13,4		
4-Nov	13,0	21-Nov	14,6	8-Dic	14,5		
5-Nov	14,6	22-Nov	14,0	9-Dic	14,1		

6-Nov	14,9	23-Nov	14,2	10-Dic	14,6		
7-Nov	13,2	24-Nov	14,4	11-Dic	14,9		
8-Nov	12,6	25-Nov	13,9	12-Dic	13,7		

La concentración de contaminantes fue monitoreada semanalmente, tomando muestras en la entrada al sistema, es decir la salida del estanque alimentador, y a la salida de cada par de celdas. Los parámetros evaluados fueron cobre, arsénico, plomo, cadmio y pH.

Los análisis fueron realizados en el laboratorio de control de calidad de la División Ventanas de Codelco. Los procedimientos se encuentran detallados en los anexos.

Los resultados son mostrados a continuación, ordenados por campañas, se mantiene la misma clasificación que en el control de flujos y se agrega la categoría A1 que corresponde a la alimentación, además se incluye los códigos SA (Solicitud de Análisis) con los que trabaja el laboratorio y permiten rescatar los análisis desde la base de datos. Los límites mínimos de detección de los procedimientos aplicados es 0.1 mg/lit. Para Cu, As y Pb; para cadmio el límite es 0.02 mg/lit., números que coinciden con la norma (DS 90) (tablas 10-21):

Campaña 1

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 5 de Octubre	A1	52710	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	8.3
	S1	52711	0.3132	<0.1	<0.1	<0.02	8.2
	S2	52712	0.1673	<0.1	<0.1	<0.02	8.3
	S3	52713	0.3418	<0.1	<0.1	<0.02	7.9
	S4	52714	0.4348	<0.1	<0.1	<0.02	7.8
Obs:	Vientos del miércoles 4 de Octubre lanzaron arena a las celdas, esta arena quedo flotando y enturbió las muestras finales. Además el viento tumbo algunas plantas causando turbiedad debido al levantamiento de las raíces.						

Campaña 2

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 12 de Octubre	A1	54210	0.633	0.109	<0.1	<0.02	8.5
	S1	54206	0.1618	<0.1	<0.1	<0.02	7.6
	S2	54207	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	8
	S3	54208	0.6843	0.1704	<0.1	<0.02	8.4
	S4	54209	0.4594	<0.1	<0.1	<0.02	8
Obs:	Las series 51, 52 y 53 presentaron arenas flotando.						

Campaña Sondeo

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Martes 17 de Octubre	Zona 1	55742	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	8.1
	Zona 2	55743	<0.1	0.285	<0.1	<0.02	8.1
	Zona 3	55744	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.9
	Escorial	55326	0.3793	0.403	0.3202	<0.02	8.2
Obs:	Las muestras "Zona" (1, 2 y 3) corresponden a muestras superficiales de la laguna del Humedal natural.						

Campaña 3

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 26 de Octubre	A1	57254	0.22	0.28	<0.1	<0.02	8.2
	S1	57250	0.34	0.2	<0.1	<0.02	7.2
	S2	57251	0.26	0.25	<0.1	<0.02	7.5
	S3	57252	0.36	0.26	<0.1	<0.02	7.9
	S4	57253	0.38	0.21	<0.1	<0.02	7.6
Obs:	Llovizna constante durante la madrugada y la mañana.						

Campaña 4

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 2 de Noviembre	A1	58974	0.1206	0.2516	0.1512	<0.02	
	S1	58969	<0.1	0.1235	<0.1	<0.02	
	S2	58970	0.1807	0.2075	<0.1	<0.02	
	S3	58971	<0.1	0.2026	<0.1	<0.02	
	S4	58972	0.1375	0.1432	<0.1	<0.02	
Obs:	Lunes 30, se descubrió que perros habían ingresado al escorial y hecho hoyos entre las celdas. Se tomó una muestra filtrada de la alimentación (A2) para conocer la proporción de metales sedimentables.						

Campaña 5

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 9 de Noviembre	A1	60332	0.26	0.2	0.18	<0.02	6.9
	S1	60328	0.28	0.2	0.16	<0.02	6.5
	S2	60329	0.18	0.2	0.17	<0.02	7.1
	S3	60330	0.2	0.2	0.1	<0.02	7.1
	S4	60331	0.28	0.2	0.07	<0.02	6.6
Obs:	La celda 1 de la serie53 presenta gran mortandad de plantas.						

Campaña 6

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 16 de Noviembre	A1	61769	0.19	<0.1	<0.1	<0.02	8.4
	S1	61765	0.19	<0.1	<0.1	<0.02	8.1
	S2	61766	0.14	<0.1	<0.1	<0.02	8.2
	S3	61767	0.15	<0.1	0.28	<0.02	8.5
	S4	61768	0.3	<0.1	<0.1	<0.02	6.3
Obs:							

Campaña 7

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 23 de Noviembre	A1	63297	<0.1	0.1407	<0.1	<0.02	8.4
	S1	63293	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	6.9
	S2	63294	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.9
	S3	63295	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.5
	S4	63296	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.9
Obs:							

Campaña 8

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 30 de Noviembre	A1	64993	0.4797	0.2173	<0.1	<0.02	8.3
	S1	64989	0.127	<0.1	<0.1	<0.02	7.1
	S2	64990	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.5
	S3	64991	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.6
	S4	64992	0.1059	<0.1	<0.1	<0.02	7.2
Obs:	.						

Campaña 9

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Jueves 7 de Diciembre	A1	66363	0.4525	0.2467	0.1658	<0.02	8.5
	S1	66359	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.6
	S2	66360	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.7
	S3	66361	0.1523	<0.1	<0.1	<0.02	7.4
	S4	66362	<0.1	<0.1	<0.1	<0.02	7.5
Obs:							

Campaña 10

Fecha	Muestra	SA	Cu	As	Pb	Cd	pH
Lunes 18 de Diciembre	A1	68499	3.3	0.9	0.2	<0.02	7.5
	S1	68495	0.39	0.4	<0.1	<0.02	7.8
	S2	68496	0.45	0.4	<0.1	<0.02	7.6
	S3	68497	0.49	0.2	<0.1	<0.02	7.6
	S4	68498	0.61	0.2	<0.1	<0.02	7.5
Obs:							

Ordenando los datos por contaminante se obtienen una serie de gráficos representativos del proceso. En la construcción de gráficos fue omitido el cadmio debido a que no fue detectado en campaña alguna. Cabe destacar que los valores identificados en los gráficos con concentraciones iguales a 0.1 mg/lt., en realidad son valores menores a 0.1 mg/lt. Y por lo tanto cumple la norma.

Además la campaña Sondeo, no fue de seguimiento, si no de sondeo de otras zonas del escorial, por lo tanto no está incluida en los gráficos. En el caso del pH, por problemas en el laboratorio, en la campaña 4 no se realizó el análisis correspondiente, por lo tanto, falta en los datos.

Un salto muy grande en las concentraciones de entrada, para cobre y arsénico, en la campaña 10, implicaron la exclusión de los gráficos, solo para facilitar el entendimiento de los gráficos, sin embargo, fueron incluidos para todos los cálculos relacionados con la estimación de la constante de extracción de metales contaminantes. Es por esto último que el arsénico y el cobre solo cuenta con 9 campañas y el plomo con 10, al igual que el pH.

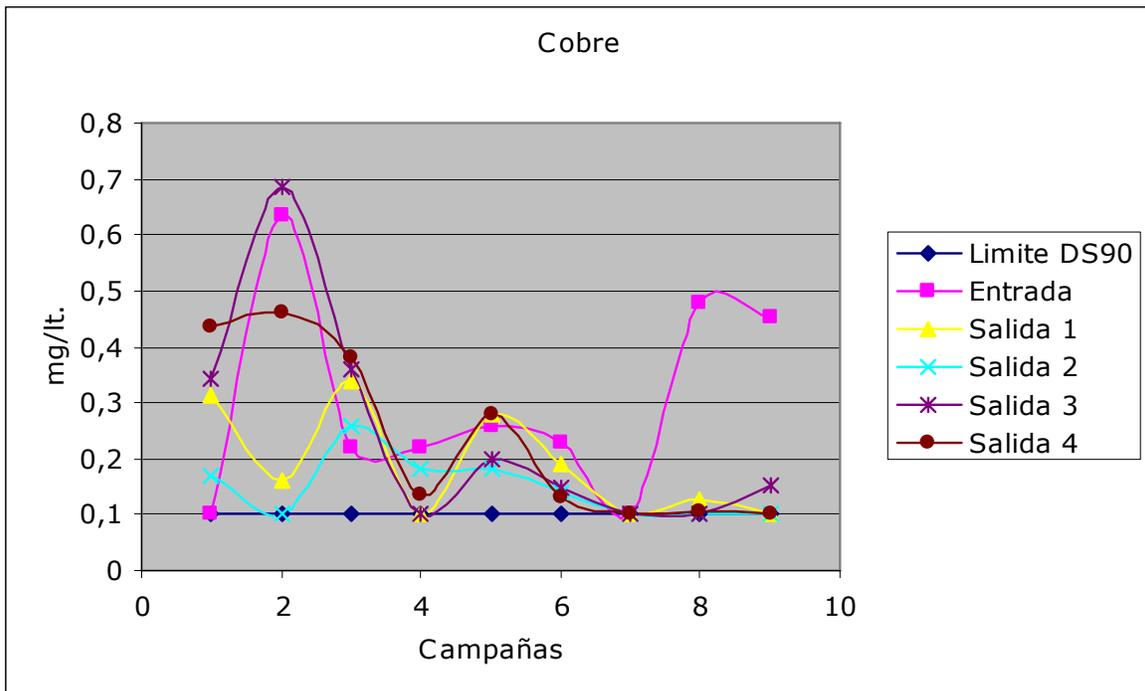


Fig. 23

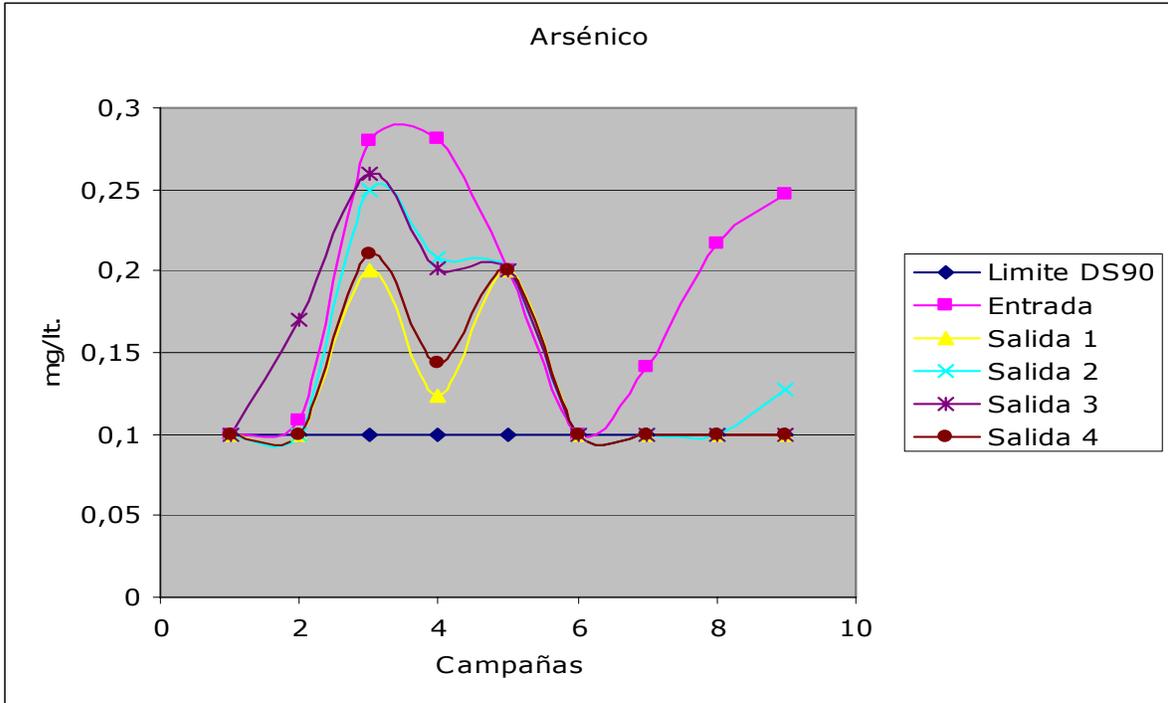


Fig. 24

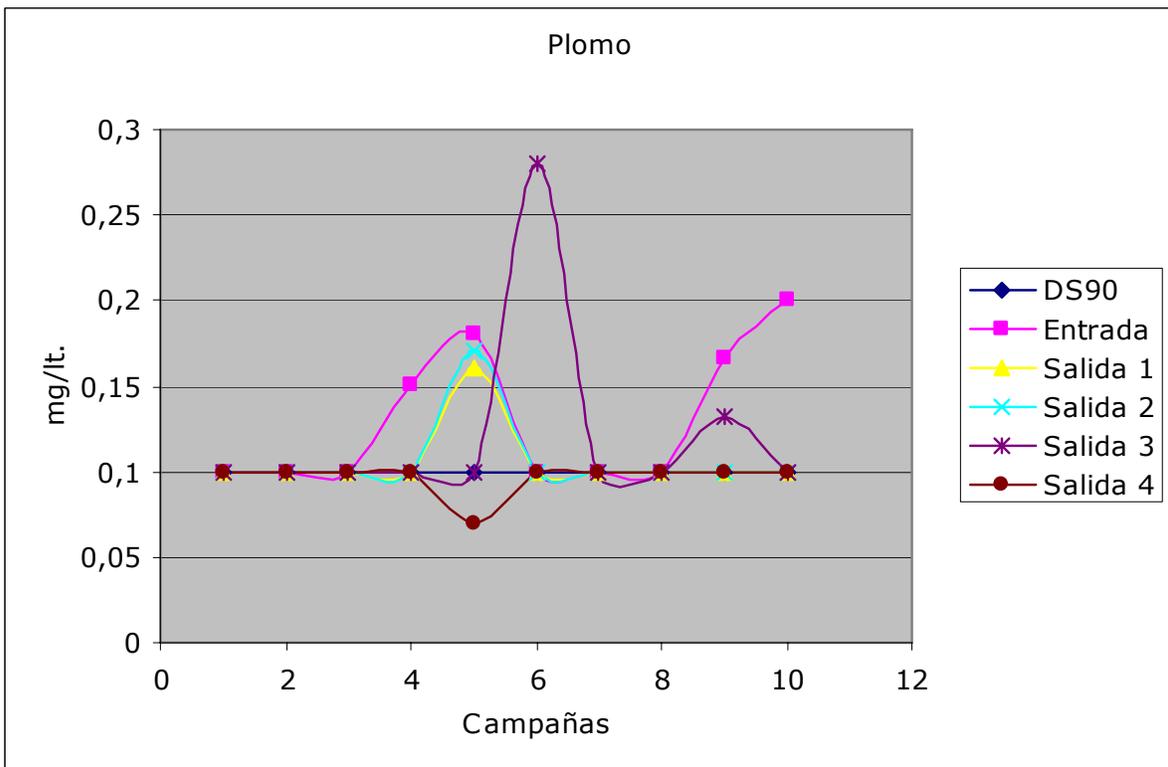


Fig. 25

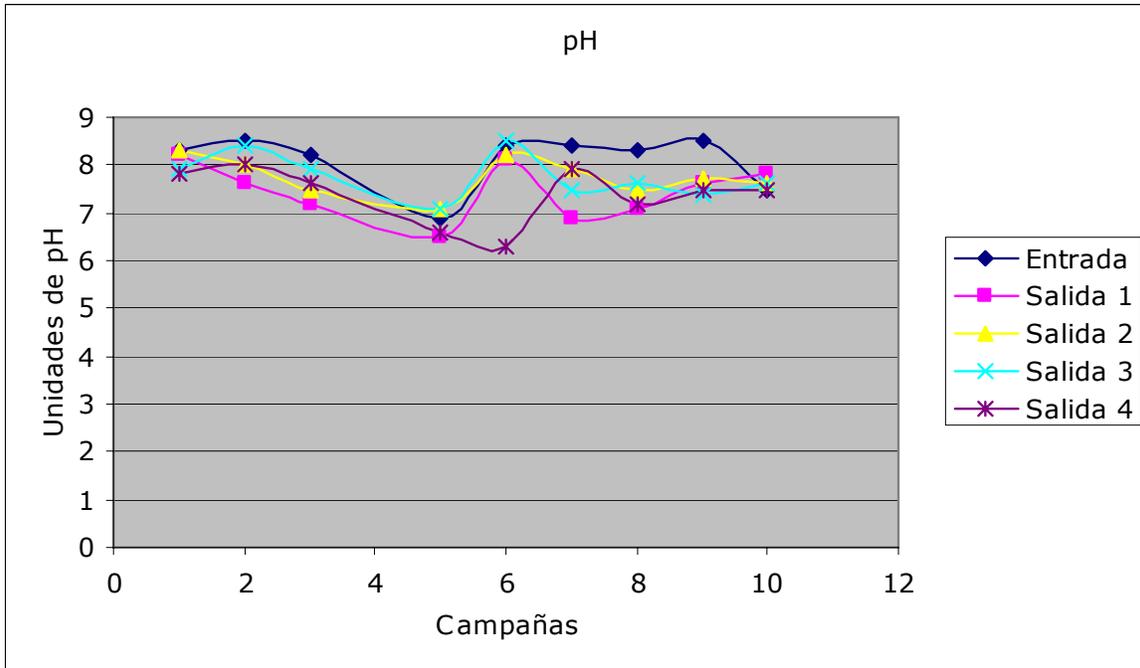


Fig. 26

Diez campañas parecen pocas, pero si se considera que se realizaron en un sistema de 4 pares de celdas en paralelo, en realidad son 40 lo que parece un número aceptable para el pre-diseño de un humedal bajo las condiciones de verano.

Utilizando los datos de concentraciones, los de flujo y la temperatura en el modelo propuesto por la bibliografía para el diseño de humedales naturales, podemos estimar la constante (Kt) para el retiro de metales pesados desde una corriente de agua.

Se debe estimar una constante para cada metal estudiado y considerar la constante de mayor valor, debido que será la que entregue una mayor área superficial del humedal, y por razones de seguridad es recomendable trabajar con el peor escenario posible, a modo de margen de seguridad.

8. Cálculos y Diseño de la Planta Tamaño Real

El primer paso para el diseño de un humedal artificial que opere en las condiciones especificadas en este trabajo, es el cálculo de la constante de retiro del contaminante. En este caso realizaremos el cálculo para cobre, arsénico y plomo.

Para organizar mejor los datos generamos las siguientes tablas, ordenadas por serie:

Tabla 22

Cobre				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 1				
12,1	5-Oct	1,06	0,10	0,31
14,6	12-Oct	1,06	0,63	0,16
13,6	26-Oct	1,06	0,22	0,34
13,6	2-Nov	0,96	0,12	0,10
12,1	9-Nov	1,17	0,26	0,28
13,1	16-Nov	0,73	0,23	0,19
14,2	23-Nov	0,99	0,10	0,10
13,9	30-Nov	0,89	0,48	0,13
13,4	7-Dic	1,05	0,45	0,10
16,3	18-Dic	1,13	3,30	0,39

Tabla 23

Cobre				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 2				
12,1	5-Oct	1,47	0,10	0,17
14,6	12-Oct	1,47	0,63	0,10
13,6	26-Oct	1,47	0,22	0,26
13,6	2-Nov	1,47	0,12	0,18
12,1	9-Nov	1,30	0,26	0,18
13,1	16-Nov	1,32	0,23	0,14
14,2	23-Nov	1,23	0,10	0,10
13,9	30-Nov	1,48	0,48	0,10
13,4	7-Dic	1,56	0,45	0,10
16,3	18-Dic	1,34	3,30	0,45

Tabla 24

Cobre				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 3				
12,1	5-Oct	0,92	0,10	0,34
14,6	12-Oct	0,92	0,63	0,68
13,6	26-Oct	0,92	0,22	0,36
13,6	2-Nov	0,61	0,12	0,10
12,1	9-Nov	0,77	0,26	0,20
13,1	16-Nov	0,66	0,23	0,15
14,2	23-Nov	1,10	0,10	0,10
13,9	30-Nov	0,85	0,48	0,10
13,4	7-Dic	0,96	0,45	0,15
16,3	18-Dic	1,16	3,30	0,49

Tabla 25

Cobre				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 4				
12,1	5-Oct	1,02	0,10	0,43
14,6	12-Oct	1,02	0,63	0,46
13,6	26-Oct	1,02	0,22	0,38
13,6	2-Nov	1,19	0,12	0,14
12,1	9-Nov	1,29	0,26	0,28
13,1	16-Nov	0,80	0,23	0,13
14,2	23-Nov	0,65	0,10	0,10
13,9	30-Nov	1,42	0,48	0,11
13,4	7-Dic	1,11	0,45	0,10
16,3	18-Dic	0,98	3,30	0,61

Utilizando las ecuaciones (1) y (2) (pág. 31) del modelo de retiro de material y además algunos datos del diseño de la planta piloto, obtenemos un valor para la constante (Kt) en cada caso.

Datos de diseño:

Ancho: 40 cm.

Largo: 200 cm., corresponden a 2 celdas de 100 cm. Cada una, colocadas en serie.

Profundidad de la celda: 20 cm.

Porosidad del medio: 80%

Tabla 26

Cobre		
temp °C	fecha	Kt
Serie 1		
12,1	5-Oct	9,42E-06
14,6	12-Oct	-1,13E-05
13,6	26-Oct	3,59E-06
13,6	2-Nov	-1,41E-06
12,1	9-Nov	6,75E-07
13,1	16-Nov	-1,09E-06
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	-9,26E-06
13,4	7-Dic	-1,24E-05
16,3	18-Dic	-1,89E-05

Tabla 27

Cobre		
temp °C	fecha	Kt
Serie 2		
12,1	5-Oct	5,90E-06
14,6	12-Oct	-2,12E-05
13,6	26-Oct	1,92E-06
13,6	2-Nov	4,64E-06
12,1	9-Nov	-3,72E-06
13,1	16-Nov	-5,11E-06
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	-1,82E-05
13,4	7-Dic	-1,84E-05
16,3	18-Dic	-2,09E-05

Tabla 28

Cobre		
temp °C	fecha	Kt
Serie 3		
12,1	5-Oct	8,85E-06
14,6	12-Oct	5,61E-07
13,6	26-Oct	3,54E-06
13,6	2-Nov	-8,86E-07
12,1	9-Nov	-1,58E-06
13,1	16-Nov	-2,20E-06
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	-1,04E-05
13,4	7-Dic	-8,17E-06
16,3	18-Dic	-1,73E-05

Tabla 29

Cobre		
temp °C	fecha	Kt
Serie 4		
12,1	5-Oct	1,18E-05
14,6	12-Oct	-2,57E-06
13,6	26-Oct	4,37E-06
13,6	2-Nov	1,21E-06
12,1	9-Nov	7,46E-07
13,1	16-Nov	-3,55E-06
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	-1,67E-05
13,4	7-Dic	-1,31E-05
16,3	18-Dic	-1,29E-05

La evolución del valor de la constante puede verse claramente en el siguiente gráfico. Si recordamos que mientras más negativo el valor de Kt mejor es el rendimiento del humedal, se puede ver que los humedales están aún en proceso de mejoramiento, sin alcanzar un estado estacionario.

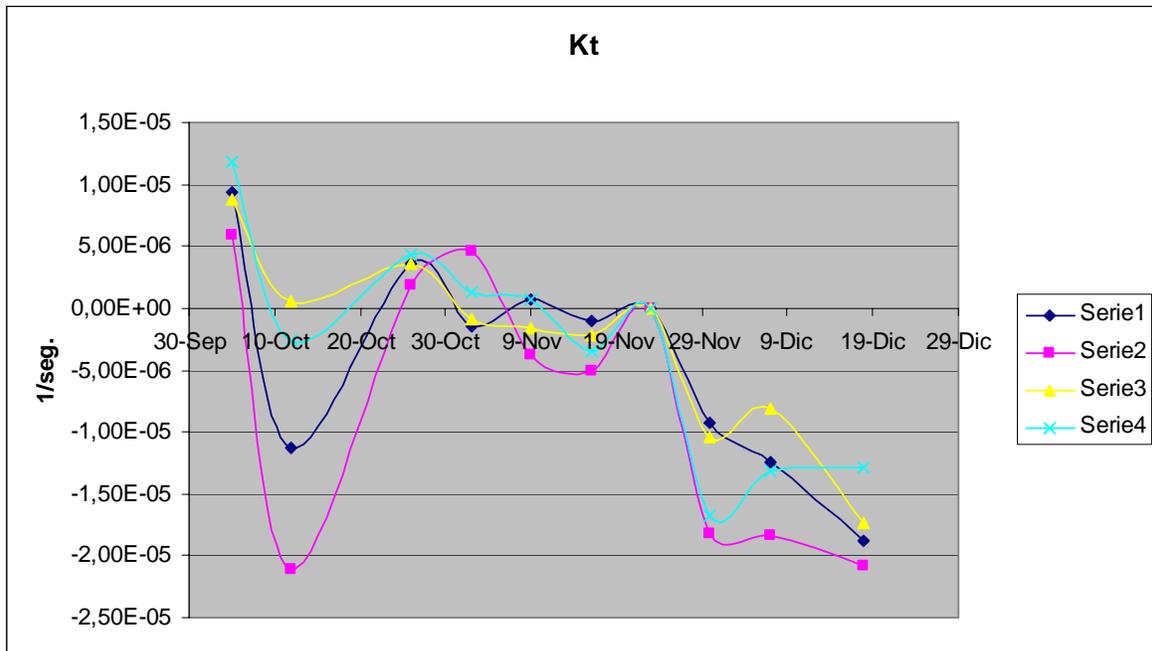


Fig. 27

Para los cálculos siguientes se omitió el dato correspondiente al 23 de noviembre ya que el laboratorio no detectó ni en la entrada ni en la salida valores superiores a 0.1

mg/lit., esto nos impide saber el comportamiento del contaminante, por lo tanto es retirado del análisis.

Para escoger que valor de Kt debemos utilizar, pueden aplicarse métodos estadísticos o bien dada la cantidad de datos y la definida tendencia de ellos, es decir, claramente la primera etapa corresponde a un periodo de establecimiento de las macrofitas y el segundo se acerca más a lo que sería un periodo estacionario. Esta tendencia nos ayudaría a escoger por ejemplo un promedio de los datos correspondientes a la segunda etapa, es decir, las últimas 5 campañas. Por supuesto que lo ideal sería esperar a que alcance un estado estacionario y que la pendiente de las curvas tendiera a cero y así escoger el valor al que se converja.

Calculando, entonces, los promedios de las últimas 5 campañas, excluyendo el dato del 23 de noviembre, obtenemos los siguientes resultados:

Kt promedio Serie 1	-1,04E-05
Kt promedio Serie 2	-1,56E-05
Kt promedio Serie 3	-9,52E-06
Kt promedio Serie 4	-1,16E-05

Se realizó un tratamiento similar al arsénico y al plomo, para mayor detalle revisar el anexo correspondiente a esos cálculos, arrojando los siguientes datos:

Para el arsénico:

Kt promedio Serie 1	-5,32E-06
Kt promedio Serie 2	-7,48E-06
Kt promedio Serie 3	-6,71E-06
Kt promedio Serie 4	-6,98E-06

Para el plomo:

Kt promedio Serie 1	-3,40E-06
Kt promedio Serie 2	-4,41E-06
Kt promedio Serie 3	-1,93E-06
Kt promedio Serie 4	-5,42E-06

8.1 Diseño de la Planta Tamaño Real

El método de diseño contempla tres etapas, en primer lugar se utiliza el modelo de retiro del metal para determinar el área superficial necesaria para cumplir los requisitos especificados. Estos son reducción de la concentración del contaminante y flujo a tratar. Luego utilizando el modelo hidráulico se puede determinar el largo y el ancho de las celdas. Finalmente se debe aplicar una razón de diseño, que determina la proporción ideal entre largo y ancho, lo que define el número de celdas para mantener un proceso óptimo. Sin embargo, hay un paso que debe ser considerado para el uso de propiedades físicas del agua, dado que estas dependen de la temperatura, se debe realizar una verificación de ella en el diseño utilizando el modelo térmico.

La siguiente fórmula corresponde a la (4) del modelo de retiro, el caudal ($Q = 0.001 \text{ m}^3/\text{seg.}$), la profundidad de las celdas ($y = 0.2$) y la porosidad ($n = 0.8$), son independientes del contaminante a retirar. Por otro lado las concentraciones y la constante si dependen del metal en cuestión.

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln(C_0 / C_e)}{K_T \cdot y \cdot n}$$

La tabla presentada a continuación presenta un resumen de los cálculos y demuestra que para las cuatro series el metal más difícil de retirar fue el plomo, por lo tanto en base a este elemento continuaremos con el diseño.

Tabla 30

Metal	Serie	Q (m ³ /seg.)	Ce (mg/lt.)	Co (mg/lt.)	Kt (1/seg.)	Área (m ²)
Cobre	1	0.001	0.63	0.05	-1.04E-05	1523.05
	2	0.001	0.63	0.05	-1.56E-05	1012.59
	3	0.001	0.63	0.05	-9.52E-06	1663.14
	4	0.001	0.63	0.05	-1.16E-05	1368.55
Arsénico	1	0.001	0.28	0.05	-5.32E-06	2023.43
	2	0.001	0.28	0.05	-7.48E-06	1440.03
	3	0.001	0.28	0.05	-6.71E-06	1605.46
	4	0.001	0.28	0.05	-6.98E-06	1542.49
Plomo	1	0.001	0.2	0.05	-3.40E-06	2548.15
	2	0.001	0.2	0.05	-4.41E-06	1964.73
	3	0.001	0.2	0.05	-1.93E-06	4483.14
	4	0.001	0.2	0.05	-5.42E-06	1599.36

Para el cálculo del largo se aplicó directamente la fórmula (8), donde la profundidad (y), el gradiente (m = 0.2), el factor de resistencia (a = 6.4 seg * m^{1/6}) y el caudal (Q); son datos predeterminados.

$$L = \left[\frac{A_s \cdot y^{8/3} \cdot m^{1/2} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right]^{2/3}$$

Calculando para el plomo, obtenemos los siguientes resultados (tabla 31).

Serie	Área (m ²)	Largo (m)	Ancho (m)	Razón L/A
1	2548.15	181.03	14.08	12.861605
2	1964.73	152.22	12.91	11.793818
3	4483.14	263.83	16.99	15.526761
4	1599.36	132.71	12.05	11.012066

Con las dimensiones presentadas, debe compararse la razón del largo versus el ancho, esta no debe ser superior a 4 en caso de que sea superior esto puede ser corregido aumentando el número de celdas. Recordemos que hasta el momento hemos diseñado una celda con las dimensiones presentadas en la tabla.

Tabla 32

Serie	Área (m ²)	Largo (m)	Ancho (m)	Razón L/A	nº de celdas	largo celda (m)	Ancho (m)	Razón L/A
1	2548.15	181.03	14.08	12.86	4.00	45.26	14.08	3.22
2	1964.73	152.22	12.91	11.79	3.00	50.74	12.91	3.93
3	4483.14	263.83	16.99	15.53	4.00	65.96	16.99	3.88
4	1599.36	132.71	12.05	11.01	3.00	44.24	12.05	3.67

Definiendo el número de celdas a utilizar fácilmente puede corregirse el valor de la razón largo/ancho, como queda demostrado en la tabla anterior, quedando así determinadas las dimensiones de nuestro humedal artificial.

Finalmente las dimensiones del humedal son:

Tabla 33

Serie	1	2	3	4
Vegetación	Scirpus	Scirpus	Typha	Scirpus/Typha
Largo (m)	45.26	50.74	65.96	44.24
Ancho (m)	14.08	12.91	16.99	12.05
nº de celdas	4	3	4	3
Profundidad (cm)	20	20	20	20
Gradiente (%)	20	20	20	20

Según el diseño, el humedal anteriormente descrito puede tratar una corriente líquida de 0.001 m³/seg. que corresponden a 86.4 m³/día, lo que es un número bastante conservador, la razón para ello es el desconocimiento del régimen hídrico natural de la zona en cuestión, el escurial no se encuentra aislado del humedal natural de Campiche, eso nos hace pensar que se debe buscar un flujo que mantenga un equilibrio entre las lagunas del escurial y el humedal adyacente, es por ello que se ha tomado la opción de un flujo mayor. A continuación se presentan las características de las corrientes de entrada y salida del humedal.

Tabla 34

	Entrada	Salida
Flujo	0.001 m ³ /seg.	
Cobre	0.63 mg/lit.	0.05 mg/lit.
Arsénico	0.28 mg/lit.	0.05 mg/lit.
Plomo	0.20 mg/lit.	0.05 mg/lit.

Debido a que el plomo fue el metal más difícil de retirar, las concentraciones de cobre y arsénico que el humedal es capaz de tratar, en realidad, son mayores a las presentadas en la tabla, pero estas son las reales, es decir son los valores máximos comunes en las aguas de las lagunas del escurial y es este y no otro el líquido a recuperar.

Utilizando el software Google Earth®, disponible en Internet, se puede simular el emplazamiento de una planta para la recuperación de aguas de las dimensiones especificadas. En este caso se escogió la serie 4, es decir, tres celdas de 12.05mt por 44.24mt, las medidas se aproximaron a 12x45 para facilitar el procedimiento. Como resultado se obtuvo la siguiente imagen.



Fig. 28

Como se puede apreciar no se ha utilizado las propiedades físicas del agua, ello por que no se ha definido la velocidad del agua dentro de las celdas, aún al hacerlo la temperatura con la que deberíamos comparar es la que se usa para determinar la constante de retiro del metal, pero en este caso la constante ha sido determinada de forma empírica y no mediante correlaciones, ya que para metales pesados no existen. Dichas correlaciones se construyen en función de la temperatura, se necesita un mayor rango de temperaturas para construir una correlación confiable.

Otro aspecto que es necesario incorporar, para complementar la memoria que se presenta, es el comportamiento inter-estaciones climáticas dado que la temperatura es uno de los reguladores del sistema. La diferencia de temperatura registrada durante el periodo de operación de la planta, fue pequeña como para poder extraer conclusiones

responsables. Sin embargo se puede apreciar una tendencia, como muestra el gráfico a continuación.

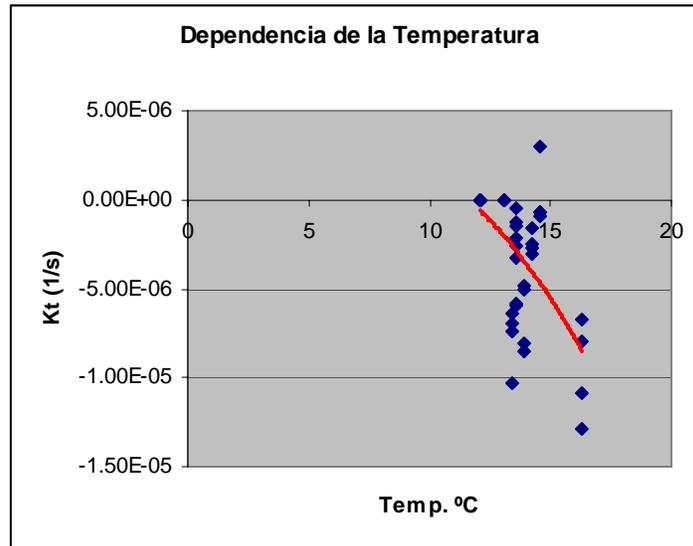


Fig. 29

Este gráfico representa la situación del Arsénico, y muestra la relación entre la temperatura del ambiente, medida por los instrumentos de meteorología de la División Ventanas, y la constante de retiro del metal. Claramente se observa que a mayor temperatura mejor es el rendimiento debido a que la constante de retiro es inversamente proporcional a la disminución de la concentración de contaminantes, es decir mientras menor es la constante mayor es el rendimiento de la planta. De todos modos hay que considerar que el momento de la operación en que se registraron las menores temperaturas coincide con la puesta en marcha y como ya se ha discutido el rendimiento también mejoro con el paso del tiempo debido al afianzamiento de los vegetales involucrados y la generación de la colonia de microorganismos necesarios.

Todo lo anterior nos lleva pensar que se puede presumir un efecto de la temperatura, pero en este caso el comportamiento de la constante de retiro esta influenciado por dos factores importantes y cuantificar las influencias por separado se hace imposible, sin contar con más tiempo de operación, recomendando un año.

Debido a la influencia marina la variación de temperatura no es muy amplia, registrándose la más amplia de 8°C, entre julio y enero, esto permite diseñar sin considerar este efecto en detalle, cabe destacar que de todos modos hay que

monitorear la temperatura, dado que si esta disminuye a menos de 3°C comprometería seriamente el rendimiento del humedal.

Debido a que en este caso es poco probable que las condiciones antes mencionadas sucedan, no consideró el análisis térmico del problema.

9. Conclusiones

Considerando los objetivos planteados al inicio de este trabajo, es decir, el desarrollo de una alternativa viable y de bajo costo para la recuperación de las aguas superficiales del escurial, lo que comprendía la construcción de una planta piloto en el sitio del problema y la posterior operación bajo condiciones definidas, se concluye que, los objetivos fueron cumplidos completamente.

En consecuencia, este trabajo, presenta una solución para el tratamiento de las aguas contaminadas con metales pesados, y que corresponde a un humedal artificial. Se presentaron 4 opciones y la más conveniente desde el punto de vista del área requerida es la cuarta opción, que corresponde a un humedal de una mezcla de *typha agustifolia* y *scirpus californicus* en proporción 10:3, la que es similar a la existente en el humedal natural de Campiche, que es adyacente al escurial y del cual se obtuvieron las plantas para esta experiencia. En cuanto a las dimensiones físicas el humedal constará de 3 celdas de 35 mt. de largo por 12 mt. de ancho y con 20 cm. de profundidad. Para garantizar un correcto comportamiento hidráulico del sistema se dispuso un gradiente del 20%.

Las concentraciones de salida para las que se diseñó fueron consideradas en conformidad con la legislación vigente, decreto supremo 90 (anexo A), que rige la descarga de residuos líquidos a cuerpos continentales de agua, como es el Humedal Campiche. Los límites para los metales en estudio (Cobre, Arsénico y Plomo), son 0.1 mg/lit. y para mantener un rango de seguridad se diseñó para una salida de 0.05 mg/lit.

La planta piloto fue diseñada en base a recomendaciones empíricas encontradas en la bibliografía y sin considerar la calidad del residuo a recuperar, aún así, tuvo un rendimiento aceptable. Es importante destacar que el desempeño de la planta piloto al momento de la creación de este informe aún no alcanzaba su máximo. Esto implica que los datos utilizados en este trabajo pueden resultar más conservadores de lo presupuestado.

El aspecto térmico del diseño no fue abordado por dos razones principalmente. Primero, porque, la zona tiene un clima templado con influencia marina que presenta poca variación en la temperatura, tanto entre estaciones como entre el día y la noche y

segundo, se necesita de un año completo con la planta operando para determinar la influencia de la temperatura, ya que en este caso la variación de temperatura coincidió con el asentamiento de la vegetación, dos factores que afectan al rendimiento, no siendo posible separarlos para análisis.

Considerando lo anterior podemos decir que la solución propuesta para la recuperación de las aguas superficiales del escorial es satisfactoria debido a que el área no es muy grande y el rendimiento puede garantizarse si es operado bajo las condiciones especificadas.

La aplicación de la solución propuesta tiene un costo aproximado de \$ 20 millones, solo considerando la mano de obra y los materiales. La EPA entrega costos probables de mantención y operación de US¢ 19.- por cada 1000 gal.

10. Bibliografía

1. Alloway, B. **Heavy Metals in Soils**. Blackie and Son Ltd., Glasgow/Londres, Reino Unido. 1990.
2. ATSDR. **ATSDR's Toxicological Profiles on CD-ROM**. Agency for Toxic Substances and their Disease Registry. US Public Health Service, Publ: Lewis Publishers. 1997.
3. CEAM. **Humedal de Campiche: Bases para un Manejo Sustentable del Ecosistema**. Centro de Estudios Ambientales, Universidad de Playa Ancha. Mayo, 2006.
4. Cespedes Lisseth, Cifuentes Pamela. **Caracterización Del Humedal De Campiche En Función De Sus Componentes Básicos**. Universidad de Playa Ancha de Ciencias de la Educación. Valparaíso, Chile 2005.
5. Chen S, Malone R F, and Fall L. J **A Theoretical Approach For Iminimisation Of Excavation And Media Costs Of Constructed Wetlands For BOD Removal**. (1993) Journal American Society of Agricultural Engineers 36(6): 1625-1632.(tabla porosidad)
6. Davies, B. **Interrelationships Between Soil Properties and the Uptake of Cadmium, Copper, Lead and Zinc from Contaminated Soils by Radish**. Water, Air and Soil Pollution 63; 331-342, 1992.
7. Erikson, J. **The effects of Clay, Organic Matter and Time on Absorption of Cadmium Added to the soils**. Water, Air and Soil Pollution 40; 359-373, 1988.
8. Erikson, J. **The influence of Ph, Soil Type and Time on Absorption and Uptake by Plants of Cd Added to the soils**. Water, Air and Soil Pollution 48(34); 317-335, 1989.

9. Facchinelli, A., Sacchi, E. y Mallen, L. **Multivariate Statistical and GIS-based Approach to Identify Heavy Metal Source in Soils.** Environmental Pollution 114, 313-324. 2001.
10. Fernández, J. C. y Henriques, F. S. **Metal Contamination in Leaves and Fruits of Holm-Oak Trees Growing in a Pyrites Mining Area at Aljustrel, Portugal.** Water, Air and Soil Pollution 48(3-4); 409-415, 1989.
11. Friberg, L., Nordberg, G. y Vouk, B. **Handbook on the Toxicity of Metals.** Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Holanda, 1980.
12. Gamonal Pajares Priscila. **Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos.** IHE-Delft(International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering). 1996.
13. Gladden J. B., Specht W. L., Nelson E. A. **Comparison of Constructed Wetland Mesocosms Designed for Treatment of Copper-Contaminated Wastewater.** Westinghouse Savannah River Company. 2001.
14. Halverson, Nancy V. **Review of Constructed Subsurface Flow vs. Surface Flow Wetlands.** U.S. Department of Energy. 2004.
15. Hammer Donald A.. **Constructed Wetlands for Wastewater Treatment.** CRC Press. 1 Dic 1989.
16. Kabata-Pendias, A. y Pendias, H. **Trace Elements in Soils and plants.** CRC Press, Boca Raton, Florida, EE.UU. 315p. 1992.
17. Kadlec R.H, Knight R.L. **Treatment Wetlands.** CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1996.
18. Lara B. Jaime A. y Dr. Salgot Miguel. **Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales.** Instituto Catalán de Tecnología, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona 1999.

19. Lehman Roger W., P.E., Weston Roy F., Inc.; Rodgers John H. Jr., Ph.D., Clemson University; Mooney F. Douglas, P.E.; Gladden John B., Ph.D. **Wetlands For Industrial Wastewater Treatment At The Savannah River Site: A Case Study.**, Westinghouse Savannah River Company; James R. Bell, Bechtel Savannah River Inc.
20. Mas , A y Azcue, J. M. **Metales en Sistemas Biológicos.** Promociones y publicaciones universitarias (PPU), Barcelona, 1993.
21. Mengel, K., y Kirby, E. A., **Principles of Plant Nutrition.** 4th ed., International Potash Institute, Berna, 687 pp, 1987.
22. OPS. **Criterios de Salud Ambiental 03, "Plomo".** Publicación Científica N° 388, Organización Panamericana de la Salud. Washington D.C., EE.UU. 1979.
23. Reed Sherwood C., Crites Ronald W., Middlebrooks E. Joe. **Natural Systems for Waste Management and Treatment.** McGraw-Hill Professional.1 Ago 1998.
24. Sadiq, M. **Toxic Metal Chemistry in Marine Environments.** Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong. 1992
25. Stoker, S. y Seager, S. **Contaminación del Aire y Agua.** Química Ambiental. Primera Edición. España. 1981.
26. Thomas, H. 1958. **Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta Barriga.** *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 2, 86 p. Santiago.
27. Vera R., Rowe E. 2004. **Regularización Botadero de Escoria: Informe de Ingeniería.** E.C. Rowe & Asociados, Ingeniería Civil-Geotecnia. Santiago.
28. Vera C Raúl. y Salas A Oscar. **Informe Construcción De Pozos De Control En Escorial.** Codelco División Ventanas. E. C. Rowe Y Cusonda Ltda. Septiembre 2005.

29. www.vivelanaturaleza.com 30 de agosto 2006.
30. Portal Codelco. <http://portal6.codelco.cl/irj/portal>. 20 de Septiembre de 2006.
31. www.directemar.cl. 14 de Junio de 2007.

ANEXO A

Se presenta un resumen de lo pertinente, manteniendo la numeración y el orden del original:

Decreto Supremo N° 90 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia

ESTABLECE NORMA DE EMISION PARA LA REGULACION DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS LIQUIDOS A AGUAS MARINAS Y CONTINENTALES SUPERFICIALES

Publicado en el Diario Oficial del 07 de marzo de 2001

D e c r e t o:

Artículo primero: Establécese la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, cuyo texto es el siguiente:

1. OBJETIVO DE PROTECCION AMBIENTAL Y RESULTADOS ESPERADOS

La presente norma tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores. Con lo anterior, se logra mejorar sustancialmente la calidad ambiental de las aguas, de manera que éstas mantengan o alcancen la condición de ambientes libres de contaminación, de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República.

4. LIMITES MAXIMOS PERMITIDOS PARA DESCARGAS DE RESIDUOS LIQUIDOS A AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES Y MARINAS

4.1 Consideraciones generales.

4.1.1 La norma de emisión para los contaminantes a que se refiere el presente decreto está determinada por los límites máximos establecidos en las tablas números 1, 2, 3, 4 y 5, analizados de acuerdo a los resultados que en conformidad al punto 6.4 arrojen las mediciones que se efectúen sobre el particular.

Los límites máximos permitidos están referidos al valor de la concentración del contaminante o a la unidad de pH, temperatura y poder espumógeno.

4.1.2 Los sedimentos, lodos y/o sustancias sólidas provenientes de sistemas de tratamiento de residuos líquidos no deben disponerse en cuerpos receptores y su disposición final debe cumplir con la normas legales vigentes en materia de residuos sólidos, sin perjuicio de lo dispuesto en el punto 3.11 de esta norma.

4.1.3 Si el contenido natural y/o de captación de un contaminante excede al exigido en esta norma, el límite máximo permitido de la descarga será igual a dicho contenido natural y/o de captación.

4.1.4 Los establecimientos de servicios sanitarios, que atiendan una población menor o igual a 30.000 habitantes y que reciban descargas de residuos industriales líquidos provenientes de establecimientos industriales, estarán obligados a cumplir la presente norma, reduciendo la concentración de cada contaminante en su descarga final, en la cantidad que resulte de la diferencia entre la concentración del valor característico establecida en el punto 3.7, para cada contaminante y el límite máximo permitido señalado en la tabla que corresponda, siempre que la concentración del valor característico sea mayor al valor del límite máximo establecido en esta norma.

4.3. Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua lacustre

4.3.1 Las descargas de los residuos líquidos que se viertan en forma directa sobre cuerpos de aguas lacustres naturales (lagos, lagunas) como aquellos que se viertan a cuerpos fluviales que sean afluentes de un cuerpo de agua lacustre, no deberán sobrepasar los límites máximos que se indican en la Tabla N° 3.

4.3.2 Las descargas a los cuerpos lacustres de naturaleza artificiales deberán cumplir con los requisitos establecidos en el punto 4.2.

TABLA N° 3

Límites Máximos Permitidos Para La Descarga De Residuos Líquidos A Cuerpos De Aguas Lacustres

Contaminantes	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permitido
Aceites y grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	1
Arsénico	mg/L	As	0,1
Cadmio	mg/L	Cd	0,02
Cianuro	mg/L	CN ⁻	0,5
Cobre Total	mg/L	Cu	0,1
Coliformes Fecales o termotolerantes	NMP/100 ml	coli/100 ml	1000- 70*
Indice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0,2
Cromo Total	mg/L	Cr Total	2,5
DBO ₅	Mg O ₂ /L	DBO ₅	35
Estaño	mg/L		0,5
Floruro	mg/L	F ⁻	1
Fósforo	mg/L	P	2
Hidrocarburos Totales	mg/L	HF	5
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	2
Manganeso	mg/L	Mn	0,5
Mercurio	mg/L	Hg	0,005
Molibdeno	mg/L	Mo	0,07
Níquel	mg/L	Ni	0,5
Nitrógeno Total**	mg/L	NKT	10
PH	Unidad	pH	6,0 - 8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,2
SAAM	mg/L	SAAM	10
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Sedimentables	ml/L 1 h		5
Sólidos Suspendido Totales	mg/L	SS	80
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	1.000
Sulfuros	mg/L	S ⁻²	1
Temperatura	°C	T°	30
Zinc	mg/L	Zn	5

* = En áreas aptas para la acuicultura y áreas de manejo y explotación de recursos bentónicas, no se deben sobrepasar los 70 NMP/100 ml.

** = La determinación del contaminante corresponderá a la suma de las concentraciones de nitrógeno total kjeldahl, nitrito y nitrato.

6.5 Métodos de Análisis.

La determinación de los contaminantes incluidos en esta norma se debe efectuar de acuerdo a los métodos establecidos en las normas chilenas oficializadas que se indican a continuación, teniendo en cuenta que los resultados deberán referirse a valores totales en los contaminantes que corresponda.

- NCh 2313/1, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 1: Determinación pH.

- NCh 2313/2, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 2: Determinación de la Temperatura.

- NCh 2313/3, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 3: Determinación de Sólidos Suspendidos Totales secados a 103°C - 105°C.

- NCh 2313/4, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 4: Determinación de Sólidos Sedimentables.

- NCh 2313/9, Of 96, decreto supremo N° 879 de 1996 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 9: Determinación de Arsénico.

- NCh 2313/10, Of 96, decreto supremo N° 879 de 1996 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 10: Determinación de Metales Pesados: Cadmio, Cobre, Cromo Total, Hierro, Manganeso, Níquel, Plomo, Zinc.

- NCh 2313/12, Of 96, decreto supremo N° 879 de 1996 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 12: Determinación de Mercurio.

- NCh 2313/17, Of 97, decreto supremo N° 1144 de 1997 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales-Métodos de Análisis Parte 17: Determinación de Sulfuro Total.

- NCh 2313/18, Of 97, decreto supremo N° 1144 de 1997 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales-Métodos de Análisis Parte 18: Determinación de Sulfato disuelto (para la determinación se sulfato total se debe realizar previa digestión de la muestra).
- NCh 2313/25, Of 97, decreto supremo N° 37 de 1998 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales-Métodos de Análisis Parte 25: Determinación de Metales por espectroscopía de emisión de plasma.
- NCh 2313/30, Of 99, decreto supremo N° 1159 de 1999 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales-Método de Análisis Parte 30: Determinación de Selenio.

ANEXO B

Se presentan los resultados entregados por la empresa encargada en el periodo de febrero del 2005 a marzo del 2006:

CODELCO DIVISION VENTANAS
CONSTRUCCION DE POZOS DE CONTROL EN ESCORIAL
INFORME
SEPTIEMBRE 2005

Preparado por: E. C. Rowe y Cusonda Ltda.

Concentración de cobre y pH en aguas superficiales.

Tabla 1

FECHA	SOLICITUS	CU.	PH.
	ANALISIS	mg/lit	unit.pH
02.02.05	5794	0,600	8,030
02.02.05	5795	< 0,100	8,700
23.03.05	13112	0,680	9,000
27.04.05	19943	0,880	8,500
14.05.05	23356	0,880	7,500
01.06.05	27013	0,300	8,000
19.07.05	36443	0,120	8,600
08.08.05	40420	0,600	8,500
03.09.05	45793	0,800	8,500
29.09.05	50823	5,400	8,600
08.11.05	58797	< 0,100	6,000
16.12.05	66452	< 0,100	8,300
24.01.06	4228	1,020	7,400
19.02.06	8382	0,400	8,600
24.03.06	14845		

Concentración de cobre y pH en aguas freáticas.

Tabla 2

	AGUA ESC. PZ- 1			AGUA ESC. PZ- 2		
FECHA	SOLICITUD	CU.	PH	SOLICITUD	CU.	PH
	ANALISIS	mg/lit	unit.pH	ANALISIS	mg/lit	unit.pH
26.09.05	50133	0,880	7,200	50134	5,160	7,600
08.11.05	58816	0,417	8,100	58817	1,709	8,200
16.12.05	66453	< 0,1	7,800	66454	< 0,1	7,300
24.01.06	4229	<0,1	7,600	4230	0,420	7,400
19.02.06	8378	0,640	7,900	8380	2,400	7,800
24.03.06	14846	0,720	7,500	14847	0,160	7,600
	AGUA ESC. PZ- 3			AGUA ESC. PZ- 4		
FECHA	SOLICITUD	CU.	PH	SOLICITUD	CU.	PH
	ANALISIS	mg/lit	unit.pH	ANALISIS	mg/lit	unit.pH
26.09.05	50135	0,920	7,200	50136	37,000	6,700
08.11.05	58813	8,713	7,000	58819	66,860	6,000
16.12.05	66455	0,451	7,200	66456	150,000	4,800
24.01.06	4231	0,140	7,400	4232	<0,1	5,000
19.02.06	8380	0,040	7,400	8381	0,660	4,700
24.03.06	14848	<0,1	7,400	14849	85,000	5,400

Ubicación de los piezómetros (pozos)

Tabla 3

Identificación Piezómetro	Coordenadas UTM		Cota (m.s.n.m.)
	Norte (m)	Este (m)	
PZ - 1	6.372.757,75	268.129,81	2,33
PZ - 2	6.373.053,31	268.373,64	2,71
PZ - 3	6.373.140,92	268.304,67	4,40
PZ - 4	6.373.152,32	268.135,33	3,11

ANEXO C

Se presenta la tabla completa de resultados de análisis a agua y sedimentos hecha por la UPLACED:

Tabla 4

RESULTADOS DE MUESTRAS DE AGUA Y SEDIMENTOS							
PARAMETROS mg/lt - mg/kg	MATRIZ	PUNTOS DE MUESTREO					
		ESC11	ESC12	ESC2	HC1	HC2	HC3
As TOTAL	agua	0,462	0,522	0,568	0,271	0,298	0,209
	sedimentos	338		86		20	45
Cu TOTAL	agua	0,14	0,1	0,08	0,2	0,17	0,1
	sedimentos	24600		1536		252	786
DBO5	agua	<5	<5	12	<5	9	8
DQO	agua	31	27	36	42	34	43
P	agua	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	sedimentos	4999		3979		2409	948
HC TOTALES	sedimentos	<200		<200		<200	<200
Fe TOTAL	sedimentos	19667		4348		4453	4877
N - NITRATO	sedimentos	0,4		0,71		0,33	0,3
N TOTAL	agua	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	sedimentos	2500		4582		925	9373
SO4	agua	1274	1244	1276	254	260	259
	sedimentos %	0,19		0,22		0,04	0,07
pH	agua	8,4	8,31	8,77	5,21	8,18	8,11
T°	agua sup.	20,7	19	18,6	18,8	18,7	19

(CEAM, 2006)

ANEXO D

Propiedades físicas del agua.

Tabla 5

Temperatura (° C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica x10 ³ (N*s/m ²)	Viscosidad cinemática x10 ⁶ (m ² /s)
0	999.8	1.781	1.785
5	1000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

ANEXO E

Características típicas de los medios para humedales SFS.

Tabla 6

Tipo de material	Tamaño efectivo D₁₀ (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k_s (m³/m²/d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

ANEXO F

Métodos de análisis de laboratorio

Ensayo: Cobre

Nº Cu-17

Fundamento:

Se basa en la disolución del elemento a analizar (Cu) a través de una digestión ácida. A la solución obtenida se le determina cobre, directamente por absorción atómica.

Procedimiento:

1. Tomar 25 ml de muestra de Emisario Final.
2. En matraz de 100 ml, agregar la alícuota tomada.
3. Adicionar 10 ml de HCl 1:1
4. Adicionar agua hasta completar el aforo.
5. Agitar vigorosamente para asegurar solución homogénea.
6. Condicionar el Equipo de Absorción Atómica
7. Posteriormente se realiza la determinación de Cu utilizando soluciones estándares de trabajo de 1,0 – 3,0 y 5,0 mg/l a partir de una solución Intermedia de 50 mg/l
8. La solución Intermedia de 50 mg/l de cobre se prepara a partir de una solución Stock de 1000 mg/l
9. La duración de los estándares se detalla en la tabla siguiente:

Estándares Primarios y de trabajo:

Estándares	Duración (aprox)
<i>1000 ppm (primario)</i>	<i>2 años</i>
<i>Estándar Intermedio</i>	<i>1 año</i>
<i>Estándares de trabajo</i>	<i>6 meses</i>

10. Condiciones Instrumentales para cobre:

Variables	Condiciones
Longitud de onda	324,7
Slit	0.7
Tipo de Lámpara	Cátodo Hueco
Mechero	Normal
Llama	Aire-Acetileno
Equipo	Varian SAA: 220 F.S.

Reactivos y Materiales:

1. HCl concentrado p.a.
2. Solución Stock de Cu 1000 mg/l
3. HCl 1:1 p.a
4. Agua destilada
5. Solución Intermedia de 50 mg/l
6. Probeta Graduada
7. Sistema de Información Cal Web.

Cálculos.

Ppm Elementos: $A \times F(d)$

A = mg/l del elemento

F(d) = Factor de dilución

Ensayo: Cadmio

Nº Cd-03

Fundamento:

Se basa en la disolución del elemento a analizar (Cd) a través de una digestión ácida. A la solución obtenida se le determina Cadmio, directamente por absorción atómica.

Procedimiento:

1. Tomar 80 ml de muestra del compuesto semanal del Emisario Final.
2. En matraz de 100 ml, agregar la alícuota tomada.
3. Adicionar aproximadamente 20 ml de HCl 1:1
4. Agitar vigorosamente para asegurar solución homogénea
5. Condicionar el Equipo de Absorción Atómica
6. Posteriormente se realiza la determinación de Cd utilizando soluciones estándares de trabajo de 0,1 y 0,2 mg/l a partir de soluciones Intermedias de 50 mg/l y 10 mg/l
7. Las soluciones Intermedias de cadmio se prepara a partir de una solución Stock de 1000 mg/l

La duración de los estándares se detalla en la tabla siguiente:

Estándares Primarios y de trabajo:

Estándares	Duración(aprox)
1000 ppm (primario)	2 años
Estándares intermedios	1 año
Estándares de trabajo	6 meses

8. Condiciones Instrumentales para Cadmio:

VARIABLES	CONDICIONES
Longitud de onda	228,8
Slit	0.5
Tipo de Lámpara	Cátodo Hueco
Mechero	4 pulgadas
Llama	Aire-Acetileno
Equipo	Varian SAA: 220 F.S.

Reactivos y Materiales:

1. HCl concentrado p.a.
2. Solución Stock de Cd 1000 mg/l
3. HCl 1:1 p.a
4. Agua destilada
5. Solución Intermedia de 50 mg/L
6. Solución Intermedia de 10 mg/L
7. Sistema de Información Cal Web
8. Probeta Graduada

Cálculos.

Ppm Elementos: $A \times F(d)$

A = mg/l del elemento

F(d) = Factor de dilución

Ensayo: pH

Nº 1

Muestras: Riles Emisario Final.

Fundamento:

Se basa en la actividad del ion hidronio $[H^+]$ en solución acuosa. La concentración de dichos iones son cuantificados potenciométricamente a través de un electrodo.

Procedimiento:

1. Verificar lectura del equipo de pH mediante solución Buffer de Biftalato de pH conocido
2. Introducir el electrodo en muestra del Emisario Final
3. Esperar respuesta del equipo.
4. Anotar valores de pH en planilla correspondiente

Reactivos:

1. Solución Buffer pH = 4,00
2. Solución Buffer pH = 7,00
3. Agua Destilada.

IMPUREZAS EN RILES
POR ESPECTROSCOPIA DE EMISION POR PLASMA.

Ensaye Componentes menores en Riles

Nº EEA-7

Método:

Análisis multielemento mediante Espectrometría de Emisión Atómica por Plasma acoplada utilizando espectrómetro Thermo Elemental Modelo IRIS INTREPID II XDL con manejo computarizado de análisis, direccionamiento y archivo de información.

Alcance:

Todos los RILes generados en Fundición y Refinería Ventanas.

Elementos analizados en rango de aplicación:

Al	0 - 10	mg/Lt
As	0 - 800	mg/Lt
Ca	0 - 300	mg/Lt
Co	0 - 10	mg/Lt
Cr	0 - 10	mg/Lt
Fe	0 - 100	mg/Lt
Mg	0 - 10	mg/Lt
Ni	0-100	mg/Lt
Pb	0-10	mg/Lt
Sb	0-100	mg/Lt
Se	0-200	mg/Lt

Si	0-10	mg/Lt
Zn	0-10	mg/Lt
S	0-1000	mg/Lt
Cu	0 - 50	mg/Lt

Fundamento:

Las muestras de Riles previamente preparadas se convierten en aerosol en el pulverizador y son inyectadas por un flujo de argón portador.

Excitados los distintos componentes emiten radiaciones, las que son separadas en sus respectivos elementos y transformadas en señal eléctrica.

La concentración de los distintos elementos analizados se obtienen del programa computacional previamente preparado que relaciona la señal eléctrica de cada elemento con la concentración.

Líneas analíticas

Elemento	Long. onda	Unidades	N. orden
Al	396.2	nm	85
As	189.0	nm	177
Ca	317.9	nm	105
Co	228.6	nm	147
Cr	283.5	nm	118
Fe	259.9	nm	129
Mg	279.5	nm	120
Ni	221.6	nm	152
Pb	220.4	nm	152
Sb	206.8	nm	162
Se	196.0	nm	171
Si	251.6	nm	133
Zn	213.9	nm	157
S	180.7	nm	185
Cu	324.8	A°	103

Procedimiento

1. Preparación de muestras.

Cada muestra proveniente del Laboratorio de Aguas, es ambientada en medio ácido con 2 ml de HCl, quedando en condiciones de realizarle un barrido espectrográfico.

2. Preparación de estándares.

Los estándares se preparan sobre la base de solución patrón de cada elemento.

STD-1

Elemento	Cantidad
As	800 ppm
Ca	300 ppm
Fe	100 ppm
Ni	100 ppm
Sb	100 ppm
Al	10 ppm
Cr	10 ppm
Si	10 ppm

STD-2

Elemento	Cantidad
S	1000 ppm
Se	200 ppm
Cu	30 ppm
Co	10 ppm
Mg	10 ppm
Pb	10 ppm
Zn	10 ppm

3. Estandarización:

Se estandariza el espectrómetro invocando el programa analítico previamente preparado, exponiendo los estándares.

4. Análisis.

Se procede a analizar las diversas muestras de Riles.

Cálculos.

La señal eléctrica de cada elemento es integrada y procesada por el sistema computacional, utilizando factores de dilución adecuados.

Se registra el resultado en pantalla en unidades de concentración (mg/l) de acuerdo a las curvas de estandarización.

Direccionamiento de la Información.

1. La información de cada muestra es guardada en archivadores usuales (hard copy) en dicho laboratorio.
2. Posteriormente se informa a través del Sistema Cal-Web

ANEXO G

Cálculo de la constante de retiro de metales pesados desde desechos líquidos. En este anexo se presentan los cálculos para el arsénico y el plomo.

Datos de diseño que serán ocupados en ambos cálculos:

Ancho: 40 cm.

Largo: 200 cm., corresponden a 2 celdas de 100 cm. cada una, colocadas en serie.

Profundidad de la celda: 20 cm.

Porosidad del medio: 80%

Arsénico:

Datos experimentales:

Arsénico				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 1				
12,1	5-Oct	1,06	0,10	0,10
14,6	12-Oct	1,06	0,11	0,10
13,6	26-Oct	1,06	0,28	0,20
13,6	2-Nov	0,96	0,28	0,12
12,1	9-Nov	1,17	0,20	0,20
13,1	16-Nov	0,73	0,10	0,10
14,2	23-Nov	0,99	0,14	0,10
13,9	30-Nov	0,89	0,22	0,10
13,4	7-Dic	1,05	0,25	0,10
16,3	18-Dic	1,13	0,90	0,40

Arsénico				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 2				
12,1	5-Oct	1,47	0,10	0,10
14,6	12-Oct	1,47	0,11	0,10
13,6	26-Oct	1,47	0,28	0,25
13,6	2-Nov	1,47	0,28	0,21
12,1	9-Nov	1,30	0,20	0,20
13,1	16-Nov	1,32	0,10	0,10
14,2	23-Nov	1,23	0,14	0,10
13,9	30-Nov	1,48	0,22	0,10
13,4	7-Dic	1,56	0,25	0,10
16,3	18-Dic	1,34	0,90	0,40

Arsénico				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 3				
12,1	5-Oct	0,92	0,10	0,10
14,6	12-Oct	0,92	0,11	0,17
13,6	26-Oct	0,92	0,28	0,26
13,6	2-Nov	0,61	0,28	0,20
12,1	9-Nov	0,77	0,20	0,20
13,1	16-Nov	0,66	0,10	0,10
14,2	23-Nov	1,10	0,14	0,10
13,9	30-Nov	0,85	0,22	0,10
13,4	7-Dic	0,96	0,25	0,10
16,3	18-Dic	1,16	0,90	0,20

Arsénico				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 4				
12,1	5-Oct	1,02	0,10	0,10
14,6	12-Oct	1,02	0,11	0,10
13,6	26-Oct	1,02	0,28	0,21
13,6	2-Nov	1,19	0,28	0,14
12,1	9-Nov	1,29	0,20	0,20
13,1	16-Nov	0,80	0,10	0,10
14,2	23-Nov	0,65	0,14	0,10
13,9	30-Nov	1,42	0,22	0,10
13,4	7-Dic	1,11	0,25	0,10
16,3	18-Dic	0,98	0,90	0,20

Usando los datos de diseño y las ecuaciones de diseño (1) y (2) presentadas en la sección correspondiente, se puede calcular:

Arsénico		
temp °C		Kt
Serie 1		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	-6,69E-07
13,6	26-Oct	-2,61E-06
13,6	2-Nov	-5,84E-06
12,1	9-Nov	0
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	-2,49E-06
13,9	30-Nov	-5,09E-06
13,4	7-Dic	-6,97E-06
16,3	18-Dic	-6,74E-06

Arsénico		
temp °C		Kt
Serie 2		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	-9,30E-07
13,6	26-Oct	-1,22E-06
13,6	2-Nov	-3,30E-06
12,1	9-Nov	0
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	-3,09E-06
13,9	30-Nov	-8,47E-06
13,4	7-Dic	-1,04E-05
16,3	18-Dic	-7,99E-06

Arsénico		
temp °C		Kt
Serie 3		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	3,03E-06
13,6	26-Oct	-5,02E-07
13,6	2-Nov	-1,47E-06
12,1	9-Nov	0
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	-2,76E-06
13,9	30-Nov	-4,86E-06
13,4	7-Dic	-6,37E-06
16,3	18-Dic	-1,28E-05

Arsénico		
temp °C		Kt
Serie 4		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	-6,49E-07
13,6	26-Oct	-2,17E-06
13,6	2-Nov	-5,90E-06
12,1	9-Nov	0
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	-1,63E-06
13,9	30-Nov	-8,08E-06
13,4	7-Dic	-7,37E-06
16,3	18-Dic	-1,08E-05

Al igual que en el caso del cobre los casos en que la constante da igual a cero es por que los niveles existentes de arsénico eran menores al lo detectable por la maquina y por lo tanto serán omitidos en posteriores análisis.

Para entender el comportamiento de la constante en este caso, es mejor graficar los datos.

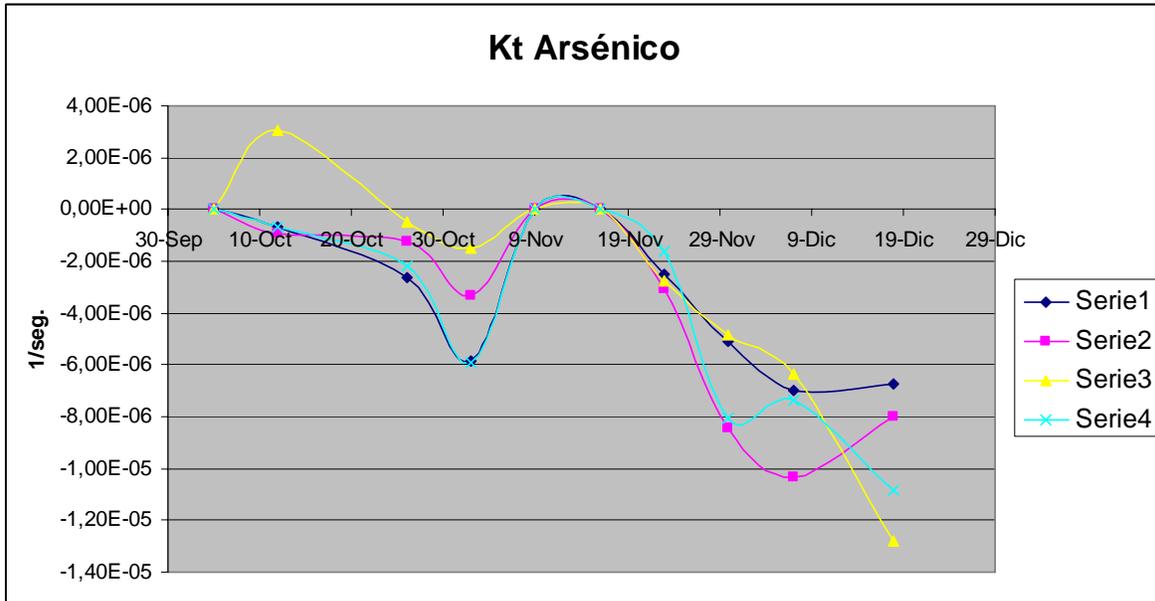


Fig. 30

La tendencia es clara y similar a la del caso del cobre y por lo tanto para el cálculo final de Kt usaremos el mismo método:

Kt promedio Serie 1	-5,32E-06
Kt promedio Serie 2	-7,48E-06
Kt promedio Serie 3	-6,71E-06
Kt promedio Serie 4	-6,98E-06

Plomo:

Datos experimentales:

Plomo				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 1				
12,1	5-Oct	1,06	0,10	0,10
14,6	12-Oct	1,06	0,10	0,10
13,6	26-Oct	1,06	0,10	0,10
13,6	2-Nov	0,96	0,15	0,10
12,1	9-Nov	1,17	0,18	0,16
13,1	16-Nov	0,73	0,10	0,10
14,2	23-Nov	0,99	0,10	0,10

13,9	30-Nov	0,89	0,10	0,10
13,4	7-Dic	1,05	0,17	0,10
16,3	18-Dic	1,13	0,20	0,10

Plomo				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 2				
12,1	5-Oct	1,47	0,10	0,10
14,6	12-Oct	1,47	0,10	0,10
13,6	26-Oct	1,47	0,10	0,10
13,6	2-Nov	1,47	0,15	0,10
12,1	9-Nov	1,30	0,18	0,17
13,1	16-Nov	1,32	0,10	0,10
14,2	23-Nov	1,23	0,10	0,10
13,9	30-Nov	1,48	0,10	0,10
13,4	7-Dic	1,56	0,17	0,10
16,3	18-Dic	1,34	0,20	0,10

Plomo				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 3				
12,1	5-Oct	0,92	0,10	0,10
14,6	12-Oct	0,92	0,10	0,10
13,6	26-Oct	0,92	0,10	0,10
13,6	2-Nov	0,61	0,15	0,10
12,1	9-Nov	0,77	0,18	0,10
13,1	16-Nov	0,66	0,10	0,28
14,2	23-Nov	1,10	0,10	0,10
13,9	30-Nov	0,85	0,10	0,10
13,4	7-Dic	0,96	0,17	0,10
16,3	18-Dic	1,16	0,20	0,10

Plomo				
temp °C	fecha	Q (ml/s)	Ce (mg/l)	Co (mg/l)
Serie 4				
12,1	5-Oct	1,02	0,10	0,10
14,6	12-Oct	1,02	0,10	0,10
13,6	26-Oct	1,02	0,10	0,10
13,6	2-Nov	1,19	0,15	0,10
12,1	9-Nov	1,29	0,18	0,07
13,1	16-Nov	0,80	0,10	0,10
14,2	23-Nov	0,65	0,10	0,10
13,9	30-Nov	1,42	0,10	0,10
13,4	7-Dic	1,11	0,17	0,10
16,3	18-Dic	0,98	0,20	0,10

Usando los datos de diseño y las ecuaciones de diseño (1) y (2) (pág. 31) presentadas en la sección correspondiente, se puede calcular:

Plomo		
temp °C	fecha	Kt
Serie 1		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	0
13,6	26-Oct	0
13,6	2-Nov	-2,93E-06
12,1	9-Nov	-1,01E-06
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	0
13,4	7-Dic	-3,90E-06
16,3	18-Dic	-5,76E-06

Plomo		
temp °C	fecha	Kt
Serie 2		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	0
13,6	26-Oct	0
13,6	2-Nov	-4,47E-06
12,1	9-Nov	-5,44E-07
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	0
13,4	7-Dic	-5,80E-06
16,3	18-Dic	-6,83E-06

Plomo		
temp °C	fecha	Kt
Serie 3		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	0
13,6	26-Oct	0
13,6	2-Nov	-1,84E-06
12,1	9-Nov	-3,32E-06
13,1	16-Nov	4,98E-06
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	0
13,4	7-Dic	-3,57E-06
16,3	18-Dic	-5,91E-06

Plomo		
temp °C	fecha	Kt
Serie 4		
12,1	5-Oct	0
14,6	12-Oct	0
13,6	26-Oct	0
13,6	2-Nov	-3,60E-06
12,1	9-Nov	-8,94E-06
13,1	16-Nov	0
14,2	23-Nov	0
13,9	30-Nov	0
13,4	7-Dic	-4,13E-06
16,3	18-Dic	-4,99E-06

En el caso del plomo, que fue detectado en menos del 50% de las campañas, para determinar Kt, sacamos un promedio simple de todos los datos que son distintos de cero.

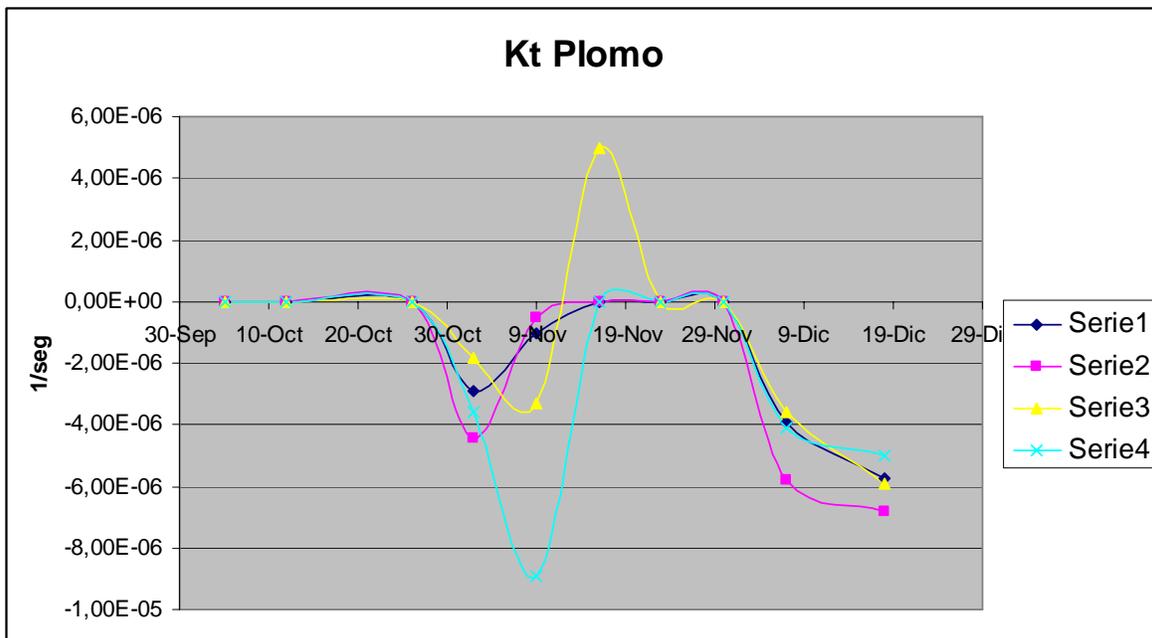


Fig. 31

Finalmente la constante por serie tiene los siguientes valores:

Kt promedio serie 1	-3,40E-06
Kt promedio serie 2	-4,41E-06
Kt promedio serie 3	-1,93E-06
Kt promedio serie 4	-5,42E-06

ANEXO H

Estimación de costos.

Basándose en las dimensiones del humedal a construir tenemos los siguientes datos.

Serie	4
Vegetación	Scirpus/Typha
Largo (m)	44.24
Ancho (m)	12.05
nº de celdas	3
Profundidad (cm)	20
Gradiente (%)	20

Área a cubrir, por celda, con membrana impermeable (asfáltica): 600 app.

Área total: 1800 m²

Nota: la profundidad considerada es de 60 cm y no 20, ya que esta última corresponde a la profundidad del agua, y no considera el relleno para sostener las plantas.

Volumen total a remover (escoria): 1600 m³ app.

Nota: considerando que se excava una profundidad de 1 metro para rellenar con arcilla de modo que la membrana no este en contacto con la escoria, que es de geometría angular y podría dañar la integridad de la capa aislante.

Del volumen removido un 40% será arcilla y 40% el sustrato del humedal compuesto en gran parte por grava. El 20% restante se deja para el flujo del agua.

Una estimación de los costos, en materiales:

- Membrana: \$21.990 x 5 m².

$$\text{Costo total: } 21.990 \cdot \frac{1.800}{5} = 7.916.400$$

- Grava: \$6.500 m³.

$$\text{Costo total: } 6.500 \cdot 1.600 \cdot 0.4 = 4.160.000$$

- La arcilla o suelo arcilloso, puede conseguirse al interior de la empresa ya que los residuos sólidos de ese tipo son abundantes, solo para concepto de evaluación consideraremos el mismo valor de la grava, es decir:

$$\text{Costo total: } 6.500 \cdot 1.600 \cdot 0.4 = 4.160.000$$

- Los vegetales necesarios son nativos de la zona, con la debida planificación no deberían generar costos extra que deban considerarse en esta etapa.

El costo de la mano de obra puede estimarse en los siguientes valores:

Ingeniero	\$ 900.000	mensual	x 1 mes	900.000
Jefe Operaciones	\$ 15.000	diario	x 28 días	420.000
Obreros	\$ 6.000	diario	x 28 días	168.000

Trabajando a un turno.

Ingeniero	\$ 900.000	x 1	900.000
Jefe Operaciones	\$ 420.000	x 1	420.000
Obreros	\$ 168.000	x 5	840.000

Sub-total: \$ 2.160.000.-

La suma nos lleva a un valor final estimado de: \$ 18.396.400.-

Una comparación de costos es entregada por la USEPA, fechada en 2004.

	Costo de capital (2004)/0,1 mgd
Humedal SFS sin aislamiento	US\$ 431.000
Humedal FWS sin aislamiento	US\$ 184.000
Humedal SFS con aislamiento	US\$ 555.000
Humedal FWS con aislamiento	US\$ 308.000
Planta convencional	US\$ 1.315.000

(Halverson, 2004)

Comparando los costos de un humedal de flujo superficial con la planta convencional se obtiene una proporción de 1 a 4.

	Costo (2004)/1000 gal.
SFS o FWS (EPA)	US¢ 19
Planta convencional	US\$ 3,5

(Halverson, 2004)

La diferencia se hace aún más notoria al comparar los costos de operación y mantención. La proporción es de 1 a 18 entre el humedal y el sistema convencional.

Discusión:

El valor es una estimación conservadora debido a que esta basada en los precios de materiales y mano de obra que se encuentran en el mercado para una persona natural y no para una empresa. Debido a los pocos requerimientos de mano de obra, por ejemplo, esta tarea es perfectamente abordable por el personal de la empresa. Esto si se desea realizar la obra con medios propios de la empresa, una opción es también la licitación, pero nuevamente, por las dimensiones de la obra no parece necesario.

Independiente del método de construcción seleccionado, el costo de la obra es bajo en comparación a las prestaciones que la planta entregaría. Cave destacar que en este caso no se consideró el valor del terreno a utilizar debido a que ya es de propiedad de la empresa contratante y en un futuro cercano un plan regulador en estudio lo consideraría no apto para otro uso industrial.

ANEXO I

Reseña Histórica de la Planta

La fundición y refinería Las Ventanas, la mayor instalación industrial de la V Región de Valparaíso, fue construida en la década de los 60 luego que el Estado chileno decidiera tener una nueva fundición y refinería para exportar el cobre con mayor valor agregado.

Su construcción fue un proyecto país, apoyado por todos los sectores, que tenía como objetivo lograr mejores condiciones para exportar este patrimonio nacional, ya que en esa época la gran minería del cobre y sus fundiciones pertenecían a empresas extranjeras.

En 1960 Chile exportaba 512 mil toneladas de cobre, de las cuales 232 mil correspondían a cobre Blister con 98,5 % de pureza, que debía ser refinado en el extranjero para lograr la ley más alta (99,99 %) y extraerle el oro y la plata contenidos en el metal. Por lo tanto, al explotar concentrado de cobre o cobre Blister, el país dejaba de percibir cuantiosos recursos económicos.

Al procesar y refinar el metal en Chile, se logró un producto de mayor valor y se fomentó el desarrollo industrial y el empleo, mejorando los ingresos del sector minero de pequeña y mediana escala.

Los estudios preliminares para ubicar la nueva fundición consideraron opciones entre Rancagua y Coquimbo, escogiendo finalmente Ventanas por su cercanía a los puertos de Quintero y Valparaíso, por contar con un abastecimiento seguro de agua desde el río Aconcagua, y la equidistancia con centros y proyectos mineros de la época. Además se tomó en cuenta el interés de los habitantes y autoridades de la zona, que defendieron la instalación de una gran industria en la región.

La obra, que comenzó en 1960, estuvo a cargo de la empresa Klochner-Humboldt-Deutz y fue inaugurada el 30 de septiembre de 1964, bajo el gobierno del Presidente Jorge Alessandri Rodríguez. Paralelamente, en 1963, se contrató con Ferrostaal A.G. y Hochtief A.A.G., la construcción de una refinería electrolítica, la que fue inaugurada el 11 de noviembre de 1966 por el Presidente Eduardo Frei Montalva. En conjunto, el proyecto demandó una inversión de US\$ 45 millones de la época.

La Fundición inició sus operaciones con un horno tipo Reverbero de 37 metros de largo por 8 de ancho y dos convertidores Pierce Smith de 8 metros de largo por 3 de diámetro. Su principal equipo de fusión era el Reverbero, una gran construcción de ladrillos refractarios donde quemadores de petróleo generaban 1.400 grados Celsius de temperatura permitiendo la fusión de 450 toneladas diarias.

Este horno dejó de operar en febrero de 1998, luego que el Proyecto de Modernizaciones lo reemplazara por el Convertidor Teniente como unidad de fusión principal.

El cobre fino se purificaba en convertidores para obtener cobre blister de 98 % de pureza, el cual se procesaba en refino a fuego para transformarse en ánodos de cobre que constituyen la materia prima en el proceso final de la refinación electrolítica. Esta última partió con tres circuitos de 336 celdas cada uno y una capacidad de 84.000 toneladas de cobre electrolítico. La planta de Metales Nobles, por su parte, producía 1.500 kilogramos de oro y 14.000 kilogramos de plata.

La Refinería incorporó un cuarto circuito en 1979 y un nuevo horno de refino, con lo cual la producción se elevó a 160.000 toneladas anuales. En 1982, se aplicó inversión de corriente (PRC) en un circuito, elevándose la producción a 175.000 toneladas. Otras mejoras y la extensión del PRC a toda la refinación, incrementaron la producción a 210.000 toneladas.

A fines de 1996 se materializó el aumento de la capacidad de la refinación en un 50 %, al incorporar dos nuevos circuitos de 335 celdas de electrólisis, lo que elevó su capacidad nominal a 327.000 toneladas anuales. El proyecto costó 36 millones de dólares y ubicó a Refinería de Ventanas entre las diez mayores del mundo.

La Fundición y Refinería Las Ventanas tiene dos tipos de producciones principales: cobre anódico, a partir de la fusión de concentrados y precipitados y cátodos de cobre refinado electrolíticamente. El primero es un producto intermedio y, el segundo, el producto final de exportación.

La Fundición tiene una capacidad de fusión 424.000 toneladas anuales de concentrados. La refinación electrolítica tiene una capacidad de producción superior a las 330.000 toneladas de cátodos, las que se obtienen en seis circuitos de refinación que

son alimentados por ánodos propios, de la Fundición Hernán Videla de Paipote, Chagres y El Teniente.

Traspaso a Codelco

El traspaso de la Fundición y Refinería Ventanas de Enami a Codelco fue dispuesto como una fórmula para solucionar los pasivos acumulados por la primera sin que el Estado perdiera su control.

El acuerdo fue el resultado de un extenso estudio, durante el cual se consideraron diversas opciones, escogiéndose el traspaso a Codelco como la opción de menor costo social y económico para el Estado. La iniciativa fue acordada por las autoridades del Gobierno con ambas empresas y con la participación de sus organizaciones laborales, luego de lo cual la propuesta fue enviada al Parlamento, dado que se requería la dictación de una ley que permitiera a ENAMI desprenderse de esta instalación.

Luego de un largo debate y análisis en el Congreso Nacional, el proyecto fue promulgado y se convirtió en la Ley 19.993 el 4 de enero del año 2005. Ese mismo día tuvo lugar en Ventanas una ceremonia que fue encabezada por el Presidente Ricardo Lagos y al que asistieron el Ministro de Minería, Alfonso Dulanto, el Presidente Ejecutivo de Codelco, Juan Villarzú y el Vicepresidente Ejecutivo de Enami, Jaime Pérez de Arce, entre otras autoridades.

El Presidente del Sindicato de Ventanas, Luis Guerra, destacó en su intervención la participación de los trabajadores en el proceso, así como la voluntad del Gobierno en escuchar sus requerimientos. Posteriormente, el Ministro de Minería señaló que "con el paso que hoy damos, Enami quedará totalmente saneada en lo financiero y podrá cumplir a través de sus poderes de compra, plantas de beneficio y las fundiciones de Paipote y Ventanas, con las obligaciones que la ley le encomienda".

Cerrando la ceremonia intervino el Presidente de la República, señalando que Enami no estaba en condiciones de cumplir bien sus tareas como resultado de un elevado endeudamiento que había que resolver. "Con esta solución, Enami no tendrá que sufrir las vicisitudes que ha sufrido y, junto con eso, Codelco integrará Ventanas a su red de fundiciones y fortalecerá su capacidad de procesamiento".

La nueva ley establece que Codelco garantizará que Ventanas mantendrá la capacidad para fundir y refinar, sin restricción ni limitación alguna, la producción de cobre de la pequeña y mediana minería. De este modo, explicó el mandatario, "lo que estamos haciendo es garantizar la existencia de ENAMI como una empresa rentable y eficiente.

RELACIONES HISTÓRICAS DE LA FUNDICIÓN VENTANAS CON CODELCO

Ventanas fue la segunda fundición de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), y la segunda construida por el Estado para procesar el cobre y exportarlo con mayor valor agregado.

Cuando se construyó y entró en operaciones en 1964, la Fundición Paipote era la única instalación del Estado para procesar el cobre y añadirle valor con el trabajo y la inteligencia de operarios, técnicos y profesionales chilenos. Por entonces, la gran minería del cobre y sus fundiciones pertenecían a empresas extranjeras.

Con la puesta en marcha de Ventanas, se fue desarrollando un importante polo de aprendizaje y desarrollo de conocimiento profesional chileno en torno a las fundiciones, una reserva de capital humano que contribuyó posteriormente a superar el desafío nacional que significó la nacionalización de la gran minería del cobre y sus instalaciones.

En Ventanas, con ocasión de la puesta en marcha de la refinería electrolítica, se produjo un aporte de profesionales que llegaron de diferentes fundiciones de la gran minería, posteriormente de propiedad de Codelco.

Asimismo, algunos profesionales y técnicos de Enami aportaron su experiencia a la misión de levantar la producción de los planteles nacionalizados en la década del 70. Al crearse Codelco, algunos profesionales procedentes de Enami pasaron a sus filas, sumándose a la tarea de dirigir y hacer producir faenas como Salvador, Potrerillos, El Teniente, Caletones, Andina y Chuquicamata.

Luego de creada la Corporación, se inició una permanente colaboración e intercambio de profesionales y experiencias entre ambas entidades, dos empresas mineras del Estado con operaciones de gran escala.

Si bien este proceso no fue establecido en parte alguna, en forma natural y dinámica los expertos de diversas especialidades se relacionaron profesionalmente, a la vez que en determinadas situaciones, se produjeron programas de asistencia organizados.

A modo de ejemplo, con la puesta en marcha del Convertidor Teniente en Ventanas, grupos de profesionales de distintas especialidades hicieron pasantía en Caletones - donde fue desarrollado dicho equipo- y posteriormente algunos profesionales de Caletones colaboraron en la puesta en marcha.

Desde el inicio de las operaciones de la Fundición y Refinería Ventanas, se han intercambiado visitas de profesionales, las que continúan hasta la fecha. Ello también ha permitido organizar talleres, seminarios y encuentros sobre temas de interés común, con participación de profesionales de ambas empresas.

En el aspecto productivo, Ventanas ha procesado cobre blister de la División El Teniente en su refinería electrolítica, la única de la zona central de país que permite añadir valor al cobre producido. También se reciben concentrados de la División Andina, para conformar la carga de la fundición como una componente regular de su abastecimiento.

En el ámbito de las personalidades mineras, también son numerosos los casos que han pasado de una a otra empresa, aportando sus conocimientos y experiencia. Nombres como Andrés Zausquevich, que dirigió la construcción de Paipote y fue primer administrador en Ventanas y luego vicepresidente en Codelco, o Hermann Schwarze, creador del Convertidor Teniente en Caletones y luego Director de Operaciones de Enami, son ejemplos de destacadas personalidades del mundo minero que estuvieron en ambas empresas.

A nivel laboral, se solía afirmar que Codelco y Enami son como primos hermanos. Los contactos entre sus organizaciones laborales así lo confirman, pues permanentemente han desarrollado acciones conjuntas, para la defensa del rol del estado en la minería y la vigencia del espíritu que llevó al país a crear ambas empresas, para garantizar que la explotación de la principal riqueza nacional se tradujera en progreso para el país y su población.

ANEXO K

Programación Proyecto Memoria: "Humedal Artificial".

Álvaro Barría A.



Fig. 33

Nota: las tareas deben comenzar lo antes posible, a más tardar en las fechas presupuestadas.

- Para el estudio de factibilidad es necesario hacer una visita al lugar y determinar los recursos disponibles para la construcción de la planta.
- Es necesario, para el diseño, conocer la composición del agua a tratar, es decir, hacer un análisis o ocupar los datos existentes.
- El tiempo pensado para la construcción de la planta puede variar mucho debido a que no tengo conocimiento de los recursos disponibles, de todos modos, estoy seguro de realizar las tareas previas en menos tiempo del presupuestado, lo que nos da un margen de error.
- Durante la puesta en marcha podré determinar el método para la toma de muestras periódicas.