

UCH - FC
Q. Ambiental
V 157
C.2



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**“TRATAMIENTO DE AGUAS CLARAS CON ALTA CONCENTRACIÓN DE
SULFATO MEDIANTE UN HUMEDAL ARTIFICIAL”**

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de los requisitos para optar al Título de:

Químico Ambiental

María Fernanda Valdivieso Bravo



Director de Seminario de Título: M. Cs. Juan Ramón Candia
Profesor Patrocinante: M. Cs. Sylvia Copaja Castillo

Abril de 2009
Santiago - Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el o (la) candidato (a):

MARÍA FERNANDA VALDIVIESO BRAVO

“TRATAMIENTO DE AGUAS CLARAS CON ALTA CONCENTRACIÓN DE SULFATO MEDIANTE UN HUMEDAL ARTIFICIAL”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

M. Cs. Juan Ramón Candía
Director Seminario de Título

M. Cs. Sylvia Copaja Castillo
Profesor Patrocinante

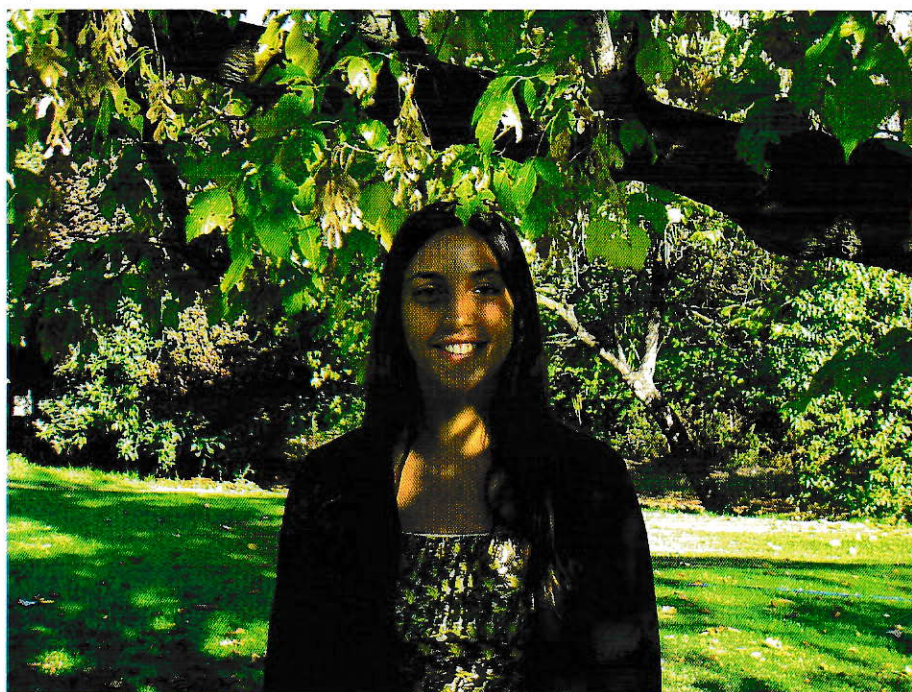
Dra. Marcela Urzúa
Corrector

Dr. Mauricio Isaacs
Corrector

Se muestran tres firmas manuscritas en azul sobre líneas horizontales. La primera firma es la del Director Seminario de Título. La segunda es la del Profesor Patrocinante. La tercera es la de uno de los correctores. A la derecha de las firmas se encuentra un sello circular que dice "FACULTAD DE CIENCIAS BIBLIOTECA CENTRAL U. DE CHILE".

Santiago de Chile, abril de 2009

RESEÑA



Nací en Santiago de Chile, en Septiembre de 1983. Mis padres son Paulina y Jorge y tengo dos hermanos, Sebastián y Paula. Siempre he residido en Santiago y, contrario a lo que opinan la mayoría de sus residentes, me gusta vivir aquí.

A medida que fui creciendo, comencé a tomar conciencia a cerca de los problemas ambientales que nos aquejan y de la gran cantidad de posibilidades que tenemos para evitarlos, aplacarlos o solucionarlos. Así surgió mi interés por prepararme para poder trabajar en ello, por lo que decidí ingresar a la carrera de Química Ambiental.

A lo largo de mi formación profesional logré adquirir los conocimientos y herramientas necesarias para trabajar en pro del cuidado del medio ambiente, lo que me hace inmensamente feliz. Creo que la labor que desempeñamos es importante, necesaria, trascendente. Es también un constante desafío, el que afronto con gusto y entregando lo mejor de mi.

... a mis padres y a Felipe
por su amor y apoyo
durante todo este tiempo.





AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa, agradezco primero que todo a mis padres por su amor y entrega incondicional hacia mis hermanos y a mi. Aunque siempre he sido independiente, en extremo según su opinión, sepan que invariablemente los llevo conmigo y que estoy inmensamente agradecida por todo lo que me han entregado y, en especial, por educarme desde la libertad.

A todo el equipo del programa de Medio Ambiente de Fundación Chile, en particular a Juan Ramón, por darme la posibilidad de realizar mi Seminario de Título y por la confianza depositada en mi. Agradezco a cada una de las personas que conforman el grupo de trabajo, por el apoyo brindado a lo largo del proceso y los buenos momentos dentro y fuera de la oficina.

A mis amigos y compañeros de la Facultad, en especial a Glenda, Romina, Blenda y Victor por los inolvidables momentos compartidos. A todos los profesores de la Facultad de Ciencias por su entrega y buena disposición, en especial al profesor Hugo Sandoval por sus inspiradoras clases y por darme la posibilidad de trabajar y compartir junto a él.

Agradezco finalmente a Felipe y Javiera, mis dos grandes pilares, por estar siempre, siempre, siempre a mi lado.

ÍNDICE DE CONTENIDO



	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes Generales.....	1
1.1.1 El Proceso de Desulfatación.....	4
1.1.2. El Ciclo del Azufre en Sistemas Naturales.....	6
1.1.3. Bacterias Sulfato-reductoras, Responsables de la Reducción Biológica de Sulfato.....	9
1.1.4. Definición de Humedal.....	15
1.1.5. Humedales Artificiales para el Tratamiento del Agua.....	16
1.1.6. Componentes de un Humedal.....	18
1.1.7. Tipos de Humedales Artificiales: Criterios de Diseño y Construcción.....	23
1.2. Antecedentes Específicos.....	28
1.2.1. Diseño del Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Claras.....	28
1.2.1.1 Melaza, Fuente de Carbono Adicionada en Humedal Artificial.....	33
1.3. Hipótesis.....	35
1.4. Objetivos.....	35
1.4.1. Objetivos Generales.....	35
1.4.2. Objetivos Específicos.....	35



	Página
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
2.1. Primera Etapa, Monitoreo Preliminar.....	37
2.2. Segunda Etapa, Adición de Melaza.....	38
2.2.1 Medición de pH.....	39
2.2.2 Medición de Conductividad Eléctrica.....	40
2.2.3 Medición de Oxígeno Disuelto.....	42
2.3.4 Medición de Sulfato.....	43
2.3. Tercera Etapa, Prueba a Escala Banco.....	45
2.3.1. Diseño de Prueba.....	45
2.3.2. Montaje Columna de Prueba.....	50
2.3.3 Monitoreo Prueba a Escala Banco.....	59
2.3.3.1 Medición de Potencial Oxido-Reducción.....	60
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
3.1. Primera Etapa, Monitoreo Preliminar.....	62
3.2. Segunda Etapa, Adición de Melaza: Intento Fallido.....	70
3.3. Prueba a Escala Banco.....	86
IV. CONCLUSIONES.....	95
V. REFERENCIAS.....	99

ANEXOS

ANEXO 1: Cálculo de Volumen de RIL a Preparar para Prueba a Escala Banco

ANEXO 2: Cálculo de Cantidad de Melaza a Adicionar en Prueba Escala Banco

ANEXO 3: Cálculo de Evapotranspiración Zona de Emplazamiento Humedal Piloto





ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Efectividad general de tratamientos de agua para la remoción de sulfato....	5
Tabla 2 Algunos tipos de bacterias reductoras de sulfato.....	11
Tabla 3 Resultado análisis químico de agua clara.....	29
Tabla 4 Algunos parámetros de diseño del humedal artificial.....	32
Tabla 5 Composición porcentual de melaza.....	34
Tabla 6 Ciclos de operación para monitoreo segunda etapa.....	37
Tabla 7 Cantidades de melaza, RIL y semanas de operación de cada uno de los ensayos de prueba a escala banco.....	54
Tabla 8 Compuestos utilizados para preparar RIL.....	56
Tabla 9 Caudales de ingreso primera etapa.....	62
Tabla 10 Resultados primera etapa.....	63
Tabla 11 Caudales de ingreso y salida segunda etapa.....	72
Tabla 12 Evapotranspiración calculada.....	73
Tabla 13 Caudales de ingreso calculados.....	74
Tabla 14 Resultados segunda etapa.....	75
Tabla 15 Resultados primer ciclo de operación prueba a escala banco.....	87
Tabla 16 Resultados segundo ciclo de operación prueba a escala banco.....	88
Tabla 17 Resultados tercer ciclo de operación prueba a escala banco.....	90
Tabla 18 Temperatura media mensual Santiago, año 2003.....	108
Tabla 19 Índices de calor mensual (i).....	108
Tabla 20 Valores de ETP <small>sin corregir</small>	109
Tabla 21 Número máx. horas de sol (Doorenbos y Pruitt, 1977).....	110
Tabla 22 Número máx. horas de sol a 33° L Sur.....	110
Tabla 23 Valores ETP mensual zona de emplazamiento.....	111
Tabla 24 Valores ETP mensual del humedal artificial.....	112

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES



Página

Figura 1	Ciclo biogeoquímico del azufre.....	7
Figura 2	Reducción del sulfato por parte de bacterias sulfato-reductoras a partir de utilización de lactato.....	12
Figura 3	Esquema humedal artificial a escala piloto.....	31
Figura 4	Esquema horizontal humedal artificial a escala piloto.....	31
Figura 5	Fotografías humedal artificial a escala piloto.....	32
Figura 6	Melaza empleada en humedal artificial.....	33
Figura 7	Esquema simplificado de celda 1.....	47
Figura 8	Esquema columna de prueba a escala banco.....	48
Figura 9	Secuencia de armado columna de prueba a escala banco.....	51
Figura 10	Materiales utilizados para armar columna de prueba a escala banco.....	52
Figura 11	Columna prueba escala banco armada.....	58
Figura 12	Gráfico medición 25-05-07.....	63
Figura 13	Gráfico medición 01-06-07.....	64
Figura 14	Gráfico medición 08-06-07.....	66
Figura 15	Gráfico medición 13-09-07.....	67
Figura 16	Gráfico tendencias promedio primera etapa.....	68
Figura 17	Paneles solares y estanque de melaza.....	70
Figura 18	Labores de limpieza de humedal artificial.....	71
Figura 19	Medición día 23-01-08.....	76
Figura 20	Medición día 04-02-08.....	77
Figura 21	Medición día 15-02-08.....	78
Figura 22	Medición día 25-02-08.....	79
Figura 23	Medición día 07-03-08.....	80
Figura 24	Medición día 20-03-08.....	81
Figura 25	Medición día 11-04-08.....	82
Figura 26	Gráficos tendencias promedio segunda etapa.....	83

Figura 27	Transplante de plantas celda 1 a 2 día 18-12-07.....	86
Figura 28	Gráfico primer ciclo de operación prueba a escala banco.....	87
Figura 29	Gráfico segundo ciclo de operación prueba a escala banco.....	89
Figura 30	Gráfico tercer ciclo de operación prueba a escala banco.....	91
Figura 31	Gráfico tendencia de reducción de sulfato en prueba a escala banco.....	93



RESUMEN

La minería del cobre genera una gran cantidad de residuos, entre los que se encuentran las “aguas claras”. Debido al gran volumen de aguas claras que se genera, es necesario su reciclaje para minimizar el consumo de agua fresca y a la vez reducir los riesgos de percolación y el traslado de contaminantes.

Las aguas claras se caracterizan por poseer un alto contenido de sulfato, el cual puede ser removido por medio de técnicas convencionales que suponen un enorme costo económico y de operación, por lo que se hacen necesarios métodos alternativos de tratamiento. Uno de éstos lo constituyen los humedales artificiales, que son un tipo tratamiento pasivo basado en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, en donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas.

En el caso del sulfato, el proceso biológico de remoción se basa en la reducción electroquímica del compuesto, mediada por bacterias sulfato-reductoras. Éstas se desarrollan naturalmente en ambientes anaeróbicos ricos en sulfato y materia orgánica biodegradable. Bajo estas consideraciones se construyó un sistema de tratamiento pasivo tipo humedal artificial a escala piloto para la remediación de aguas claras ricas en sulfato provenientes de una compañía minera nacional. El diseño del sistema contempla dos celdas para generar un tratamiento anaeróbico–aeróbico.

El objetivo de este trabajo es probar y optimizar el humedal artificial, para así determinar la eficacia de remoción de sulfato del sistema, de modo que el efluente pueda ser utilizado para riego. Para lograr lo anterior, se puso en marcha un plan monitoreo. En el transcurso del mismo, el sistema se obstruyó constantemente por la alta carga de sólidos del agua clara a tratar. La obstrucción impidió el ingreso de RIL al sistema, por lo que no fue posible realizar el monitoreo tal como se proyectó.

Luego de aproximadamente diez meses de monitoreo fallido, se decidió montar una prueba a escala banco que permita determinar la eficacia del sistema. Como en la primera celda es donde se lleva a cabo la reducción del sulfato, es esta la celda replicada y puesta a prueba.

Mediante la prueba a escala banco fue posible determinar que existe una correlación positiva entre la cantidad de melaza adicionada y la proporción en que se reduce el sulfato, sin embargo no se pudo comprobar que el sistema sea capaz de reducir sulfato hasta el valor requerido (250 mg/L, valor normado), por tanto el objetivo planteado se cumplió parcialmente.

ABSTRACT

The mining industry of the copper generates a great quantity of residues, between which they find the "decant waters" or "mining water". Due to the great volume of decant waters that is generated, is necessary its recycling to minimize the consumption of fresh water and simultaneously to reduce the risks of leaching and pollutants' movement.

The mining water are characterized for possessing a high contained of sulfate, which can be removed by means of conventional technologies that suppose an enormous economic cost and of operation, for what they are necessary alternative methods of treatment. One of these it is constituted by the constructed wetlands, which are a type passive treatment based on the same physical, chemical and biological processes that take place in the natural wetlands, where there are modified favorably certain characteristics of the contaminated waters.

In case of the sulfate, the biological process of removal is based on the electrochemistry reduction of the compound, mediated by sulfate-reducing bacteria. These develop naturally in environments anaerobic rich in sulfate and organic biodegradable matter. Under these considerations, there was constructed a system of passive treatment type constructed wetland in pilot scale for the remediation of decant waters rich in sulfate, proveniences of a mining national company. The design of the system contemplates two cells to generate an aerobic-anaerobic treatment.

The aim of this work is to try and to optimize the constructed wetland, this way to determine the efficiency of removal of sulfate of the system, so that the effluent one could be used for irrigation. To achieve the previous thing, a plan started monitoring. In the course of the same one, the system was obstructed constant by the high load of solid of the decant water to treating. The obstruction prevented effluent revenue to the system, for what it was not possible to realize the monitoring as it was projected.

After approximately ten months of unsuccessful monitoring, it was decided to mount a test to scale bank that allows determining the efficiency of the system. Since in the first cell it is where the reduction of the sulfate is carried out, there is this the cell answered and put to test.

By means of the test to scale bank was possible to determine that exists a positive correlation between the quantity of added molass and the proportion in which the sulfate is reduced, nevertheless it was not possible to verify that the system is capable of reducing sulfate up to the value needed (250 mg/L, value of the norm), therefore the raised aim could be fulfilled only partly.

A series of recommendations propose for the possible implementation of the system to great scale, though previous his(its) construction it is necessary to realize a series of studies that allow to guarantee the efficiency of the treatment.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes Generales

Se denomina relave al material de descarte proveniente del proceso de concentración de minerales, el cual es dispuesto en los denominados depósitos o tranques de relaves. En éstos se realiza el proceso de separación sólido/líquido, donde los sólidos contenidos en la pulpa del relave decantan y se separan de los líquidos, los cuales son finalmente descargados como “aguas claras”. (CONAMA, 2004)

El relave está conformado por una mezcla alcalina de sólidos en suspensión cuyos componentes solubles principales son los aniones sulfatos (SO_4^{2-}), molibdatos (MoO_4^{2-}) y el catión calcio (Ca^{+2}), que sedimenta en los depósitos de disposición final. Debido a la alcalinidad de esta mezcla ($\text{pH} = 8 - 11$) es posible asegurar que el resto de elementos y metales pesados que pudiesen estar presentes en estos relaves se encuentran precipitados y coprecipitados. (Delpiano, 1998)

Para el caso chileno la generación de relaves está asociada principalmente al proceso de concentración de sulfuros de cobre, proceso en el cuál se generan en promedio 28 toneladas de relaves por cada tonelada de concentrado de cobre producido. Dado que las aguas claras constituyen aproximadamente el 50% en peso del relave, el volumen de aguas claras generado es considerable. (Andia & Lagos, 2001)

Por esta razón, el reciclaje de las aguas claras es deseable, ya que permite minimizar el consumo de agua fresca y a la vez reducir los riesgos de percolación de estas aguas y el traslado de contaminantes hacia cuerpos de agua superficiales y/o subterráneos.

Una alta concentración de sulfato en agua potable tiene un efecto laxativo cuando se combina con calcio y magnesio, le provee un sabor amargo o medicinal desagradable y también puede corroer tuberías, particularmente las de cobre. En el caso del agua para riego, el sulfato contribuye a la salinidad, conductividad y sólidos disueltos (British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks, 2000).

Por estas razones, en Chile la concentración de sulfato esta normada en distintos cuerpos legales, entre los que se encuentra la NCh 1333.Of78, que regula la calidad de agua para diferentes usos, uno de los cuales es el riego. Para este uso el máximo nivel de concentración fijado corresponde a 250 mg/L. Las aguas claras contienen una carga en sulfatos muy superior a la cifra citada.

El tratamiento del sulfato se realiza principalmente mediante tres tipos de técnicas convencionales; la ósmosis inversa, la destilación y el intercambio iónico, las cuales suponen un enorme costo económico y de operación. Por lo mismo han surgido como alternativa los métodos de tratamientos pasivos, que deben su nombre al hecho de que no necesitan la intervención humana constante.

Dentro de los métodos de tratamiento pasivo se encuentran los humedales artificiales, los que se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, en donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas. Los humedales artificiales se caracterizan por su bajo costo de construcción, fácil operación, y mantenimiento y buena eficiencia en el tratamiento de aguas contaminadas, por lo que constituyen un método de tratamiento muy ventajoso. (López y col, 2002).

La experiencia internacional respecto al uso de los humedales artificiales es positiva, estos han sido utilizados en distintas partes del mundo, para remover diversos contaminantes, obteniéndose buenos resultados. Entre los países que han utilizado esta técnica se encuentran: Estados Unidos, Canadá, Australia y algunos países de Europa, entre otros. (Cole, 1998)

El diseño de un humedal artificial y las especies vegetales que se utilizarán en él, dependen exclusivamente de las características químicas y mineralógicas del efluente. En el caso de efluentes con altas concentraciones de sulfato, como las aguas claras, el proceso de remoción se basa en la reducción electroquímica del sulfato, mediada por bacterias sulfato-reductoras, por lo que el diseño del humedal artificial debe favorecer la ocurrencia de este proceso.

El efluente con el que se trabajó corresponde a aguas claras ricas en sulfato provenientes del tranque de relave de una compañía minera nacional. El propósito es

hacer pasar el efluente por un humedal artificial para que el agua tratada pueda ser utilizada para riego. Para esto, primero se probará el sistema a escala piloto, de modo de reunir los antecedentes necesarios para la posible implementación a gran escala.

1.1.1. El Proceso de Desulfatación

La remoción del sulfato (SO_4^{2-}) puede realizarse tanto química como biológicamente. La desulfatación química consiste fundamentalmente en la reacción del anión sulfato presente en el seno de la solución y su transformación a otra especie, como sulfuro (S^{2-}) y/o sulfito (SO_3^{2-}). Entre los procesos de desulfatación química se pueden citar la coagulación y sedimentación, intercambio iónico, procesos a través de membranas y procesos de adsorción, los cuales suelen ser efectivos en la remoción del sulfato, pero suponen un enorme costo económico inicial y de operación. En la Tabla 1 se resumen los procesos de desulfatación de aguas comúnmente utilizados, donde se detallan los porcentajes de remoción de la especie SO_4^{2-} . (Duarte, 1992)

Tabla 1: Efectividad general de tratamientos de agua para la remoción de sulfato.

Procesos		Eficiencia (% remoción)
Aireación y agitación de sólidos		0 -20
Coagulación, sedimentación, filtración		0 -20
Intercambio Iónico	Aniónico	60 -100
	Catiónico	0 -20
Ablandamiento con Cal		0 -20
Oxidación química y desinfección		0 -20
Adsorción	Carbón activado (granulado)	0- 20
	Carbón activado (polvo)	0 -20
	Alúmina activada	60 - 100
Filtración con membranas	Ósmosis inversa	100
	Ultrafiltración	0 - 20
	Electrodialisis	100

El proceso de desulfatación biológica consiste en la remoción de las formas oxidadas del azufre, como el sulfato, presentes en solución, mediante un proceso biológico de reducción electroquímica anaeróbica, realizado por bacterias sulfato-reductoras, las cuales son capaces de utilizar el sulfato como aceptor terminal de electrones en sus procesos metabólicos. El sulfato es así reducido, y como producto de esta reducción se generan sulfuros metálicos y de hidrógeno. (Duarte, 1992)

1.1.2. Ciclo del Azufre en Sistemas Naturales

Las transformaciones del azufre en su ciclo ambiental natural (atmósfera, ríos, lagos) son de óxido-reducción y pueden ocurrir por medio de diversos procesos químicos y biológicos (Manahan, 1991), entre los que se encuentran (ver Figura 1):

- Oxidación biológica de azufre a sulfatos por microorganismos oxidadores de hierro y/o azufre
- Reducción biológica de sulfatos para la incorporación del azufre necesario para la síntesis molecular (reducción asimilatoria)
- Reducción anaeróbica de sulfatos por microorganismos sulfato-reductores que utilizan al sulfato como último aceptor de electrones en su oxidación de sustratos orgánicos (reducción desasimilatoria)
- Oxidación atmosférica de los anhídridos sulfurosos, con producción de lluvias ácidas por ácido sulfúrico.

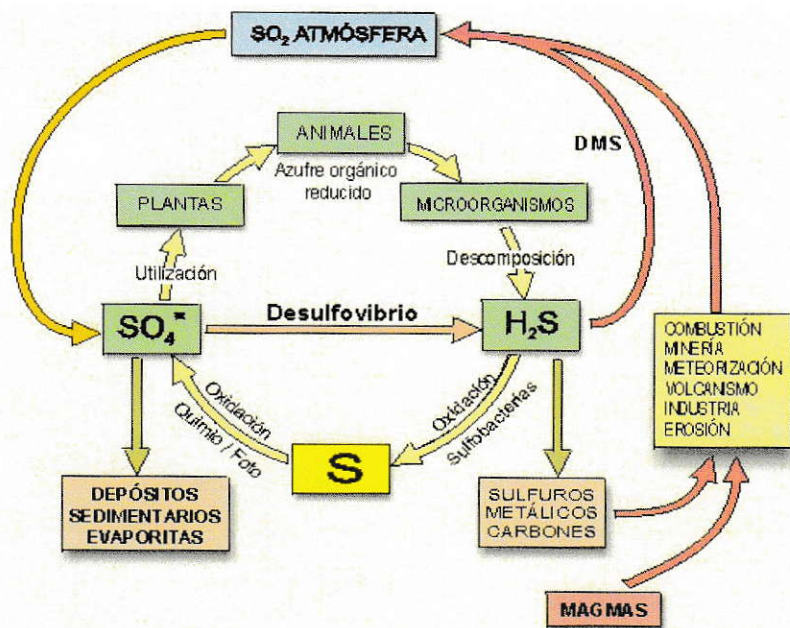


Figura 1: Ciclo biogeoquímico del azufre

La bioreducción del sulfato en lagos, ríos, estuarios y océanos ocurre en las profundidades y, principalmente, en los lodos anóxicos de las riberas, donde no existe oxígeno disuelto, produciéndose sulfuros (Herrera y col, 1991; Manahan., 1991; Barnes y col, 1991).

Parte de los sulfuros generados forman compuestos insolubles con los metales presentes en el agua, cuya decantación está asociada al fondo del sistema líquido. De este modo parte del azufre queda retenido como sulfuro en los sedimentos, pudiendo solubilizarse según las condiciones imperantes. Por otra parte, el sulfuro de hidrógeno producido como gas, sube hacia la región aeróbica, donde alguna parte de él es

nuevamente oxidado a sulfato por acción de bacterias oxidadoras y algas microscópicas.
(Duarte, 1992)

Las velocidades de reacción no están esclarecidas del todo en los ecosistemas, pero existe una fuerte dependencia de las mismas con las estaciones climáticas anuales. De esta manera se establece un ciclo natural del azufre en los ecosistema líquidos, permaneciendo constante la concentración de azufre en los mismos, y aumentando en el caso de que reciban descargas con compuestos sulfurados o disminuyendo si se escapa a la atmósfera como gas. Aún así, el sulfuro de hidrógeno gaseoso se convierte a dióxido de azufre por radiación solar y de allí vuelve a sulfato mediante la lluvia ácida (Manahan, 1991) (Figura 1).

Se estima que tan solo el 0,01% del azufre del globo terrestre está presente en la biosfera, mientras que todo el resto está en la litósfera y en el magma. Este último es liberado a por medio de erupciones volcánicas y/o por faenas extractivas. En la medida que estas últimas continúen y se aceleren, la fracción de azufre en la biosfera podría aumentar y este cambio de la concentración podría tener consecuencias que aún no son predecibles. (Trudinger, 1985)

1.1.3. Bacterias Sulfato-reductoras, Responsables de la Reducción Biológica del Sulfato

Las bacterias reductoras de sulfato son un grupo de microorganismos procariontes capaces de utilizar sulfato como aceptor final en cadenas de transporte de electrones. Son probablemente una de las formas más antiguas de la vida bacteriana en la tierra. Sus actividades se han trazado por fraccionamiento de isótopos de azufre en rocas y minerales reportándose su presencia desde hace ya tres billones de años (Pfenning y col, 1978)

Son anaerobios estrictos, incapaces de crecer con oxígeno como aceptor de electrones y su desarrollo es siempre inhibido por éste. Se ha reportado su tolerancia al oxígeno, pero no son capaces de reducir sulfato, sino solamente de sobrevivir. (Duarte, 1992)

Las bacterias sulfato reductoras se encuentran prácticamente en cualquier ambiente anaeróbico en donde haya crecimiento bacteriano, materia orgánica biodegradable, presencia de sulfato (Duarte, 1992) y potencial redox bajo, de aproximadamente 0 a -100 mV (Gibson, 1990).

Debido a su alta y casi inextinguible fuente de sulfato, los sedimentos marinos, pantanosos y de estuario, así como aquellos de lagos salinos e hipersalinos, ciertamente

constituyen los ambientes más significativos y permanentes donde se desarrollan estas bacterias en la naturaleza. (Duarte, 1992)

En relación al pH, las bacterias reductoras de sulfato crecen mejor bajo condiciones levemente alcalinas, en un rango relativamente estrecho de pH (entre 7,0 y 7,8). Sin embargo, se han encontrado bacterias con capacidad de tolerar ambientes levemente ácidos (pH 4,0) así como también especies con capacidad de desarrollarse en ambientes alcalinos (pH 9,5) (Barton & Tomei, 1995).

La gran mayoría de las bacterias sulfato-reductoras son quimioheterótrofas, es decir, utilizan un compuesto químico como fuente de carbono y, a su vez, este mismo compuesto es la fuente de energía, por lo tanto utilizan la materia orgánica disuelta en el agua como fuente de carbono y de electrones (Gibson, 1990). A partir de constituyentes orgánicos simples, como lactato, acetato, piruvato, etanol, propanol, glucosa, entre otros, generados por la fermentación anaeróbica de las moléculas orgánicas complejas, obtienen la energía necesaria para sobrevivir. Así, las bacterias sulfato reductoras continúan el proceso de degradación de la materia orgánica en ambientes anaeróbicos.

Se han dividido en dos grupos fisiológicos: bacterias oxidantes de acetato y las bacterias no-oxidantes de acetato (Parés & Juárez, 1997). Alguno de los géneros que constituyen ambos grupos se muestran a continuación.

Tabla 2: Algunos tipos de bacterias reductoras de sulfato

Grupo I: oxidan acetato	Grupo II: no oxidan acetato
Desulfovibrio	Desulfobacter
Desulfomicrobium	Dsulfobacterium
Desulfobotulus	Desulfococcus
Desulfotomaculum	Dseufonema
Archaeoglobus	Desulfosarcina
Desulfobulbus	Desulfoarcufus
Thermodesulfobacterium	

En el proceso de respiración las bacterias reductoras de sulfato oxidan los sustratos carbonados simples y la regeneración del poder oxidante se efectúa por transporte de electrones a través de una cadena de citocromos hacia un oxidante exterior, que en este caso es el sulfato. Producto de lo anterior el sulfato es reducido, formando sulfuro. En la Figura 2 se esquematiza este proceso para el caso en que la fuente de carbono utilizada por las bacterias sea lactato.

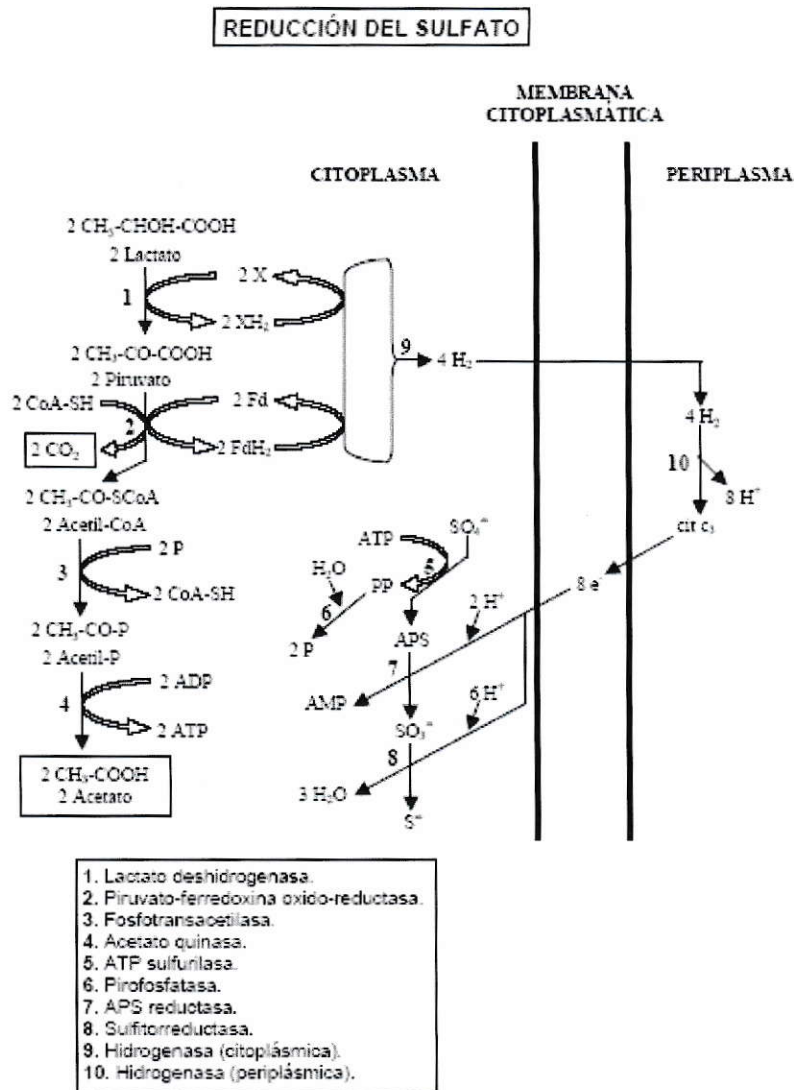
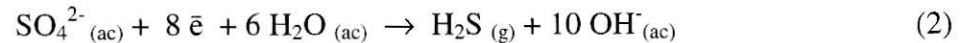
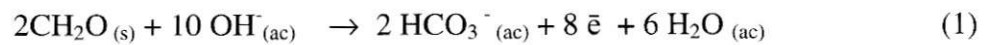


Figura 2: Reducción del sulfato por parte de bacterias sulfato-reductoras a partir de utilización de lactato

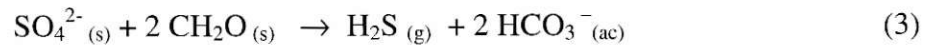
De este modo las bacterias sulfato-reductoras utilizan al sulfato como último aceptor de electrones en la oxidación anaeróbica de sustratos orgánicos simples, es decir, lo emplean como oxidante para la degradación de la fuente orgánica de carbono

(Postgate, 1956). Este proceso es denominado reducción desasimilatoria de sulfatos, dado que el sulfuro producido en la reducción, no es incorporado a la biomasa bacteriana.

Las semi-reacciones involucradas en la oxidación de la materia orgánica y la reducción del sulfato, son las siguientes (para medio básico):



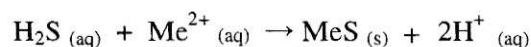
La estequiometría de la reacción total esta dada por la suma de las semi-reacciones, obteniéndose:



Donde CH_2O representa la fuente de materia orgánica (M.O). La correcta estequiometría de la reacción dependerá del compuesto orgánico involucrado.

Cabe destacar que si el pH es superior a 7 se formará sulfidrilo (HS^-) a partir de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y si el pH es inferior a 7 predominará dióxido de carbono (CO_2) por sobre bicarbonato (HCO_3^-).

Además, si en el agua están disueltos cationes metálicos divalentes, éstos precipitarán como sulfuros del metal, de acuerdo a la siguiente reacción (Ordóñez y col, 1998):



(4)

Me^{2+} = Metal (II) = Pb^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Al^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , entre otros.

Aunque la reacción (3) es termodinámicamente posible sin la intervención de bacterias, la proporción en que procedería sería insignificante sin la presencia de éstas. De hecho, Las bacterias no oxidan o reducen, solamente median la reacción o, más concretamente, la transferencia de electrones (Duarte, 1992).

Como consecuencia de la reducción de sulfatos, las bacterias sulfato-reductoras producen y acumulan grandes cantidades de sulfuro y participan en la producción y transformación de depósitos minerales en la naturaleza. Hábitat terrestres y marinos donde existe una alta actividad de estas bacterias son fácilmente distinguibles por el olor del ácido sulfhídrico y el ennegrecimiento de las aguas debido a la precipitación de sulfuros metálicos de hierro, magnesio y manganeso (Duarte, 1992).

1.1.4. Definición de Humedal

El concepto de "humedal" abarca un amplio mosaico de ecosistemas interiores y costeros marinos con ciertas características comunes. La definición de humedal más utilizada en el área científica es la presentada en la Convención Ramsar que define a los humedales como: "Extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina, cuya profundidad de marea no exceda los 6 metros " (Convención Ramsar, 1971).

Resulta interesante mencionar también la definición de Lahora, quien los describe como: "Medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurador" (Lahora, 1999). Esta definición afirma la posibilidad de simular estos ecosistemas, imitando y perfeccionando los procesos que en ellos ocurren, para lograr el beneficio de la remediación de aguas.

Los humedales artificiales, varían de acuerdo a la finalidad para la cual son construidos, que puede ir desde recuperación de zonas húmedas hasta la depuración de aguas. La construcción de humedales para la depuración de aguas se basa tanto en parámetros físico-químicos como biológicos, dentro de los cuales son de gran importancia el tamaño, tiempo de residencia, plantas, sustratos y microorganismos

presentes (Seoáñez, 1999). Además, se debe considerar que, para que el tratamiento sea óptimo, el control sobre todos sus componentes es de suma importancia, ya que la remoción de contaminantes, en lo posible, se realiza sin intervención mecánica ni eléctrica, debido a lo cual se consideran sistemas de tratamiento pasivo.

1.1.5. Humedales Artificiales para el Tratamiento del Agua

La idea de utilizar humedales para el tratamiento del agua, surgió al observar que la calidad de los drenajes mejoraba cuando atravesaban turberas naturales, sin ocasionar deterioros ni efectos ecológicos adversos (Pérez, 2000). Desde hace varios años ya, diversos y abundantes estudios respaldan que los humedales son depuradores naturales de aguas residuales. Por esta condición, históricamente han existido experiencias de vertido de aguas residuales a humedales naturales, aunque este sistema sólo debe usarse en casos excepcionales para evitar caer en una utilización sin control de estos lugares como vertederos de escombros y aguas residuales. (Lahora 1999)

Esto último se debe a que, evidentemente, se puede ver afectado el valor ecológico del humedal, y a que la capacidad depuradora de éstos tiene un límite, que si se excede, no sólo implica el cese de la eliminación de sustancias, sino que también, la inversión del mecanismo (Kadlec, 1983; Richardson, 1985). Para evitarlo se debe determinar con anterioridad la capacidad a largo plazo de soportar esta función.

Así, para que los humedales sean un complemento de las plantas depuradoras, se debe poner énfasis en la conservación de humedales naturales (Gopal, 1999), y considerar la construcción de humedales artificiales como una imitación mejorada del sistema natural (Lahora, 1999), que permite el proceso en un recinto cerrado e impermeable, con ubicación, sustrato, flujo y vegetación óptimos, y siendo posible cuantificar la depuración (Pérez y col, 2000), ya que a diferencia del humedal natural, las entradas y salidas de agua son controladas .

El tratamiento de agua residual mediante humedales artificiales, es entonces una tecnología natural y biológica (Pérez y col, 2000), que presta un excelente servicio ambiental y contribuye a la conservación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Su objetivo es remover la mayor cantidad posible de contaminantes del agua residual a través de mecanismos de depuración que actúan en los humedales, considerándose también como un reactor biológico tipo "proceso biopelícula sumergida", con aireación natural, en el que las plantas emergentes toman oxígeno de su parte aérea para introducirlo en su parte sumergida a través de los rizomas, creando un mosaico de zonas aeróbicas y anaeróbicas próximas entre sí, que favorecen los procesos de descomposición, precipitación y eliminación de sustancias. (Lahora, 1999)

1.1.6. Componentes de un Humedal

Los humedales artificiales consisten en el correcto diseño de una celda o piscina que contiene agua, substrato, y la mayoría normalmente, plantas emergentes. Estos componentes pueden manipularse para construir un humedal artificial. Otros componentes importantes de los humedales, como las comunidades de microbios y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente. (USEPA, 2000)

- **El Agua**

Es probable que se formen humedales en donde se acumule una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del suelo relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el subsuelo. Estas condiciones pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte, modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar agua y sellando la piscina para retenerla (USEPA, 2000).

La hidrología es el factor de diseño más importante, porque reúne todas las funciones del humedal artificial y es a menudo el factor que determina el éxito o fracaso de la construcción. Algunas de las características o consideraciones que se deben tener presentes en relación a la hidrología de un humedal construido se señalan a continuación (USEPA, 2000):

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas, y segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

- **Substratos, Sedimentos y Restos de Vegetación**

Los substratos en los humedales artificiales incluyen materiales como suelo, arena, grava, roca, y elementos orgánicos. Sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad ecológica, típica de estos sistemas. El substrato, sedimentos, y los restos de vegetación son importantes por varias razones (USEPA, 2000):

- Son el soporte de muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del substrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del substrato.

- El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. En esta última se producen procesos de intercambio de compuestos y elementos, se fijan microorganismos, y es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

Las características físicas y químicas del suelo y otros sustratos se alteran cuando se inundan. En un sustrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un sustrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales (USEPA, 2000).

▪ **Vegetación**

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Los tallos, raíces, y rizomas permiten la penetración del oxígeno al medio de apoyo, de manera más profunda de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. Lo más importante en los humedales aeróbicos es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre (USEPA, 2000).

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras (USEPA, 2000):

- Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.
- Permiten que el agua circule lentamente y que los materiales suspendidos se depositen en ellas.
- Absorben el carbono, nutrientes, y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras sub-superficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del substrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales incluyen espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna. Cuando se diseñan sistemas que específicamente buscan un incremento en los valores del hábitat, además de conseguir el tratamiento del agua residual, usualmente incluyen una gran variedad de plantas, especialmente para proporcionar alimentación y nido a las aves y otras formas de vida acuática (USEPA, 2000).

- **Microorganismos**

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos, y protozoos. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes (USEPA, 2000).

La actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera el potencial redox del substrato alterando la capacidad de tratamiento del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Algunas transformaciones microbianas son aeróbicas (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaeróbicas (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre). Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales (USEPA, 2000).

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las

condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y puede permanecer en este estado durante años (USEPA, 2000).

- **Animales**

Los humedales construidos proveen un hábitat para una gran diversidad de invertebrados y vertebrados (USEPA, 2000).

Los animales invertebrados, como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentando el detritus y consumiendo materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significativas de materia durante sus fases larvales. Los invertebrados también tienen varios papeles ecológicos; por ejemplo, las ninfas de la libélula son rapaces importantes de larvas de mosquito (USEPA, 2000).

Aunque los invertebrados son los animales más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas, pájaros, y mamíferos (USEPA, 2000).

1.1.7. Tipos de Humedales Artificiales: Criterios de Diseño y Construcción

Existen tres tipos básicos de humedales artificiales de base biológica, los de flujo superficial (aeróbicos), los de flujo sub-superficial (anaeróbicos o balsas orgánicas) y

los sistemas mixtos, que incorporan a los humedales superficiales y sub-superficiales. Los humedales artificiales pueden ser combinados también con tecnologías de tratamiento convencionales. (USEPA, 2001)

Los humedales aeróbicos favorecen el contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico mediante el empleo de plantas acuáticas que liberan oxígeno por sus raíces y rizomas. Para que la vegetación emergente actúe de este modo el flujo del agua debe ser superficial. En el caso de los anaeróbicos el flujo de agua debe ser sub-superficial para favorecer las condiciones anóxicas. (USEPA, 2001)

Los principales factores que deben tenerse en cuenta en el diseño y construcción de un humedal artificial, son los siguientes (USEPA, 2001):

- **Tamaño**

La superficie necesaria para lograr un nivel de tratamiento adecuado es función del caudal y la composición química de las aguas a tratar. La regla más simple a seguir en la construcción de un humedal artificial es que cuanto más grande sea, mejor, ya que cuanto mayor sea su superficie, mayor tiempo de residencia (tiempo que permanece el agua en el interior del humedal) se consigue. Sin embargo, hoy en día se determina el tamaño mínimo necesario para que el humedal resulte efectivo, de modo de abaratar costos y reducir el espacio, que suele ser escaso. Con este objetivo se han establecido diversos criterios de dimensionamiento, todos ellos obtenidos de forma empírica. Unos

están referidos a tasas de eliminación del contaminante y otros reflejan simplemente la superficie del humedal necesaria por unidad de caudal (USEPA, 2001).

En el caso de los humedales aeróbicos, el criterio de dimensionamiento basado en el caudal, es sólo aplicable a aguas con pH > 4 y contenido moderado en hierro y otros metales. En este caso se ha determinado que por cada L/min de agua contaminada que ingresa, el humedal debe poseer un área de 5 a 15 m² (USEPA, 2001).

En el caso de los humedales anaeróbicos se ha establecido experimentalmente que la eficacia del tratamiento se incrementa de forma directamente proporcional al tiempo de residencia, hasta un límite de tiempo que se sitúa en torno a las 12-14 horas, a partir del cual la calidad del agua no cambia de forma apreciable. La formula de cálculo utilizada es la siguiente (USEPA, 2001):

$$\text{Vol. h (m}^3\text{)} = Q \text{ (m}^3\text{/h)} * \frac{t_r \text{ (12-14 h)}}{\text{vol poros}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

Vol h = volumen humedal

Q = caudal de entrada

tr = tiempo de residencia

vol poros = volumen poros del sustrato

- **Forma o Configuración**

La forma o configuración debe asegurar que el agua circule a baja velocidad para hacer efectivo el tiempo de residencia. En el caso de los aeróbicos, el agua debe circular preferentemente por la superficie para maximizar la superficie de contacto de la lámina de agua con el aire, y así favorecer la entrada de oxígeno por difusión. En el caso de los anaeróbicos, se debe favorecer el contacto del agua con el sustrato en la zona anaerobia, con diseños que minimicen el riesgo de cortocircuitos hidráulicos y el encauzamiento por caminos preferentes (USEPA, 2001).

- **Distribución del Caudal de Entrada**

El agua de entrada debe quedar repartida por todo el ancho del humedal, por lo cual no es conveniente realizar la descarga en un sólo punto. De esta forma se evita la canalización del agua y se favorece que ésta discurra homogéneamente por toda la superficie (USEPA, 2001).

- **Profundidad del Agua**

En el caso de humedales aeróbicos, la altura de la lámina de agua por encima del sustrato aportado no debe superar los 15 cm., para evitar la aparición de zonas reductoras y crear condiciones adecuadas para el arraigo y desarrollo de las plantas. En

la mayoría de los diseños realizados hasta el momento la profundidad del agua se sitúa entre 5 y 10 cm., para los anaeróbicos la profundidad debe ser superior a estos valores (USEPA, 2001).

- **Sustrato**

En el caso de los aeróbicos, el espesor del sustrato en la mayoría de los humedales construidos hasta el momento es de 15-20 cm, prácticamente el mínimo imprescindible para que las plantas puedan arraigar. Incluso en algunas se ha plantado directamente sobre el terreno natural del fondo de la excavación. En el caso de las anaeróbicos, el espesor del sustrato orgánico en la mayoría de los humedales construidos hasta el momento, oscila entre 30 y 45 cm. Para éstos, se utilizan materiales orgánicos que aseguran una liberación lenta del carbono, para prolongar al máximo la reserva de nutrientes. Además para favorecer la circulación sub-superficial del agua, se debe utilizar en el relleno una mezcla de materiales que asegure buenas condiciones de permeabilidad y que minimice el riesgo de apelmazamiento, lo que induciría a la circulación laminar del agua sobre el relleno (USEPA, 2001).

- **Vegetación**

La especie más utilizada y que mejores resultados ha dado hasta el momento es el carrizo (*Thypha latifolia*, *T. angustifolia*). En combinación con ella pueden utilizarse otras plantas palustres emergentes, como espadañas (*Phragmites australis*),

diversos tipos de juncos (*Juncus effusus*, *Juncus sp.*, *Scirpus holoschoenus*, *S. lacustris*) y el falso lirio (*Iris pseudocorus*) (USEPA, 2001).

Para la plantación pueden utilizarse fragmentos de rizoma de vivero u obtenidos directamente del campo, separados entre 0,3 y 0,5 m. No es necesario utilizar mayor densidad de plantación ya que estas especies se regeneran muy rápidamente, y en una o dos estaciones se logra una cubierta de prácticamente el 100% de la superficie del humedal (USEPA, 2001).

1.2. Antecedentes Específicos

Como se mencionó en párrafos anteriores, el diseño de un humedal artificial y las especies vegetales que se utilizarán en él, dependen exclusivamente de las características químicas y mineralógicas del efluente

1.2.1 Diseño del Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Claras

A continuación se presenta la concentración de diversos parámetros analizados en las aguas claras con las que se trabaja.

Tabla 3: Resultado análisis químico de agua clara

Parámetro ¹	Valor ²	Unidad	Parámetro ¹	Valor ²	Unidad
As	0,0025	mg/L	Zn	0,01	mg/L
Al	0,5	mg/L	Mo	0,24 - 0,38	mg/L
Ba	0,2	mg/L	Cl ⁻	48	mg/L
Be	0,01	mg/L	SO ₄ ²⁻	1509 - 2037	mg/L
B	0,5	mg/L	HCO ₃ ⁻	33	mg/L
Cn	0,05	mg/L	DBO ₅	5	mg/L
Co	0,05	mg/L	COD	17	mg/L
Cr	0,05	mg/L	N total	<0,1	mg/L
F	0,9325	mg/L	NH ₃	0,03	mg/L
Li	0,01	mg/L	NO ₃ ⁻	0,11	mg/L
Pb	0,05	mg/L	NO ₂	< 0.01	mg/L
Cd	0,01	mg/L	P _{total}	< 0.1	mg/L
Fe	0,0275	mg/L	PO ₄ ³⁻	0,03	mg/L
Ni	0,05	mg/L	alcalinidad	33	mg/L
Ag	0,01	mg/L	acidez	< 1	mg/L
Mn	0,045	mg/L	alcalinidad neta	33	mg/L CaCO ₃
Hg	0,001	mg/L	pH-valor	7.37 - 8.2	---
Na	8,55	%	conductividad (25°)	2251,25	μS
V	0,1	mg/L	TDS	1994,5	mg/L

¹ Incluye a elementos, compuestos y a medidas fisicoquímicas que dan cuenta de la calidad del agua.

² Valor de concentración, excepto para pH y conductividad.

En la Tabla se observa que el agua clara posee concentraciones elevadas de sulfato comparado con los criterios para el agua de riego. Además el pH y la alcalinidad neta, indican que el agua es netamente alcalina. Las principales sustancias nutritivas para las plantas (nitrógeno, fósforo) y fuentes de carbón, que son necesarias para procesos de transformación microbiológicos, no están presentes.

En este caso el diseño del sistema para el tratamiento de estas aguas tiene por objetivo la disminución de la concentración de sulfato, para lo cual se contempla la construcción de un prefiltro y dos piscinas o celdas de distintas dimensiones, para

generar un tratamiento anaeróbico-aeróbico definido para un caudal de entrada de 6 a 24 m³/ día.

Se contempla que el agua clara ingrese a una unidad de prefiltro para que se produzca la precipitación de los sólidos sedimentables, de modo de evitar la obstrucción del sistema. En la primera celda se lleva a cabo la reducción electroquímica del sulfato por medio de la Reacción 3 (página 13). Para favorecer esta reacción se adiciona melaza, una fuente de carbono fácilmente biodegradable. La melaza es inyectada al sistema por medio de una bomba, de modo de controlar el caudal de ingreso. Como en la zona de instalación del sistema no hay suministro de energía eléctrica, ésta es proporcionada por paneles solares.

En la segunda celda, el propósito es que se reduzca la carga orgánica que se incrementará por la adición de la melaza por medio de la oxidación del carbono orgánico, para lo cual se favorece el contacto del agua con el aire atmosférico. Además, el sistema considera tres cámaras de registro para facilitar el control y la toma de muestras.

Para ambas celdas, la especie vegetal seleccionada para depurar y captar oxígeno es *Typha latifolia*, una especie abundante en la zona de construcción y de fácil adaptación. La Figura 3 es un esquema simplificado del diseño y en la Figura 4 aparece el diseño del sistema desde una perspectiva horizontal.

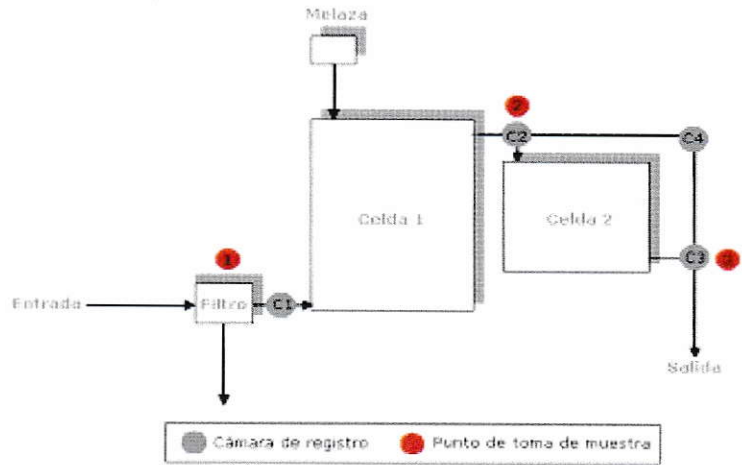


Figura 3: Esquema humedal artificial a escala piloto

Las cámaras 1 y 3 señaladas en la Figura 4 poseen medidores de flujo, para controlar el caudal de entrada y salida del sistema respectivamente.

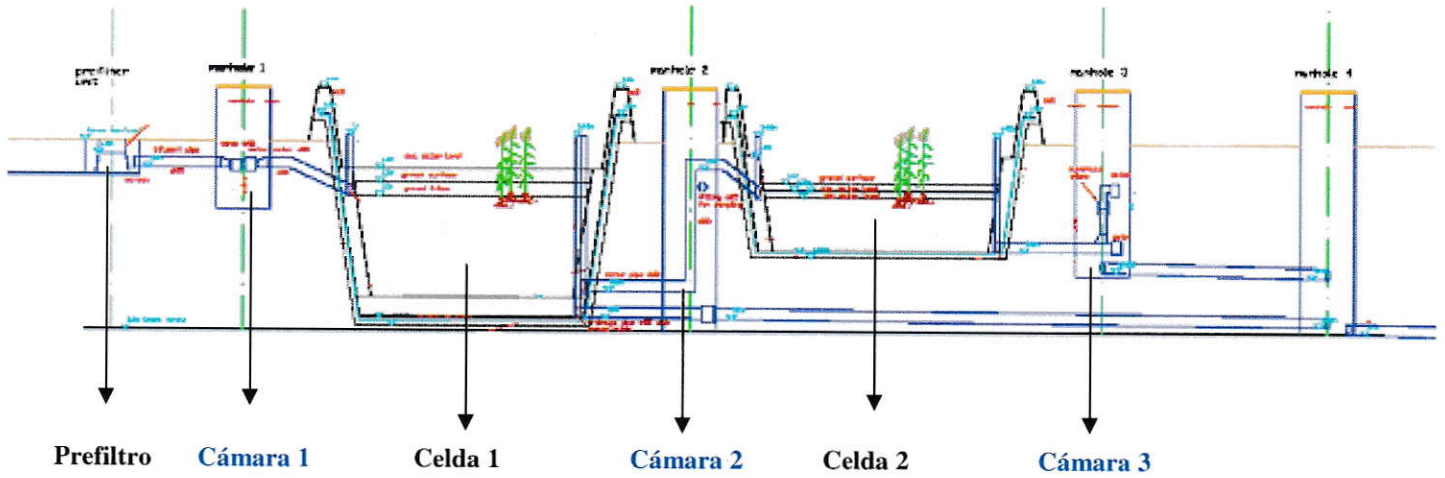
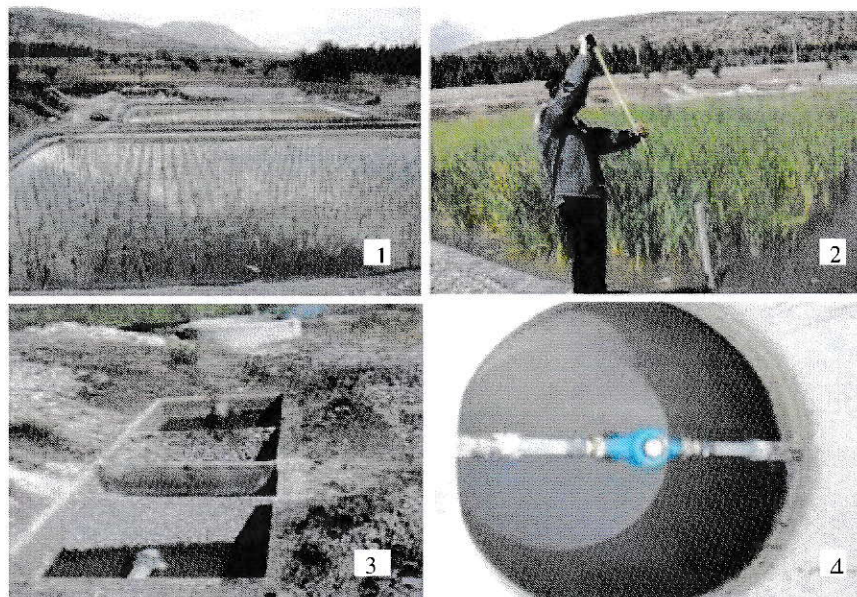


Figura 4: Esquema horizontal humedal artificial a escala piloto

Tabla 4: Algunos parámetros de diseño del humedal artificial

Característica	Valor
Área prefiltro	1,6 m ²
Área celda 1	520 m ²
Área celda 2	280 m ²
Altura agua celda 1	10 cm sobre sustrato
Altura agua celda 2	10 cm bajo sustrato
Material de relleno celda 1	arena , gravilla y grava gruesa
Material de relleno celda 2	gravilla y grava gruesa
Tr celda 1	114 - 456 h
Tr celda 2	35 - 140 h
Distancia entre plantas	4 cm

Cabe destacar que ambas celdas fueron impermeabilizadas con láminas de HDPE para evitar la percolación del RIL a través del suelo.



¹ Celdas 1 y 2 luego de plantación de *Typha*
³ Unidad de prefiltro

² Celda 1 luego de un año de la plantación
⁴ Uno de los medidores de flujo

Figura 5: Fotografías humedal artificial a escala piloto

1.2.1.1 Melaza, Fuente de Carbono adicionada en Humedal Artificial

La melaza es un líquido denso y viscoso de color oscuro producto final de la fabricación o refinación de la sacarosa procedente de la caña de azúcar. Se caracteriza por poseer un elevado contenido de hidratos de carbono, vitaminas y minerales.

Como se mencionó en párrafos anteriores, las bacterias sulfato reductoras utilizan la materia orgánica disuelta en el agua como principal fuente de carbono, por lo cual necesitan de esta para sobrevivir. Por lo anterior, una de las características que debe poseer un medio para que estas bacterias se desarrollen naturalmente es la presencia abundante de materia orgánica biodegradable, la cual puede ser suministrada a través de la adición de melaza. Por esta razón en la celda 1 del humedal artificial se adiciona este producto.

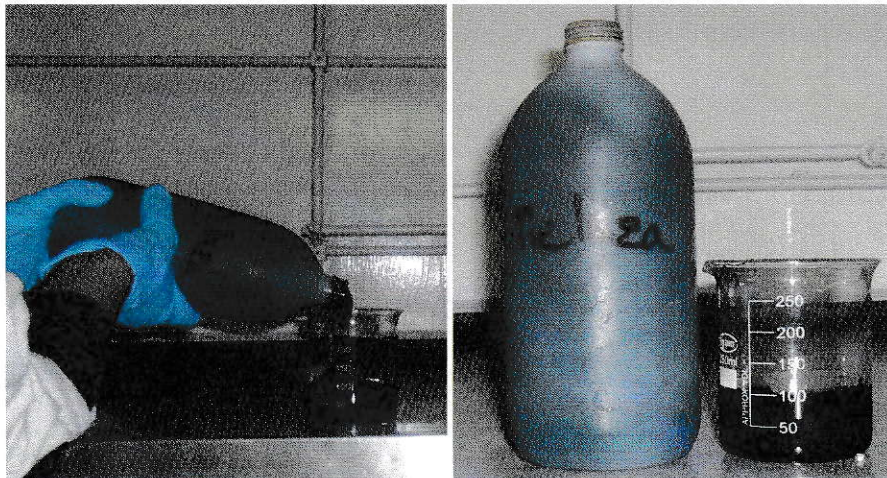


Figura 6: Melaza empleada en humedal artificial

Dado que no se cuenta con la composición específica de la melaza utilizada en el humedal artificial, en la Tablas 5 se muestra la composición porcentual de melaza mencionada en un estudio y la obtenida por una industria venezolana productora de azúcar.

Tabla 5: Composición porcentual de melaza

Componente	Porcentaje	
	Delgado, 2003	Central El Palmar, S.A.
Agua	20	17 - 25
Sacarosa	35	30 - 40
Glucosa	7	
Levulosa	9	
Otras sustancias reductoras	3	
Azúcares reductores		10 - 25
Otros carbohidratos	4,1	
Cenizas	12	7 -15
Compuestos nitrogenados	4,5	
Compuestos no nitrogenados	5	
Ceras, esteroideos y esterofosfolípidos	0,4	

En la Tabla 5 se observa que la melaza posee un elevado contenido de hidratos de carbono, por lo que constituye una buena fuente de materia orgánica para las bacterias sulfato-reductoras.

1.3. Hipótesis

El sistema de tratamiento pasivo tipo humedal artificial sería eficaz para la remoción de sulfato en aguas claras.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivos Generales

Probar y optimizar un sistema de tratamiento pasivo humedal artificial a escala piloto para la remediación de aguas claras ricas en sulfato provenientes de una compañía minera nacional ubicada en la V región.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Fomentar y validar el uso de tecnologías de tratamiento pasivo para la remediación de aguas con elevado contenido sulfato.
- Estudiar la eficacia y el proceso de remoción de sulfato a través de la reducción electroquímica mediada por bacterias sulfato-reductoras.

- Optimizar los parámetros de diseño, operación y mantenimiento del humedal artificial para la posible implementación del sistema a gran escala.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Primera Etapa, Monitoreo Preliminar

En una primera etapa, antes de la instalación de los paneles solares necesarios para el funcionamiento de la bomba que inyecta melaza, se realiza un monitoreo preliminar.

Para esto se toman muestras a la entrada del sistema y a la salida de la primera y segunda celdas, tal como se muestra en el esquema de la Figura 3. Estas muestras son analizadas por el laboratorio ALS Environmental para determinar los siguientes parámetros:

- pH
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Sulfato (SO_4^{2-})
- Sulfuro total (S^{2-})

Además en terreno se mide el caudal a la entrada y salida del sistema.

2.2 Segunda Etapa, Adición de Melaza

En una segunda etapa, una vez instalado el sistema de inyección de melaza, se debe determinar la cantidad óptima de adición de melaza y la capacidad de reducción de contaminantes del sistema. Para esto, es necesario aumentar paulatinamente la adición de melaza al sistema manteniendo el caudal de entrada de RIL. Esto se realiza en cuatro ciclos de operación, para probar el sistema con distintos caudales de ingreso de RIL. En la siguiente Tabla se muestran los valores de caudal de ingreso para cada uno de los ciclos.

Tabla 6: Ciclos de operación para monitoreo segunda etapa

Ciclo de operación	Caudal ingreso RIL (m ³ /día)	Caudal ingreso melaza (L/día)	Semanas de operación	Ciclo de operación	Caudal ingreso RIL (m ³ /día)	Caudal ingreso melaza (L/día)	Semanas de operación
Primero	6	1,2	4	Segundo	12	2,4	4
		2,4	4			4,8	4
		4,8	4			9,6	4
		9,6	7			19,2	7
		12	5			24	5
Tercero	18	3,6	4	Cuarto	24	4,8	4
		7,2	4			9,6	4
		14,4	4			19,2	4
		28,8	7			38,4	7
		36	5			48	5

Para controlar el sistema se toman muestras en los mismos puntos señalados con anterioridad. En esta etapa los análisis se realizan en el laboratorio del área de Medio

Ambiente de Fundación Chile, en el cual se miden los parámetros para los cuales se cuenta con los equipos e instrumental necesario. Los parámetros medidos son: pH, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad eléctrica (CE) y Sulfato (SO_4^{2-}).

2.2.1 Medición de pH

▪ Equipos y Materiales

- Medidor de pH, marca HANNA, modelo HI221
- Electrodo de pH, marca JENWAY, modelo 924001
- Vaso de precipitado de 50 ml
- Agitador magnético
- Barra magnética
- Papel limpiador

▪ Reactivos

- Solución buffer de pH marca HANNA, pH 4,01 (HI7004)
- Solución buffer de pH marca HANNA, pH 7,01 (HI7007)
- Solución buffer de pH marca HANNA, pH 10,01 (HI7010)
- Agua destilada

- **Procedimiento**

En un vaso de precipitado limpio se adiciona suficiente cantidad de muestra para que una vez que se sumerja el electrodo en ella, todos sus elementos sensitivos queden cubiertos. Antes de sumergir el electrodo se comienza con la agitación de la muestra por medio de una barra magnética. Se espera hasta que la lectura se estabilice y se registra el valor. Posteriormente el electrodo se enjuaga con agua destilada y se limpia suavemente con papel limpiador de laboratorio.

Cabe destacar que una vez por semana se calibra el sistema instrumento/electrodo con soluciones buffer de pH 4, 7 y 10, según las especificaciones del manual del equipo.

2.2.2 Medición de Conductividad Eléctrica

- **Equipos y Materiales**
 - Conductivímetro marca HANNA, modelo EC215, con electrodo modelo HI76303
 - Vaso de precipitado de 50 mL
 - Agitador magnético
 - Barra magnética

– Papel limpiador

▪ **Reactivos**

– Solución de calibración de conductivímetro marca HANNA de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (HI7039)

– Agua destilada

▪ **Procedimiento**

En un vaso de precipitado limpio se adiciona suficiente cantidad de muestra para que una vez que se sumerja el electrodo en ella, todos sus elementos sensitivos queden cubiertos. Antes de sumergir el electrodo se comienza con la agitación de la muestra por medio de una barra magnética. Se espera hasta que la lectura se estabilice y se registra el valor de conductividad ajustado a 25 °C. Posteriormente el electrodo se enjuaga con agua destilada y se limpia suavemente con papel limpiador de laboratorio.

Cabe destacar que una vez por semana se calibra el sistema instrumento/electrodo con la solución estándar de conductividad, según las especificaciones del manual del equipo.

2.2.3 Medición de Oxígeno Disuelto

- **Equipos y Materiales**

- Medidor de OD, marca HANNA, modelo HI2400
- Vaso de precipitado de 50 mL
- Agitador magnético
- Barra magnética
- Papel limpiador

- **Reactivos**

- Agua destilada

- **Procedimiento**

En un vaso de precipitado limpio se adiciona suficiente cantidad de muestra para que una vez que se sumerja el electrodo en ella, todos sus elementos sensitivos queden cubiertos. Antes de sumergir el electrodo se comienza con la agitación de la muestra por medio de una barra magnética. Se espera hasta que la lectura se estabilice y se registra el valor. Posteriormente el electrodo se enjuaga con agua destilada y se limpia suavemente con papel limpiador.

Cabe destacar que una vez por semana se calibra el sistema instrumento/electrodo según las especificaciones del manual del equipo, lo cual puede realizarse situando el electrodo al aire libre

2.2.4 Medición de Sulfato

▪ Equipos y Materiales

- Espectrofotómetro de terreno marca La Motte, modelo Smart 2
- Celda de 10 mL para espectrofotómetro
- Kit para medición de sulfato a través de método turbidimétrico (código 3665-SC)
- Matraz de aforo de 50 mL
- Pipeta aforada de 2 mL
- Parafilm
- Cronómetro
- Papel limpiador

▪ Reactivos

- Agua destilada

▪ **Procedimiento**

Se adicionan 10 mL de muestra en la celda del espectrofotómetro, ésta se inserta en la cámara del equipo para la medición del “blanco”. Luego se extrae y se adiciona en ella 0,1 g del reactivo V-6277, posteriormente se cierra y agita hasta que el reactivo se disuelve. Se esperan 5 minutos, pasado este tiempo se agita la celda y se inserta en la cámara del equipo para la medición de concentración. Se registra el valor.

Como el método permite la medición de hasta 100 mg/L y las muestras analizadas poseen hasta alrededor de 2.000 mg/L, se realizó la dilución de 2 mL de muestra en 50 mL de agua destilada. Por lo anterior los resultados registrados se multiplican por 25.

Especificaciones del Método

- Aplicación: agua potable, superficial, residual doméstica e industrial
- Rango: 0 – 100 mg/L
- Método: El ión sulfato precipita en medio ácido con cloruro de bario para formar sulfato de bario en suspensión en una cantidad proporcional a la de sulfato presente en la muestra (método turbidimétrico).

2.3. Tercera Etapa, Prueba a Escala Banco

Debido a que el plan de monitoreo contemplado al inicio no pudo ser llevado a cabo, lo cual se discute con mayor detalle en los resultados, se decidió montar una prueba a escala banco que permita determinar la capacidad de reducción de contaminantes del sistema junto con el óptimo de adición de melaza, la que se comentará con más detalle a continuación.

2.3.1. Diseño de Prueba

Con la prueba a escala banco se pretende determinar la capacidad de reducción de sulfato del sistema, junto con el óptimo de adición de melaza. Como en la primera celda es donde se adiciona melaza y se lleva a cabo la reducción del sulfato, es esta la que será replicada y puesta a prueba.

Se montará una columna del mismo alto que la celda en cuestión y de un ancho o diámetro dado, la que contiene los mismos materiales y plantas que la celda a escala piloto. En esta se hace circular el RIL mezclado con melaza, proyectándose que en la columna la concentración de sulfato disminuya en el tiempo producto de la reducción electroquímica llevada a cabo por las bacterias sulfato-reductoras.

Esta circulación se realizará con cinco mezclas distintas de RIL-melaza, cada una de las cuales contendrá cantidades iguales de RIL y crecientes de melaza. Cada vez que finalice la prueba con una mezcla, la columna será vaciada para posteriormente ser rellenada con la nueva mezcla. De este modo será posible determinar la cantidad de melaza óptima, es decir, la que provoca la mayor disminución de la concentración de sulfato.

Se determinó realizar cinco mezclas RIL-melaza, debido a que según el plan de monitoreo inicial para la segunda etapa (Tabla 6), cada ciclo de operación contempla probar la adición de cinco cantidades crecientes de melaza manteniendo el caudal de ingreso del efluente, cantidades que en proporción al caudal de ingreso del RIL (que es lo que varía en cada ciclo de operación), son iguales. Las tres primeras cantidades de melaza a adicionar serán probadas durante cuatro semanas de operación, la cuarta cantidad durante 7 semanas y la última durante 5 semanas, tal como lo contempla el plan de monitoreo.

El diseño de la primera celda del humedal piloto contempla el relleno con tres tipos distintos de grava, la entrada y salida del RIL por medio de dos tuberías a distinta altura y la presencia de vegetación, tal como lo muestra el esquema simplificado a continuación.

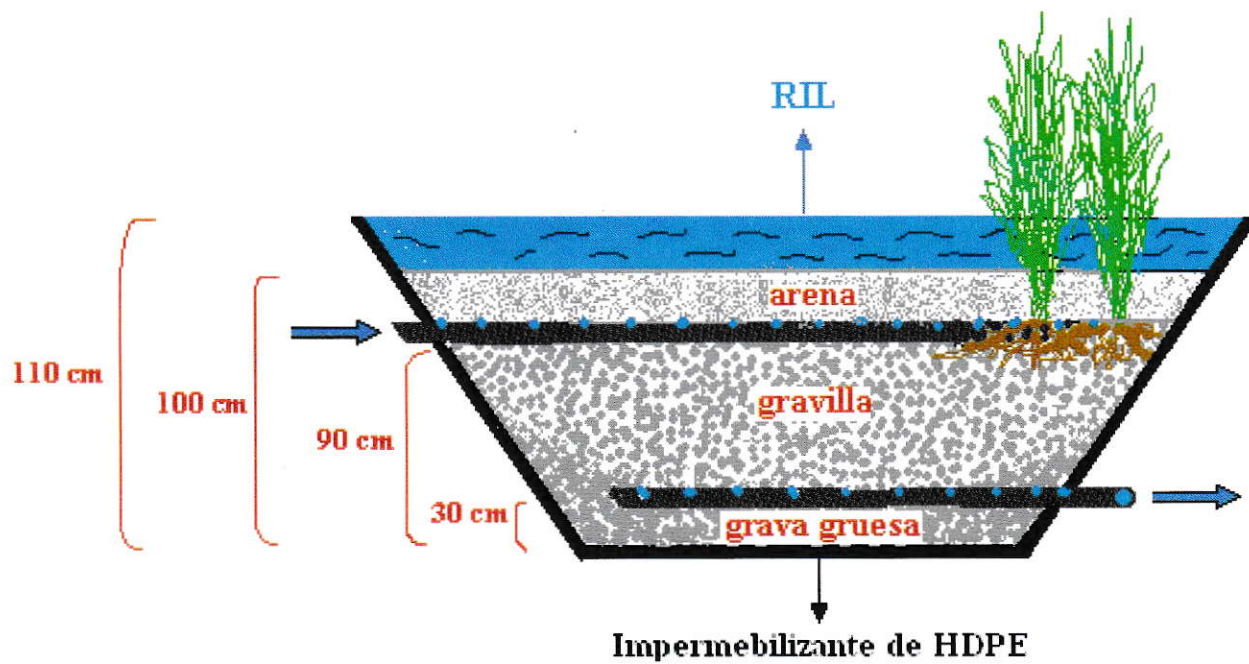


Figura 7: Esquema simplificado de celda 1

Cabe destacar que las plantas son dispuestas a lo largo de toda la celda, y no sólo en uno de los extremos, como se ilustra en la figura anterior.

En función del diseño de la celda 1 mostrado en la figura anterior, se realizó el diseño de la columna, el que se muestra a continuación.

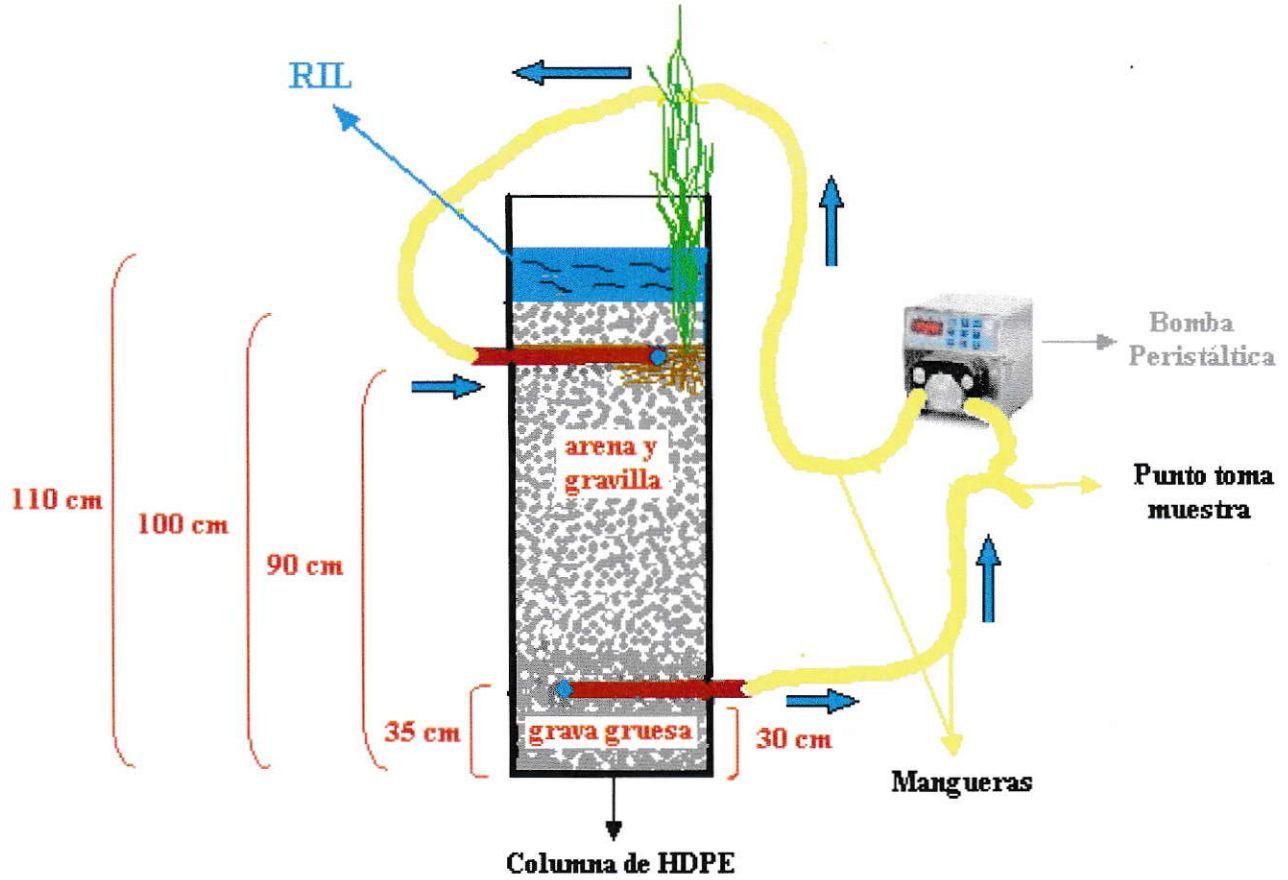


Figura 8: Esquema columna de prueba a escala banco

En la figura se observa que la altura de las tuberías, plantas y columna de RIL, son las mismas que las del humedal piloto, así como por donde entra y sale el efluente. Sin embargo, el diseño presenta algunas diferencias, las que se detallan a continuación:

- La altura de la grava gruesa alcanza los 35 cm (en el humedal a escala piloto alcanza los 30 cm), lo que se debe a que en la celda 1 del humedal piloto esta

grava es dispuesta también en los bordes de la celda por sobre los 30 cm y como el diámetro de la columna es pequeño, no es posible replicar esta curvatura. Por lo anterior se optó por disponer una capa de altura homogénea y levemente superior de grava gruesa.

- La parte superior de la columna es una mezcla homogénea de arena y gravilla, a diferencia del humedal a escala piloto en la que ambos materiales son dispuestos en capas separadas. Lo anterior se debe a que los materiales para armar la columna fueron extraídos del humedal piloto y en este ambos tipos de grava se encontraban mezcladas al momento de la extracción.
- Las tuberías de la columna sólo tienen los orificios de entrada y salida y no varios a lo largo de ellas como las del humedal piloto, lo que se debe a que el diámetro de la columna es pequeño en relación al área de la celda 1 del humedal a escala piloto, por lo que no se justifica dicha modalidad de entrada.

El RIL se hace circular por medio de una bomba peristáltica marca Masterflex, a 16 rev/min y durante 15 minutos diarios, de modo que el líquido no este siempre inmóvil en la columna. La idea es que la columna líquida experimente algún tipo de movimiento, ya que en el humedal piloto el efluente está constantemente entrando y saliendo del sistema, aunque a una baja velocidad.

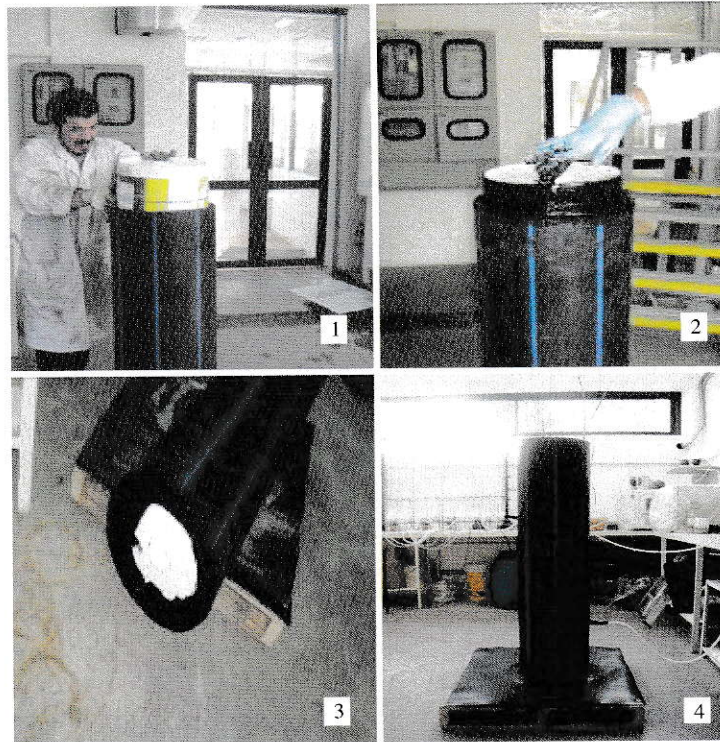
2.3.2. Montaje Columna de Prueba

Se cuenta con una columna del mismo material con el que se sellaron las celdas del humedal artificial a escala piloto, HDPE, con 2 cm de grosor; 27,5 cm de diámetro interno y 1,2 m de altura, la cual se encuentra abierta por ambos extremos.

La columna debe ser cerrada en uno de sus extremos, para que pueda ser rellenada. En un comienzo se intentó en dos oportunidades unir la columna a una lámina de HDPE mediante silicona y capas de cinta adhesiva, lo que resultó ser un sellado ineficiente, debido a que al cabo de dos días (en ambos casos) el RIL comenzó a filtrarse por el extremo inferior.

Por lo mismo, en una tercera oportunidad, se probó con otro sistema de sellado, el cual consiste en cortar un recipiente plástico de pintura previamente lavado, hasta obtener un diámetro interno levemente mayor al de la columna, para luego insertarlo en la misma a presión. Además a medida que se ingresa el recipiente cortado se adiciona silicona en los bordes, de modo que no quede ningún espacio libre por el cual pueda filtrarse el RIL. El recipiente se ingresa hasta que su superficie inferior llegue al borde de la columna y una vez ingresado, se adiciona una nueva capa de silicona en todo el borde para que quede completamente sellado, luego se deja secar por un día. Pasado este tiempo, se adiciona silicona a una lámina de HDPE y al borde de la columna en cuestión para juntar ambas superficies, de modo que la columna quede en 90° respecto

al suelo. Una vez hecho esto, se deja secar por tres días. Las fotografías que se muestran a continuación, dan cuenta de todo este proceso.



¹ Ingreso de tarro a extremo inferior de la columna
³ Secado de unión entre tarro y columna

² Adición silicona para evitar filtraciones
⁴ Unión lámina de HDPE y columna

Figura 9: Secuencia de armado columna de prueba a escala banco

Una vez que se tiene la columna sellada se debe proceder a rellenarla con los mismos materiales utilizados en el humedal artificial a escala piloto, es decir, vegetación, grava y RIL.

Estos materiales son extraídos del mismo humedal artificial, lo que permite aprovechar, en el caso de la grava, un sustrato que probablemente ya tiene adherido

algunas colonias de bacterias y en el caso de las plantas, se tiene la ventaja de que estas ya están adaptadas al RIL, además de que es probable que también tengan algunas colonias de bacterias adheridas a sus raíces. En la siguiente Figura se muestran las gravas y plantas utilizadas para armar la columna.



Figura 10: Materiales utilizados para armar columna de prueba a escala banco

La cantidad de RIL que se adicionará a la columna será aquella que permita obtener una altura de 10 cm de columna de líquido por sobre la grava y en función de esta cantidad se calculará la cantidad de melaza a adicionar. Para obtener un valor aproximado de la cantidad de RIL que se deberá adicionar se calcula el porcentaje de volumen de poros de los dos tipos de grava (para lo cuál es necesario calcular la densidad real y la densidad aparente de los materiales), y se asumirá que todo ese volumen será ocupado por el líquido. El cálculo de este valor es posible, dado que el

diámetro de la columna y la altura que cada material ocupa en la columna son valores conocidos. Además se debe sumar el volumen que ocupan los 10 cm de la columna superior de RIL. De este modo, el volumen total de agua clara a adicionar será la suma del volumen de poros de cada material y el volumen que ocupa la columna superficial de RIL (cálculos en ANEXO 1). Es importante conocer este valor con anterioridad, porque en función de la cantidad de agua clara se calcula la cantidad de melaza que se adicionará, la cual debe mezclarse uniformemente con todo el efluente antes que este sea incorporado a la columna.

Los cálculos realizados indican que se debiera adicionar un volumen de 32 L de RIL para llenar la columna. Esta cantidad debiera mezclarse con 6,4 mL de melaza para la primera mezcla, según los valores expuestos en la tabla 7. El cálculo realizado es el siguiente:

Datos:

- Caudal ingreso RIL primer ciclo de operación = 6 m³/día
- Caudal ingreso melaza para primera cantidad a probar = 1,2 L/día

$$\begin{array}{rcl} 6000 \text{ L RIL} & \text{-----} & 1,2 \text{ L melaza} \\ 32 \text{ L RIL} & \text{-----} & x \text{ L melaza} \end{array}$$

$$x = 6,4 \text{ mL de melaza}$$

Si este cálculo se realiza utilizando los datos del segundo, tercer y cuarto ciclo de operación para la primera cantidad de melaza a probar, la cantidad de melaza a agregar obtenida es la misma. Lo mismo sucede al hacer el cálculo con las siguientes cuatro cantidades de melaza a probar para cada ciclo de operación (cálculos en ANEXO 2). Es por esta razón que se probará el sistema con cinco cantidades de melaza.

Los valores obtenidos de melaza a adicionar en cada una de las cinco pruebas, la cantidad de RIL y las semanas de operación de cada cantidad a probar, se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 7: Cantidades de melaza, RIL y semanas de operación de cada una de los ensayos de prueba a escala banco

Nº de ensayo	Cantidad de RIL a preparar (L)	Cantidad de melaza a adicionar (mL)	Semanas de operación
1	32	6,4	4
2	20	8	4
3	20	16	4
4	20	32	7
5	20	40	5

En la tabla se observa que a partir del segundo ensayo la cantidad de RIL a utilizar son 20 L en lugar de 32 L. Esto se debe a que al vaciar la columna, el RIL acumulado en los 35 cm inferiores de la columna, es decir, aquel que se acumula en la grava que esta por debajo del conducto de salida (conducto inferior) no son posibles de extraer, por el mismo hecho de que se encuentra por debajo del conducto de salida. El cálculo realizado del volumen de poros de la grava ubicada en esta porción de la

columna, arroja un valor de 15 L, que si son restados del volumen total (32 L) se obtiene un valor de 17 L, el que es aproximado a 20 L para evitar la falta RIL al rellenar la columna.

El diseño de la columna no contempla un conducto de salida en la parte inferior de la columna que permita vaciarla por completo, porque en la primera celda del humedal piloto, aunque existe una válvula de salida a esta altura, ésta siempre se encuentra cerrada, por lo que el RIL probablemente también se acumula en esta zona.

El RIL utilizado en un comienzo fue el mismo que ingresa al humedal artificial, pero debido a que se intentó armar la columna en dos oportunidades sin éxito, la muestra de agua clara tomada para esta prueba se perdió. Además por razones de fuerza mayor no fue posible ingresar nuevamente al lugar de emplazamiento del humedal artificial para tomar muestras de agua clara, por lo que se decidió realizar una simulación del RIL en el laboratorio.

Para elaborar el RIL, a 32 L de agua potable se le adicionaron todos los compuestos y elementos con los que se cuenta en el laboratorio y que contiene el agua clara, en las concentraciones que arrojó el análisis químico efectuado a las mismas, mostrado en la tabla 2. Cabe destacar que de los 29 elementos y/o compuestos analizados se adicionaron 17, entre los que se incluyen todos aquellos que están en mayores concentraciones. Además se ajustó el valor de pH del RIL fabricado. En la siguiente tabla se muestra una comparación entre los elementos y compuestos que

aparecen en el análisis químico efectuado a las aguas claras junto con aquellos que fueron adicionados para elaborarlo.

Tabla 8: Compuestos utilizados para preparar RIL

Parámetro	Concentración en Análisis Químico	Compuesto Adicionado (Fórmula Química)	Concentración en RIL Preparado
As	0,0025 mg/L	Arsenito de sodio (NaAsO ₂)	0,0025 mg/L
Al	0,5 mg/L	Aluminato de sodio (NaAlO ₂)	0,5 mg/L
Ba	0,2 mg/L	---	---
Be	0,01 mg/L	---	---
B	0,5 mg/L	Borato de sodio (Na ₂ B ₄ O ₇ × 10 H ₂ O)	0,5 mg/L
CN	0,05 mg/L	Cianuro de sodio (NaCN)	0,05 mg/L
Co	0,05 mg/L	---	---
Cr	0,05 mg/L	---	---
F	0,9325 mg/L	Fluoruro de sodio (NaF)	0,9325 mg/L
Li	0,01 mg/L	---	---
Pb	0,05 mg/L	Acetato de plomo (PbCH ₃ CO ₂ × 3 H ₂ O)	0,05 mg/L
Cd	0,01 mg/L	---	---
Fe	0,0275 mg/L	Sulfato de hierro (FeSO ₄ × 7 H ₂ O)	0,0275 mg/L
Ni	0,05 mg/L	Sulfato de níquel (NiSO ₄ × 6 H ₂ O)	0,05 mg/L
Ag	0,01 mg/L	Sulfato de plata (Ag ₂ SO ₄)	0,01 mg/L
Mn	0,045 mg/L	---	---
Hg	0,001 mg/L	---	---
Na	8,55 %	---	1003 mg/L
V	0,1 mg/L	---	---
Zn	0,01 mg/L	Cloruro de zinc ZnCl × 2 H ₂ O	0,01 mg/L
Mo	0,24 - 0,38 mg/L	Molibdato de sodio (Na ₂ MoO ₄ × 2 H ₂ O)	0,4 mg/L
Cl ⁻	48 mg/L	Cloruro de sodio (NaCl)	48 mg/L

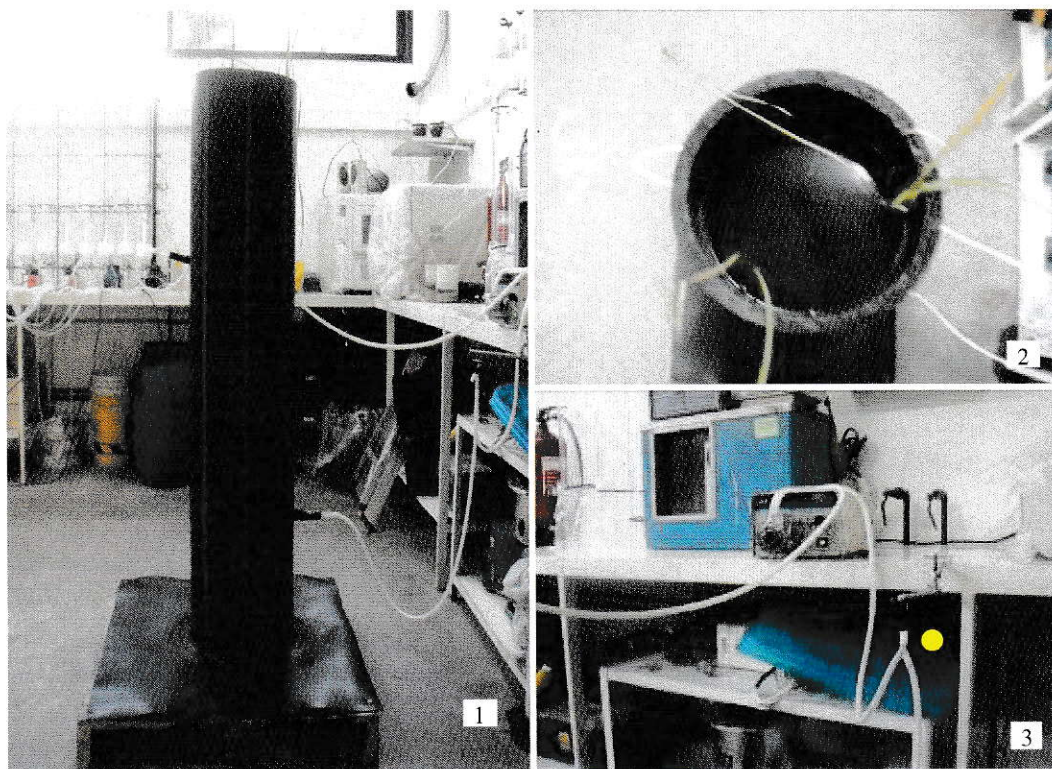
SO ₄ ²⁻	1509 – 2037 mg/L	Sulfato de sodio (NaSO ₄)	2000 mg/L
HCO ₃ ⁻	33 mg/L	Bicarbonato de sodio (NaHCO ₃)	33 mg/L
DBO ₅	5 mg/L	---	---
COD	17 mg/L	---	---
N total	<0,1 mg/L	---	---
NH ₃	0,03 mg/L	Sulfato de amonio ((NH ₄) ₂ SO ₄)	0,03 mg/L
NO ₃ ⁻	0,11 mg/L	Nitrato de sodio (NaNO ₃)	0,11 mg/L
NO ₂ ⁻	< 0.01 mg/L	---	---
P _{total}	< 0.1 mg/L	---	---
PO ₄ ³⁻	0,03 mg/L	Fosfato de sodio dibasico (Na ₂ HPO ₄)	0,03 mg/L
alcalinidad	33 mg/L	---	---
acidez	< 1 mg/L	---	---
alcalinidad neta	33 mg/L CaCO ₃	---	---
pH-valor	7.37 - 8.2	NaOH 0,1M	8,2
conductividad (25°)	2251,25 µS	---	---
TDS	1994,5 mg/l	---	---

Cabe destacar que cada uno de los compuestos adicionados fueron secados a 100°C durante 2 horas para extraerles la humedad.

En la tabla se observa que la concentración de SO₄²⁻ adicionada al agua potable para fabricar el RIL corresponde a un valor cercano al máximo del rango informado en el análisis químico. En el caso del ión Na⁺ sólo se pudo agregar 1003 mg/L de los 85.000 mg/L, se decidió no adicionar más, porque se estarían agregando otros contraiones. De todos modos, es probable que este valor no este bien informado, dado que es una concentración extremadamente alta que no puede ser contrarestanda con iones

negativos si estos son adicionados en las concentraciones informadas, siendo imposible cumplir con el principio de electroneutralidad.

En las fotografías que se muestran a continuación se observa la columna completamente armada con la primera mezcla de RIL-melaza.



- ¹ Vista columna desde perspectiva vertical, donde se observan conductos de entrada y salida del RIL
- ² Vista columna desde arriba, donde se observa columna de RIL superior y plantas
- ³ Bomba peristáltica y punto de toma de muestra marcado con circunferencia de color amarillo

Figura 11: Columna prueba escala banco armada

2.3.3. Monitoreo Prueba a Escala Banco

Se realizarán dos análisis semanales de muestras extraídas de la columna desde el punto de toma de muestra que se observa en la Figura 11.

Como se comentó con anterioridad, se contempla que las tres primeras cantidades de melaza a adicionar sean probadas durante cuatro semanas de operación, la cuarta cantidad durante siete semanas y la última durante cinco. Cabe destacar que estos serán los tiempos máximos de prueba, independiente que finalizados cada uno de estos periodos la concentración de sulfato aún no se mantenga constante en el tiempo.

Se analizarán aquellos parámetros que es posible medir en el laboratorio del área de Medio Ambiente de Fundación Chile, los que corresponden a los mismos determinados en la segunda etapa (pH, Oxígeno Disuelto, Conductividad eléctrica, Sulfato), sumando esta vez también la medición de Potencial Rédox (Eh). El procedimiento de medición para cada uno de los parámetros medidos en la segunda etapa es el mismo señalado en el punto 2.2. El método para medir Potencial Rédox se detalla a continuación.

2.3.3.1 Medición de Potencial Rédox

- **Equipos y Materiales**

- Medidor multiparámetro, marca THERMO, modelo Orion 4 Star
- Electrodo de Eh, marca HANNA, modelo HI3214
- Vaso de precipitado de 50 mL
- Agitador magnético
- Barra magnética
- Papel limpiador

- **Reactivos**

- Solución buffer de Eh marca HANNA, Eh 200 – 275 mV (HI7020)
- Solución buffer de Eh marca HANNA, Eh 240 mV (HI7021)
- Solución buffer de Eh marca HANNA, Eh 470 mV (HI7022)
- Agua destilada

- **Procedimiento**

En un vaso de precipitado limpio se adiciona suficiente cantidad de muestra para que una vez que se sumerja el electrodo en ella, todos sus elementos sensitivos queden cubiertos. Antes de sumergir el electrodo se comienza con la agitación de la muestra por

medio de una barra magnética. Se espera hasta que la lectura se estabilice y se registra el valor. Posteriormente el electrodo se enjuaga con agua destilada y se limpia suavemente con papel limpiador de laboratorio.

Cabe destacar que una vez por semana se calibra el sistema instrumento/electrodo con alguna de las soluciones buffer de Eh 200 – 275 mV, 240 mV o 470 mV, según las especificaciones del manual del equipo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Primera Etapa, Monitoreo Preliminar

En esta etapa se realizaron un total de cinco mediciones, los valores de caudal se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 9: Caudales de ingreso primera etapa

Fecha	RIL ingresado al sistema (m ³)	Caudal de entrada (m ³ /día)
25-05-07	125	-
01-06-07	153	4
08-06-07	168	2
03-08-07	-	-
13-09-07	-	-

En la Tabla se observa que los días en que fue posible medir el caudal este es muy pequeño, lo que se debe a la obstrucción del sistema por la elevada carga de sólidos del efluente. De hecho, el día 03-08-07 no fue posible medir el agua clara que ingresó al sistema, porque el medidor de flujo de entrada estaba tapado impidiendo el paso de RIL al sistema. Por lo mismo, desde el día 03-08-07 se dejó cerrada la válvula de salida del sistema para que la segunda celda no se secase del todo.

Por esta misma razón, los días en que se tomaron las muestras, también se realizó una labor de limpieza tanto a las cañerías como al medidor de flujo.

Los resultados de los análisis de laboratorio se muestran en la siguiente Tabla y

Figuras.

Tabla 10: Resultados primera etapa

Fecha	25-05-07			01-06-07			08-06-07			03-08-07			13-09-07		
Cámara	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DBO (mg/L)	<5	8	5	25	8	9	7	7	7	-	4	4	<2	<2	<2
SST (mg/L)	<10	<10	<10	24	<10	<10	45	<10	<10	-	<10	<10	55	55	<10
Sulfuro total (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sulfato total (mg/L)	-	-	-	1796	1797	1692	1687	1665	1539	-	1373	1533	1593	1593	1344
pH	7,8	7,5	7,1	8,3	7,3	7,2	8,2	7,5	7,1	-	7,4	7,1	8,1	7,3	7,2

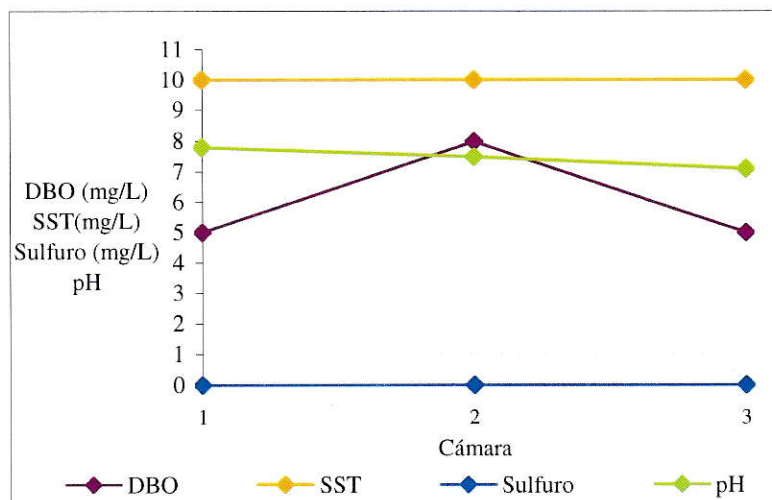


Figura 12: Gráfico medición 25-05-07

En el Gráfico se observa que la concentración de SST y sulfuro del RIL se mantienen constantes al pasar por el sistema. En el caso del sulfuro además, la concentración permanece muy baja (inferior al límite de detección), lo cual indica que el proceso de reducción de sulfato no se está llevando a cabo.

La DBO aumenta en la primera celda, lo cual revela que se acumuló materia orgánica (M.O.) en ella. En la segunda celda este parámetro disminuye, lo que puede deberse a la oxidación de la M.O., tal como se espera. De todos modos las diferencias de concentración de DBO entre una celda y otra no son considerables

En el caso del pH, este disminuye al pasar por el sistema, llegando a un valor cercano a 7, lo que probablemente se debe a la degradación de la materia orgánica presente en el humedal, lo cual genera acidez .

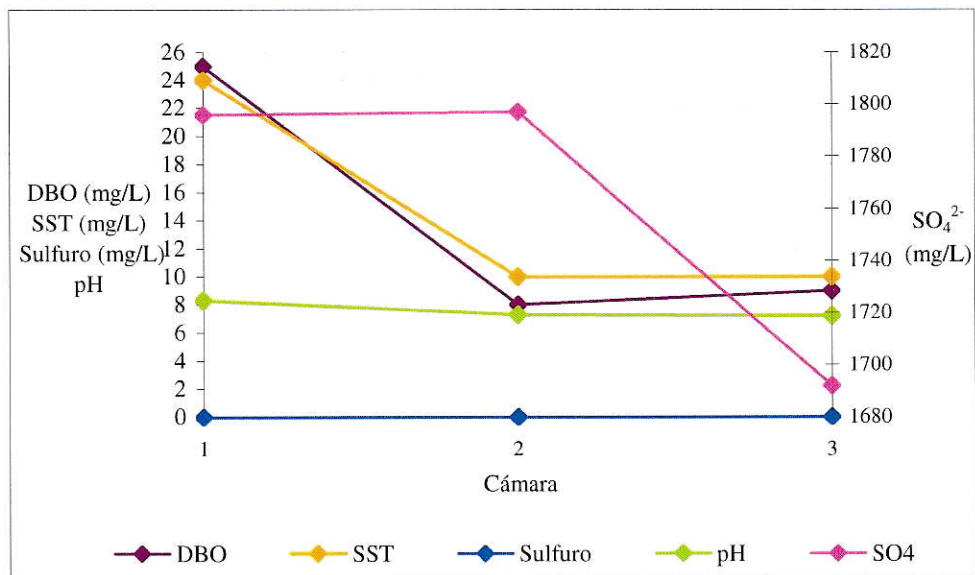


Figura 13: Gráfico medición 01-06-07

En este caso se observa que la concentración de sulfato se mantiene en la primera celda y disminuye en la segunda, lo cual se aleja del comportamiento esperado. La reducción del sulfato en la segunda celda indica que esta piscina está actuando de forma anaeróbica.

Respecto a la concentración de sulfuro, esta permanece pequeña y constante en las celdas, a pesar de que la concentración de sulfato disminuye en la celda 2. Este último hecho se menciona, porque según lo señalado en la introducción el sulfato al reducirse forma compuestos sulfurados, por lo que se esperaría que la concentración del sulfuro aumentara. Sin embargo, debe tenerse presente que lo que se analiza es el sulfuro disuelto en el RIL y gran parte del sulfuro que se forma es probable que escape a la atmósfera como sulfuro de hidrógeno (H_2S) o precipite formando compuestos sólidos con los metales divalentes presentes en la solución. Por lo tanto, es razonable y esperado que la concentración de sulfuro medida sea siempre pequeña y no refleje ni sea proporcional a la reducción del sulfato.

En la primera celda disminuyen los SST, probablemente debido a que el tiempo de residencia es el suficiente para que estos decanten. La DBO también disminuye en la celda 1, lo que indica que la M.O. está siendo degradada en ella, mientras que en la segunda piscina este parámetro se mantiene constante. El pH del RIL disminuye al pasar por la primera celda, lo que se puede relacionar con la degradación anaeróbica de la M.O. en la que se generan ácidos grasos volátiles y otros productos intermediarios de la fermentación que tienden a bajar el pH (Rodríguez y col., 2002).

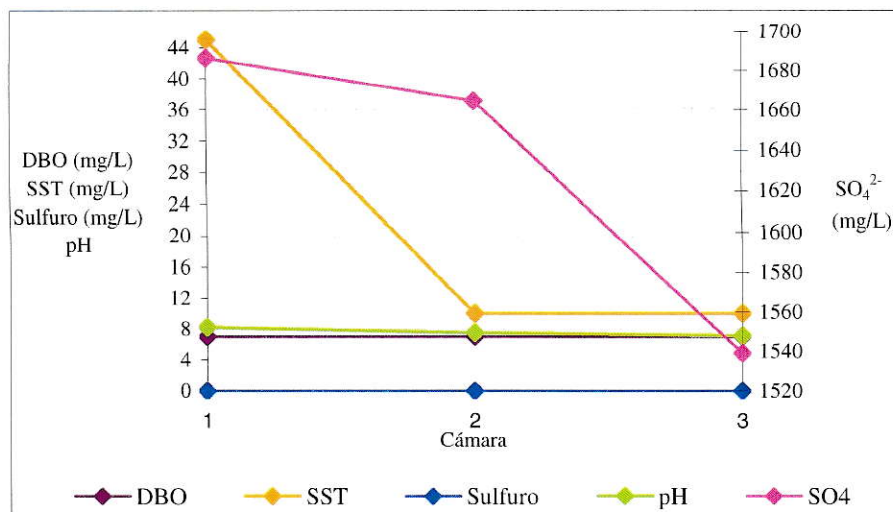


Figura 14: Gráfico medición 08-06-07

Esta vez la concentración de sulfato disminuye en alrededor de 150 mg/L, siendo la mayor disminución medida hasta el momento, aunque dicha reducción nuevamente se produjo en la segunda celda. Este comportamiento, como se mencionó con anterioridad, no es el esperado, aunque en esta oportunidad se produjo también una baja en la concentración de sulfato en la celda 1.

Por otra parte, los SST disminuyen en la primera celda, tal como se espera y la concentración de sulfuro total y de DBO permanecen constantes. Respecto al pH, este disminuye al pasar el RIL por el sistema, lo que en este caso no puede ser atribuido a la degradación de la M.O., porque la DBO permanece constante.

Respecto a la medición del día 03-08-07, como no estaba ingresando agua al sistema, no se recogió muestra a la entrada (punto de toma de muestra 1). Por esta razón

no se realizó un gráfico con los resultados de aquel día, dado que es esencial conocer la calidad del agua que entra. De todos modos, se puede mencionar que la concentración de DBO, SST y Sulfuro, se mantienen constantes en la celda 2, mientras que el pH disminuye levemente en ella. La concentración de sulfato aumenta al pasar de la celda 1 a la 2, lo cual sólo puede deberse a la re-solubilización de sulfato depositado en la última piscina.

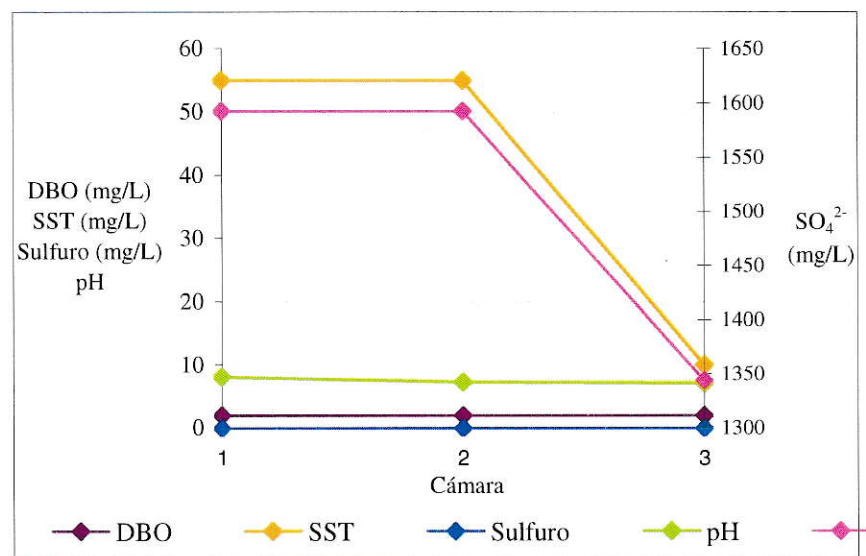


Figura 15: Gráfico medición 13-09-07

En el Gráfico se observa que la concentración de sulfato nuevamente disminuye significativamente en la segunda celda (alrededor de 300 mg/L), lo que indica que las bacterias reductoras de sulfato colonizaron la celda 2 en mayor medida que la 1, comportamiento que no se condice con el esperado.

Los SST disminuyen esta vez en la segunda celda y no en la primera, lo que puede deberse a que en esta celda alcanza el RIL alcanza una menor velocidad, lo que permite su decantación.

La concentración de DBO y sulfuro total permanecen constantes y pequeñas en el sistema, mientras que el pH nuevamente disminuye en casi una unidad de pH.

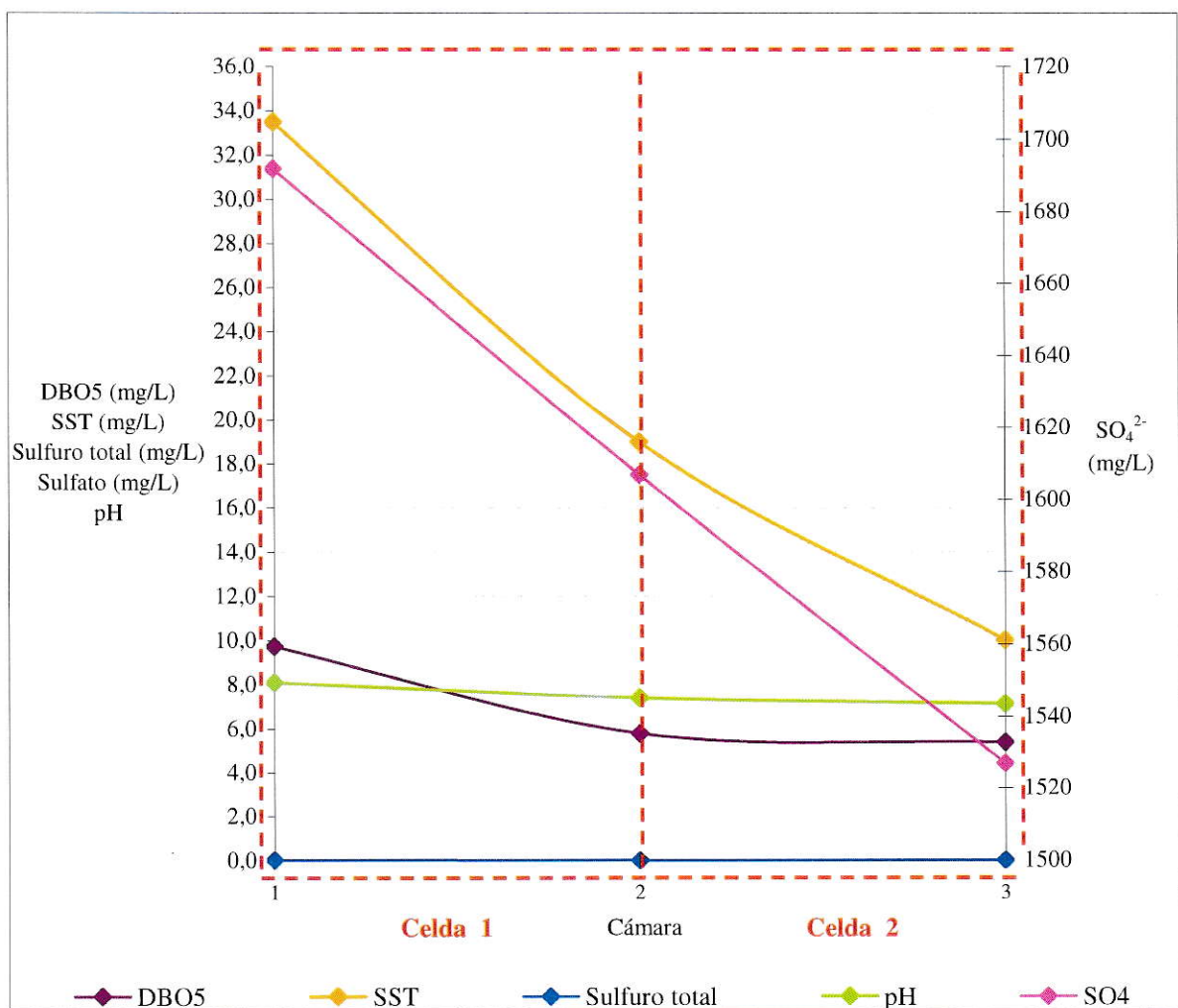


Figura 16: Gráfico tendencias promedio primera etapa

En el Gráfico se visualizan las tendencias promedio de la primera etapa. En la celda 1 se reduce la concentración de sulfato, SST y la DBO.

La reducción del sulfato es una tendencia esperada, pero se pretende que sea aún mayor con la adición de melaza en la segunda etapa. La DBO probablemente disminuye por el consumo de la materia orgánica biodegradable por parte de las bacterias sulfato-reductoras.

En la segunda celda, disminuye aún más la concentración de sulfato y de SST. La reducción del sulfato en esta celda no se condice con lo proyectado, por ser ésta una celda anaeróbica. Sin embargo, este comportamiento se puede deber a que algunos días se acumuló agua en la segunda celda, ya sea por obstrucción o porque se dejó cerrada la válvula de salida del sistema, lo que provoca la formación de un medio anaeróbico propicio para la formación de bacterias reductoras de sulfato.

La disminución de los SST en ambas celdas probablemente se debe a que el RIL permanece el tiempo suficiente en ellas para que estos decanten.

En cuanto al pH del efluente, este tiende a disminuir al pasar por el sistema, llegando a un valor cercano a 7, lo que puede deberse a la degradación de la M.O., lo que tiende a bajar el pH.

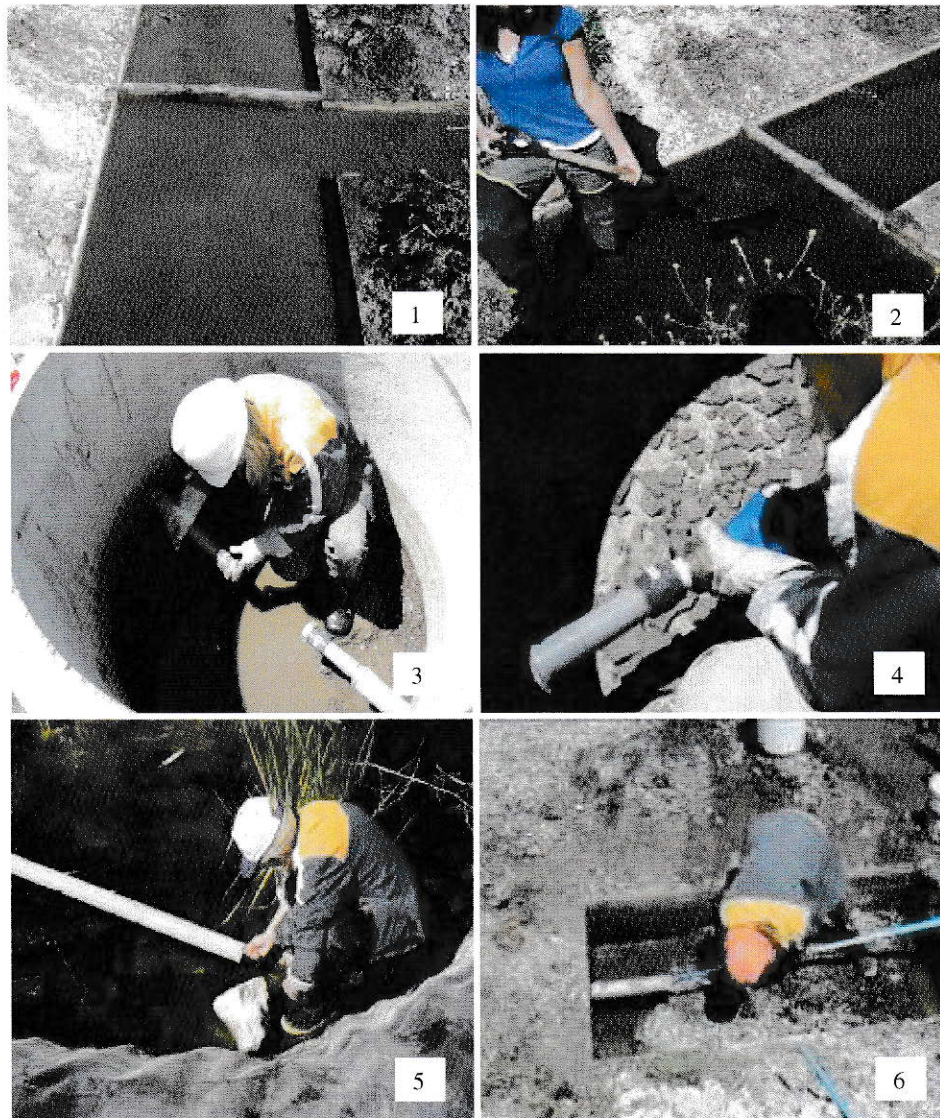
3.2. Segunda Etapa, Adición de Melaza: Intento Fallido

A fines del mes de octubre del 2007 se instalaron los paneles solares, capaces de generar energía eléctrica para la alimentación de la bomba dosificadora de melaza. De este modo se comenzó con la inyección de melaza al sistema (Figura 17).



Figura 17: Paneles solares y estanque de melaza

Resultó ser muy complicado determinar el caudal de ingreso del RIL al sistema, debido a la constante obstrucción del medidor de flujo de la entrada. Por esta complicación, en un comienzo sólo se realizaron labores de limpieza del prefiltro, de las cañerías y del medidor de flujo, además se registraron los valores de caudal. En la figura 18 aparecen fotografías que dan cuenta de la alta carga de sólidos del RIL de entrada y de las labores de limpieza, tanto del prefiltro, como del medidor de flujo de entrada y cañerías.



- | | |
|--|--|
| 1 Unidad de prefiltro con RIL con elevada carga de sólidos | 2 Limpieza de unidad de prefiltro |
| 3 Limpieza tubería unida a flujo-metro de entrada | 4 Limpieza flujo-metro de entrada |
| 5 Limpieza tubería celda 1 | 6 Limpieza tubería de salida prefiltro |

Figura 18: Labores de limpieza de humedal artificial

Al comienzo sólo se registraron los caudales de entrada y salida, de modo de lograr estabilizar el caudal de entrada y posteriormente determinar su valor con exactitud. Los valores registrados se muestran a continuación.

Tabla 11: Caudales de ingreso y salida segunda etapa

Fecha	RIL ingresado al sistema (m ³)	Caudal de ingreso (m ³ /día)	RIL evacuado del sistema (m ³)	Caudal de salida (m ³ /día)
19-10-07	695	-	437	0
23-10-07	800	26	437	0
31-10-07	814	2	437	0
07-11-07	814	0	437	0
13-11-07	899	14	437	0
03-12-07	-	-	555	6
18-12-07	-	-	825	18
04-01-08	-	-	828	0,2
23-01-08	-	-	828	0
04-02-08	-	-	828	0
15-02-08	-	-	1030	18
25-02-08	-	-	1080	5
07-03-08	-	-	1210	12

En la Tabla 11 se observa que a partir del día 03-12-07 no se registró el RIL de ingreso acumulado, lo cual se debe a que se decidió sacar el medidor de flujo de ingreso, por los problemas comentados con anterioridad. De este modo, sólo se continuó midiendo el RIL acumulado de salida, con la cual se calculó los caudales de entrada respectivos.

La válvula de salida, desde el 19-10-07 hasta el 13-11-07 se mantuvo cerrada, razón por la cual durante este período el RIL acumulado de salida se mantuvo constante.

Lo mismo sucedió con el periodo comprendido entre el 23-01-08 y el 04-02-08. Durante estos periodos la válvula de salida se mantuvo cerrada, porque el ingreso de agua clara era escaso, provocando el secado de la segunda celda. Al impedir la salida de RIL, se evita la desecación de la celda en cuestión y el deceso de las plantas presentes en la misma.

Para que el caudal de ingreso calculado por medio del caudal de salida se ajuste más al real, se calculó la evapotranspiración aproximada de la zona mediante la fórmula de Thornthwaite, para así considerar y sumar las pérdidas de agua por este proceso natural. Cabe destacar que el lugar de emplazamiento del sistema piloto, recibe una gran cantidad de radiación solar, por lo que este proceso cobra importancia. Los valores obtenidos para cada mes del año se muestran a continuación (cálculos en ANEXO 3):

Tabla 12: Evapotranspiración calculada

Mes	Evapotranspiración (m ³ /día)
Enero	2,0
Febrero	2,0
Marzo	1,9
Abril	1,5
Mayo	1,2
Junio	1,2
Julio	0,8
Agosto	1,1
Septiembre	1,2
Octubre	1,6
Noviembre	1,8
Diciembre	1,7

Los valores de caudales de ingreso calculados mediante la adición de la evapotranspiración, se muestran a continuación.

Tabla 13: Caudales de ingreso calculados

Fecha	Caudal de salida (m ³ /día)	Caudal de entrada calculado (m ³ /día)
19-10-07	0	0
23-10-07	0	0
31-10-07	0	0
07-11-07	0	0
13-11-07	0	0
03-12-07	6	7,7
18-12-07	18	19,7
04-01-08	0,2	1,9
23-01-08	0	0
04-02-08	0	0
15-02-08	18	20,4
25-02-05	5	7
07-03-08	12	13,8

En la Tabla 13 se observa una gran variación en el caudal de entrada, es decir, no fue posible mantenerlo estable. Esto impide determinar el caudal de ingreso de melaza adecuado.

Los valores de caudal de entrada calculados van desde 1,9 a 20,4 m³/día, con un promedio de 11,8 m³/día, considerando sólo los días en que ha ingresado agua al sistema. Si se consideran todos los días de esta segunda etapa, el caudal promedio es de 5,4 m³/día.

El caudal de entrada mínimo proyectado es de 6 m³/día, es decir, el caudal de ingreso promedio es inferior a este valor, por lo que no ha ingresado el agua suficiente al sistema, y además el ingreso no es constante ni controlable.

De todos modos, desde el día 23-01-08 se comenzaron a tomar muestras para realizar algunos análisis, de modo de conocer el comportamiento que estaba teniendo el sistema. Los análisis que se realizaron fueron sólo los posibles de efectuar en el laboratorio del área de Medio Ambiente de Fundación Chile, debido a que no se justificaba enviar a hacer los análisis a un laboratorio externo, sabiendo que el sistema no estaba actuando en plenitud. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla y Figuras:

Tabla 14: Resultados segunda etapa

Fecha	23-01-08			04-02-08			15-02-08			25-02-08			07-03-08		
Cámara	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Parámetros															
pH	9,06	7,16	7,39	8,98	7,16	7,57	8,77	7,54	7,69	9,05	7,29	7,57	8,33	7,29	7,57
CE (µS/cm)	3390	3850	4090	3470	3970	4430	3480	3690	3780	3500	3710	3950	3520	3710	3950
OD (%)	60,3	48,8	46,6	58,3	37,2	29	84,3	30,7	57,4	95,4	64,4	25,5	95,7	64,4	25,5
Sulfato total (mg/L)	1975	1875	1875	1825	1775	1250	2500	1800	1700	1850	1850	1800	2000	1750	1750

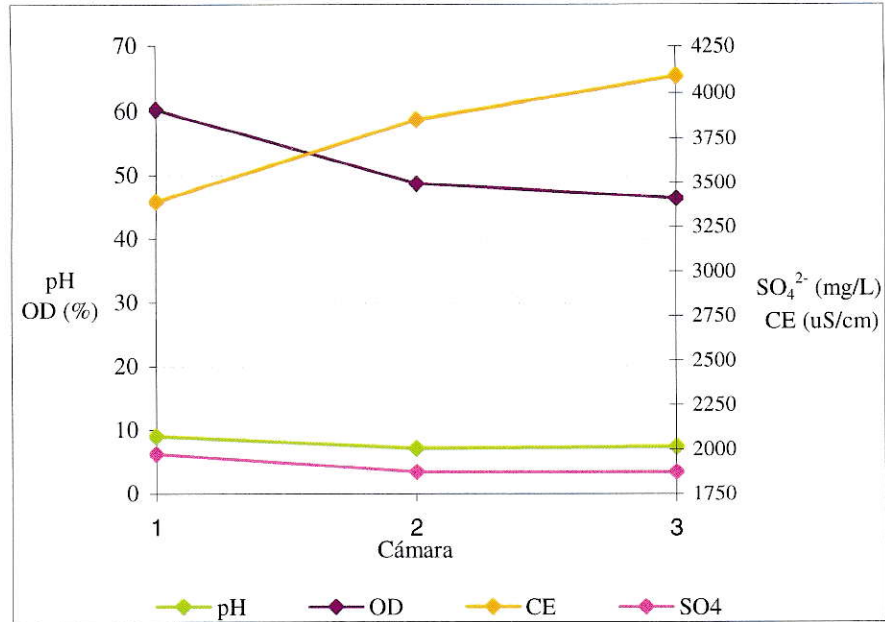


Figura 19: Medición día 23-01-08

En el Gráfico se observa que la concentración de sulfato disminuye en la primera celda, al igual que la de OD. Estas son tendencias esperadas, dado que en la primera celda se espera la formación de un medio anaeróbico, propicio para la reducción de sulfato.

Por otra parte la CE, aumenta tanto en la primera como segunda celda, lo que probablemente se debe a la solubilización de elementos y compuestos presentes en el humedal y también, en parte, al aporte de la melaza.

En relación al pH, este disminuye en la primera celda, probablemente debido a la degradación de la M.O., lo que, como se mencionó anteriormente, genera acidez. En la segunda celda, el pH tiende a mantenerse.

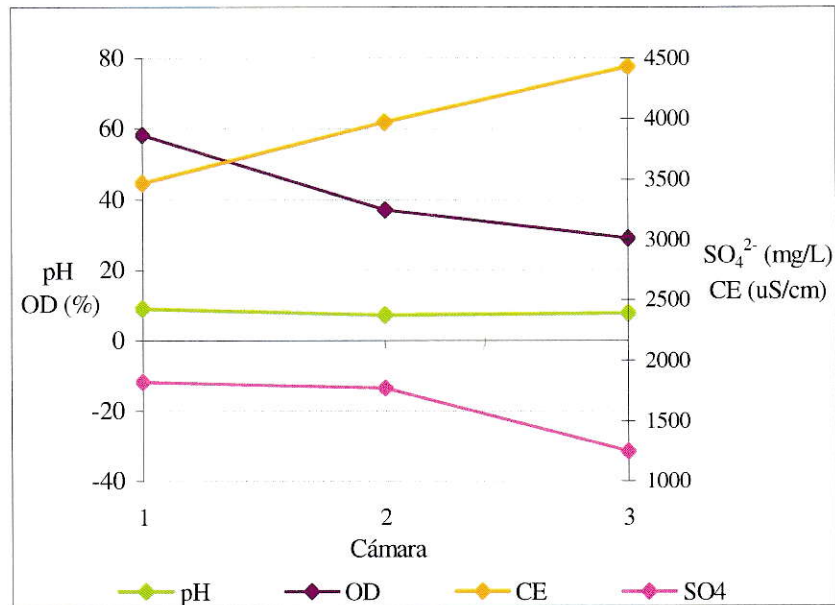


Figura 20: Medición día 04-02-08

En este caso, se produjo una disminución de la concentración de sulfato, sobre todo en la segunda celda, lo que concuerda con la disminución de la concentración de OD, que se reduce en ambas celdas. El comportamiento anaeróbico de la segunda celda se puede deber a que la válvula de salida de agua del sistema estuvo cerrada, por lo que se acumuló líquido en la segunda celda, formando un medio anaeróbico. Por otra parte, la CE aumenta y el pH disminuye, al igual que en el caso anterior.

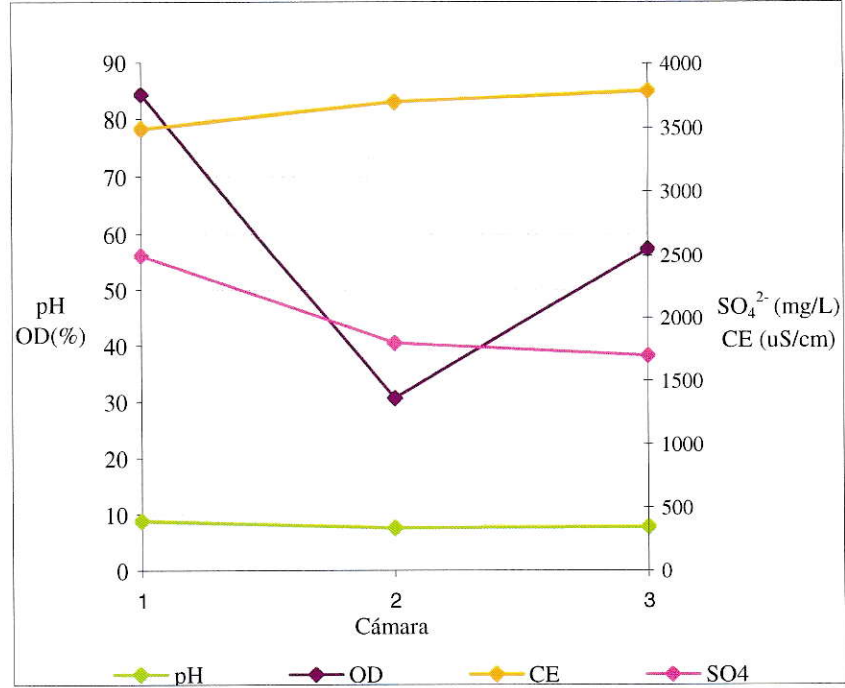


Figura 21: Medición día 15-02-08

En el Gráfico se observa una disminución de la concentración de sulfato más pronunciada en la primera celda, en la cual disminuye también la de OD. Este último parámetro aumenta en la segunda celda, tal como se espera. Al igual que en los casos anteriores la CE aumenta en el sistema y el pH disminuye en la primera celda.

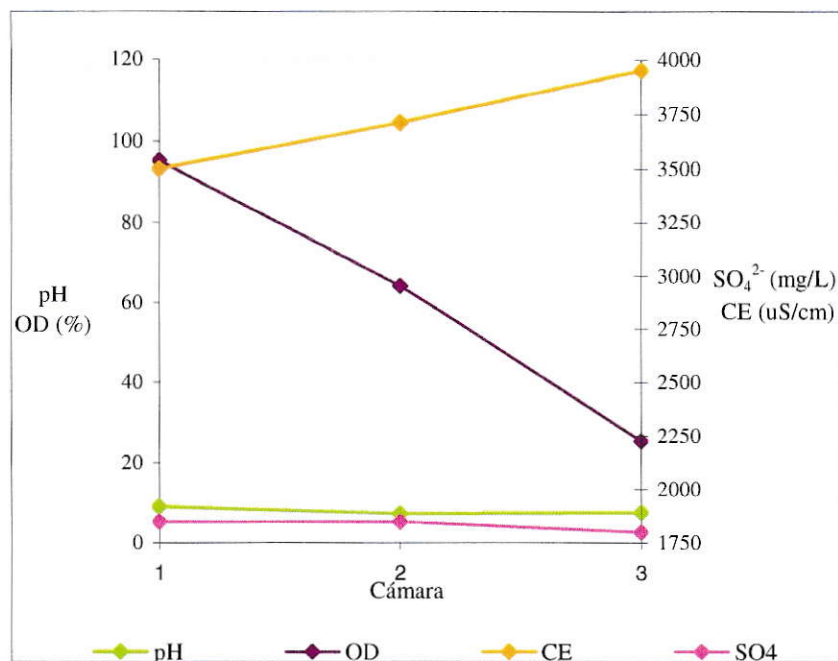


Figura 22: Medición día 25-02-08

En este caso se observa que la concentración de sulfato disminuye en la segunda celda. La concentración de OD se reduce en ambas celdas. Este comportamiento no se condice con el esperado, debido a que en la segunda celda debiera aumentar el OD, por ser aeróbica, y el sulfato por su parte, reducirse en la primera celda. Este comportamiento indica que la segunda celda está actuando de manera anaeróbica, y la primera no.

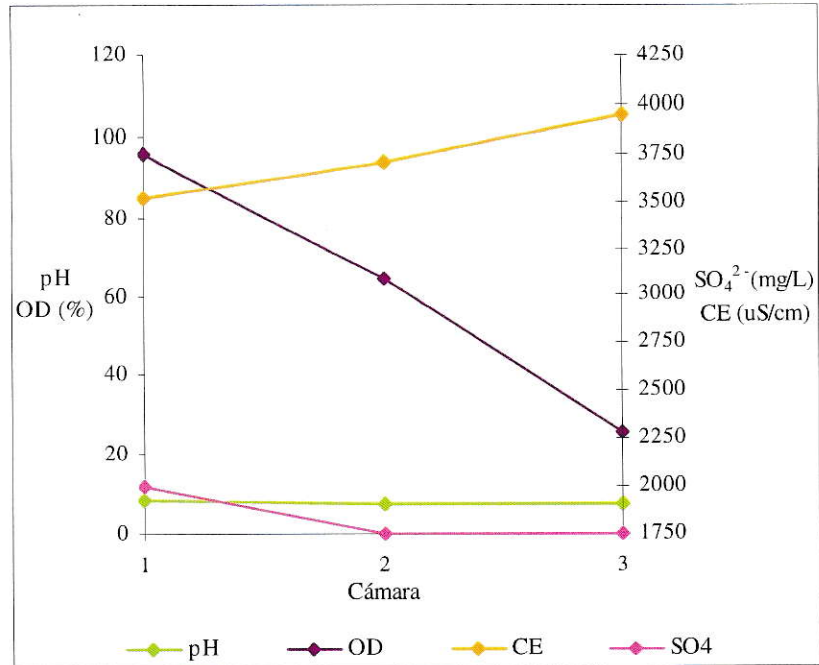


Figura 23: Medición día 07-03-08

En el Gráfico se observa una disminución de la concentración de sulfato en la primera celda, junto con la disminución del OD en la misma. Al igual que en los casos anteriores, la CE aumenta en el sistema y el pH disminuye en la primera celda.

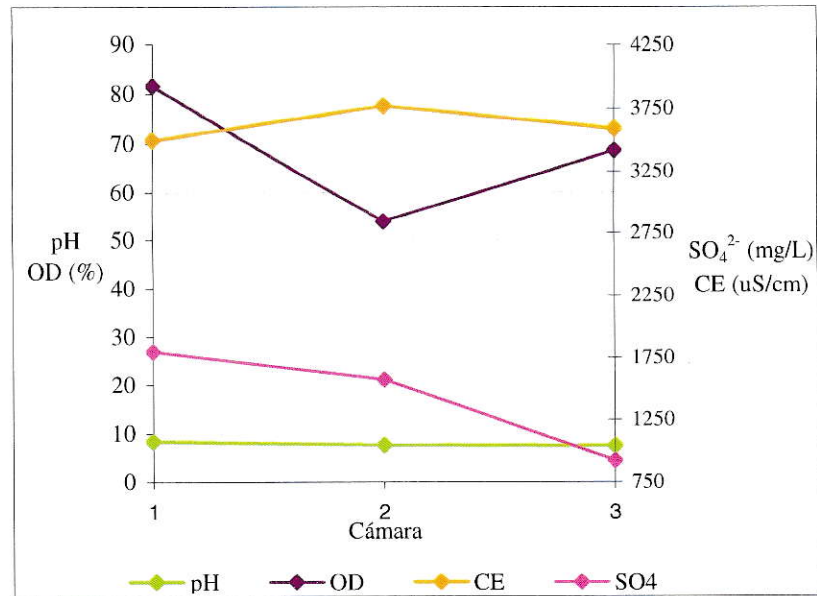


Figura 24: Medición día 20-03-08

En este caso se produjo una disminución de casi 1000 mg/L de sulfato en la segunda celda, mientras que en la primera disminuyó en menor proporción. El OD disminuye en la primera celda y aumenta en la segunda, lo que es esperado según el diseño del sistema, pero no se condice con la reducción del sulfato. Por otra parte la CE tiende a mantenerse en el sistema y no a aumentar como en los casos anteriores. El pH tiende a disminuir levemente, lo que no se aprecia con claridad en el Gráfico.

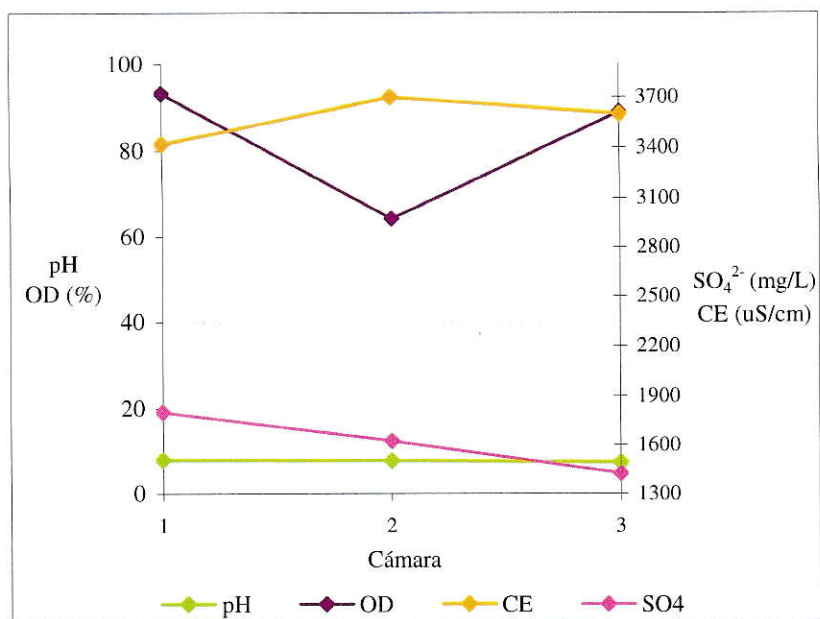


Figura 25: Medición día 11-04-08

En el Gráfico se observa que el parámetro OD disminuye en la primera celda y aumenta en la segunda, lo que se ajusta al comportamiento esperado. Sin embargo, la concentración de sulfato disminuye en ambas celdas. La CE tiende a aumentar en el sistema y el pH a disminuir acercándose a la neutralidad.

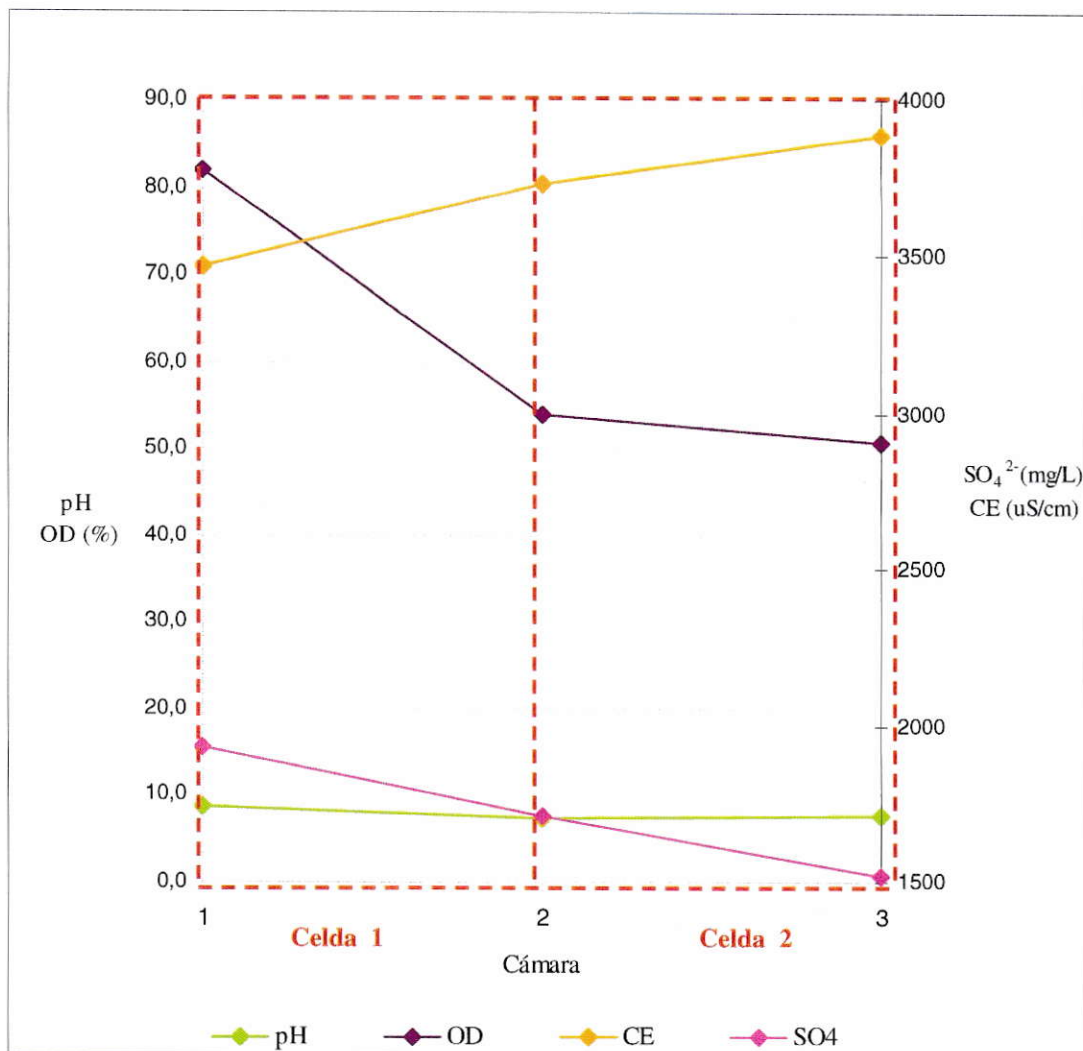


Figura 26: Gráficos tendencias promedio segunda etapa

En el Gráfico se visualizan las tendencias promedio de la segunda etapa. En la celda 1 se reduce la concentración de sulfato y la de OD, tal como se espera.

En la segunda celda, disminuye aún más la concentración de sulfato y tiende a mantenerse el valor de OD. La disminución de la concentración de sulfato, en una

proporción mayor en la segunda celda, no es la tendencia esperada, dado que esta teóricamente es una celda aeróbica, en la que la reducción del sulfato no debiera llevarse a cabo. Este comportamiento probablemente se debe a que la segunda celda en varias oportunidades ha estado saturada de agua, por el constante taponamiento del sistema, lo que provoca que actúe de manera anaeróbica

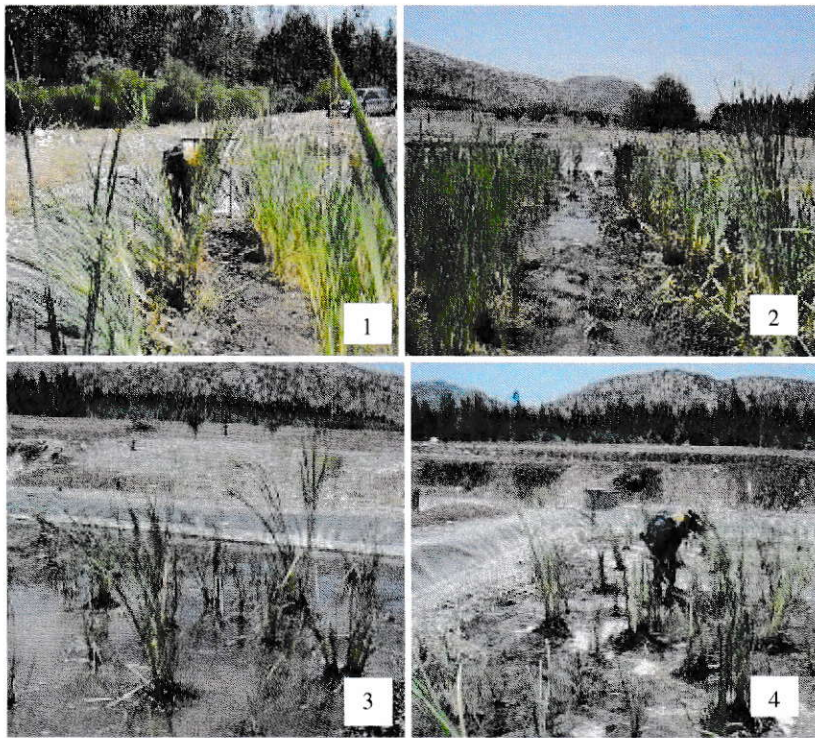
En cuanto a la CE, esta aumenta a lo largo del sistema, lo que no es lo esperado. Este hecho puede deberse, a la re-solubilización de elementos y compuestos que se encontraban depositados en ambas celdas del sistema piloto y también, en parte, a la melaza adicionada a la celda 1.

El pH del efluente tiende a bajar al pasar por el sistema, llegando a un valor cercano a 7, lo que puede relacionarse con la degradación de la M.O., proceso en el que se generan compuestos ácidos que disminuyen el pH.

Luego de este análisis, se puede afirmar que el sistema no se ha comportado como se esperaba, lo que se puede deber a varias razones. Una posibilidad es que el tiempo de residencia del RIL en la primera celda no sea el suficiente para que se lleve a cabo la reducción del sulfato en la proporción esperada, razón por la cual en la segunda celda se sigue reduciendo y en una proporción a veces mayor. Como se mencionó anteriormente, este último hecho probablemente ha sido posible, porque la segunda celda ha estado constantemente con el RIL por sobre la superficie, lo que permitiría que actúe de forma anaeróbica.

Que el sistema no este funcionando de manera efectiva, se puede deber también, a que la cantidad de melaza que se ha agregado es insuficiente para que las bacterias se desarrollen en plenitud. La cantidad no se ha aumentado, como ya se ha mencionado, por el bajo caudal de entrada y su constante variación. Cabe recordar que el plan de monitoreo inicial contemplaba ir aumentando la cantidad de melaza agregada (tabla 7), para determinar el óptimo a adicionar. Esta cantidad se iría aumentando paulatinamente para que las bacterias se fueran desarrollando poco a a poco. Hasta el momento, se ha adicionado el mínimo contemplado, y el valor ha sido fijo (1,5 L/día), lo que probablemente ha frenado la colonización del sistema con bacterias sulfato-reductoras.

Otro factor que posiblemente ha insidido en el bajo rendimiento del sistema, es que este ha sido muy intervenido, lo que no es recomendable, porque son sistemas sensibles. La constante intervención se debe a que ha sido necesario ingresar al sistema principalmente para destapar y limpiar cañerías, también para podar plantas secas luego de los periodos en que las celdas han estado secas, entre otras razones. Por ejemplo, el día 18-12-07 fue necesario sacar todas las plantas de la primera celda ubicadas sobre la cañería de entrada, ya que esta se tapaba constantemente con las raíces de las mismas (figura 27). Las plantas extraídas fueron implantadas en la segunda celda, para reemplazar a algunas de las originales que se encontraban secas. Todo este trabajo significó una gran intervención al sistema, lo que probablemente lo afectó negativamente.



1, 2 Extracción plantas celda 1
3, 4 Trasplante plantas a celda

Figura 27: Transplante de plantas celda 1 a 2 día 18-12-07

3.3 Tercera Etapa, Prueba a Escala Banco

Como se comentó con anterioridad, debido a que el plan de monitoreo contemplado al inicio no pudo ser llevado a cabo, se decidió montar una prueba a escala banco que permita determinar la capacidad de reducción de contaminantes del sistema, junto con el óptimo de adición de melaza.

Hasta el momento se han realizado sólo los primeros tres ciclos de operación de cinco proyectados para la prueba a escala banco. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes Tablas y Figuras:

Tabla 15: Resultados primer ciclo de operación prueba a escala banco

Día	pH	Eh (mV)	CE(μS/cm)	OD (%)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
0	7,92	230	3510	95,4	2050
4	7,22	-21,6	3560	42,8	2000
8	7,26	-44,2	3560	68,2	1975
11	7,22	-61,4	3550	51,9	2000
16	7,36	-40,0	3560	66,1	2000
21	7,37	-60,1	3560	44,6	2000
24	7,36	-70,4	3560	35,7	1950
36	7,37	-68,6	3560	37,1	1950

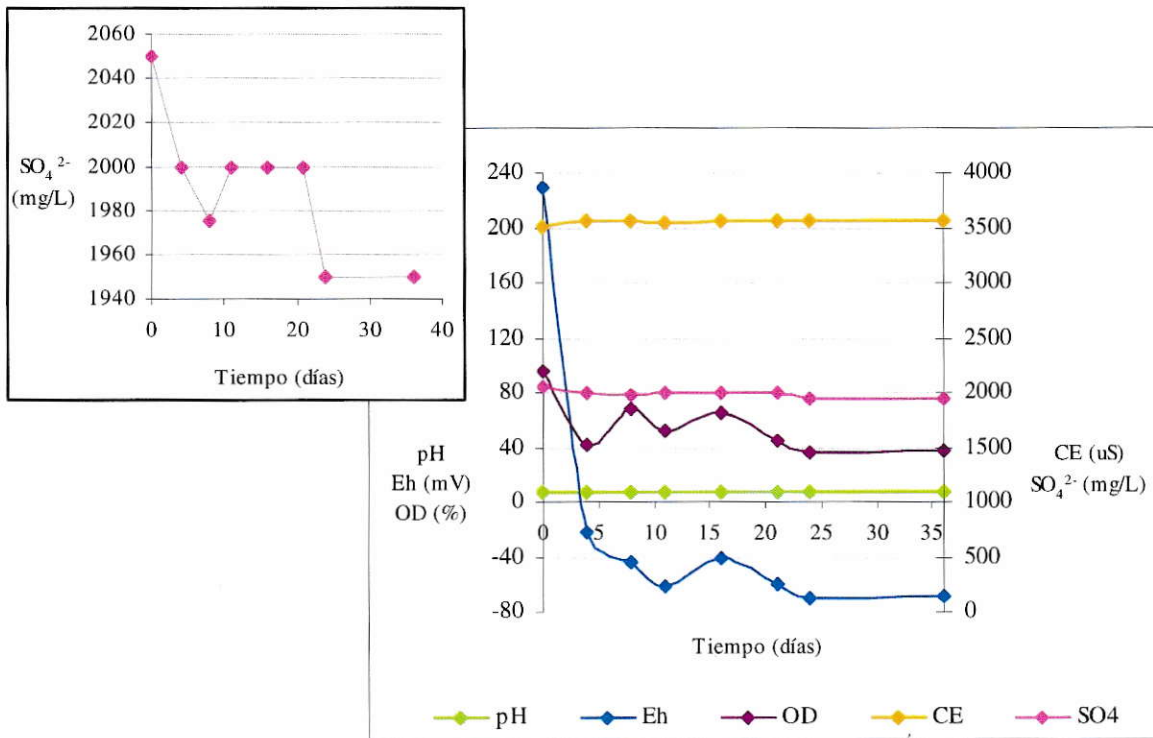


Figura 28: Gráfico primer ciclo de operación prueba a escala banco

En el Gráfico se observa que la concentración de sulfato se mantuvo prácticamente constante en esta prueba. Este hecho es esperado, dado que la cantidad de melaza adicionada es pequeña e igual a la cantidad probada en el sistema a escala piloto, en donde la concentración de sulfato no ha disminuido en una proporción considerable.

Por otra parte, los parámetros OD y Eh tienden a disminuir en el tiempo, ambos resultados esperados. Mientras más negativo es el valor del potencial, más reductor es el sistema, aunque el valor alcanzado en esta prueba no es lo suficientemente bajo para que se produzca la reducción del sulfato en una proporción considerable (según lo señalado en la introducción, este valor debiera bordear los -100 mV).

La CE tiende a mantenerse constante, aunque con leves oscilaciones. En el caso del pH, este tiende a disminuir, lo que puede ser atribuido a la degradación de la M.O.

Tabla 16: Resultados segundo ciclo de operación prueba a escala banco

Día	pH	Eh (mV)	CE(μ S/cm)	OD (%)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
0	7,44	272,9	3350	93,9	2025
4	7,38	-21,3	3630	57,6	1975
7	7,07	-47,8	3580	65,8	1950
11	7,18	-65,4	3600	59,4	1975
18	7,13	-63,7	3640	55,6	1725
22	7,15	-67,3	3520	46,3	1675
27	7,02	-90,0	3400	53,5	1725
35	7,13	-66,6	3340	35,5	1750

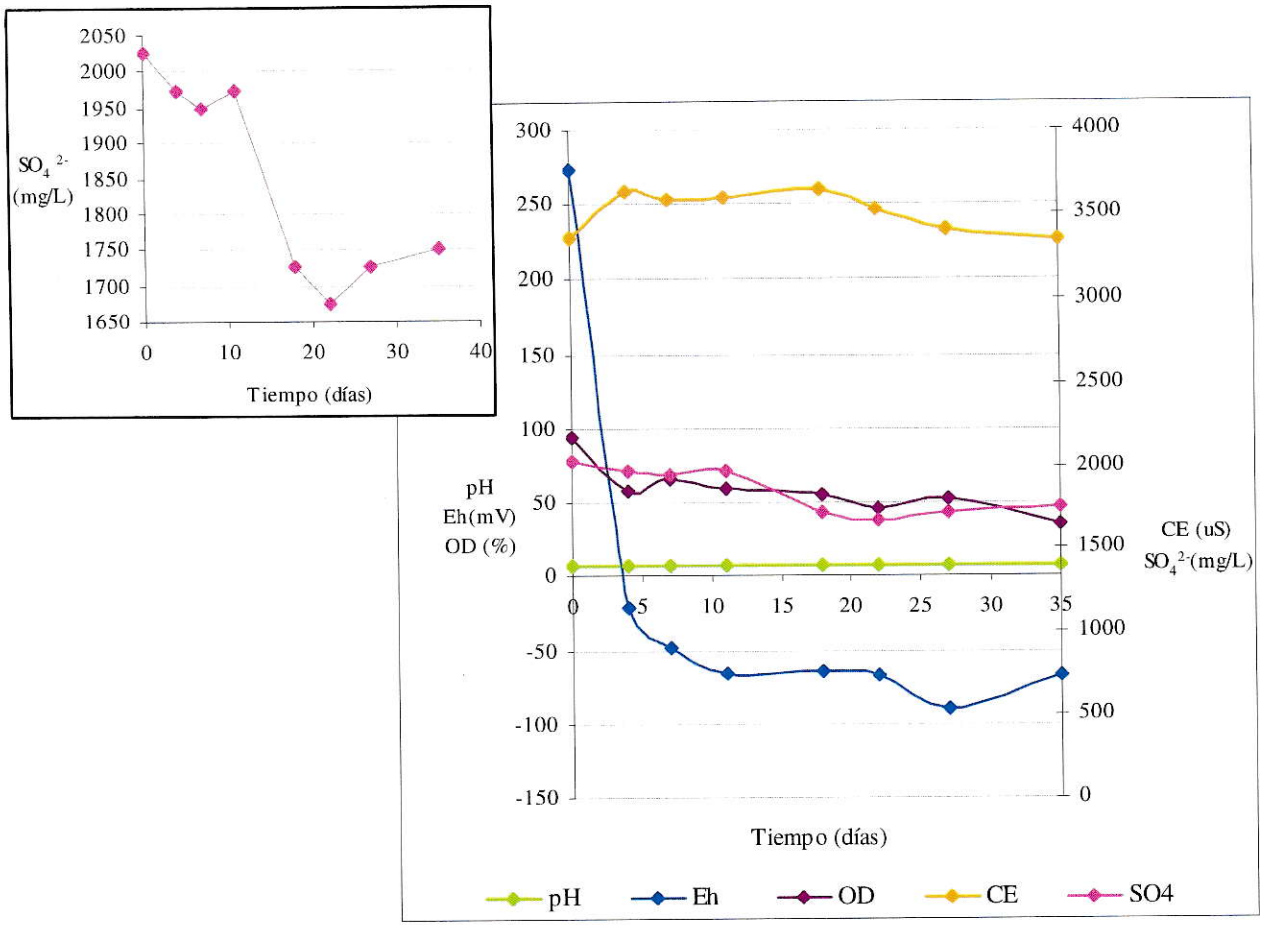


Figura 29: Gráfico segundo ciclo de operación prueba a escala banco

En este segundo ciclo se produjo una disminución en la concentración de sulfato superior a la observada en el ciclo anterior, lo cual puede atribuirse a la mayor cantidad de melaza adicionada. Los valores de Eh y OD disminuyen en el tiempo, comportamiento esperado y que demuestra la formación de un medio anaeróbico en la columna. La formación de este medio es trascendental para que se generen las colonias de bacterias que reducen al sulfato, lo que probablemente en este caso sucedió, dado que la concentración de este compuesto disminuyó.

En cuanto al pH, este también disminuye en esta prueba, lo que nuevamente puede atribuirse a la degradación de la M.O. Este hecho es de suma importancia, porque indica que la M.O. se encuentra disgregada en constituyentes orgánicos simples, los que pueden ser empleados por las bacterias sulfato-reductoras.

Tabla 17: Resultados tercer ciclo de operación prueba a escala banco

Día	pH	Eh (mV)	CE(μ S/cm)	OD (%)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
0	7,62	293,3	3330	85,8	2018
3	7,63	-75,8	3310	51,3	2025
7	7,57	-92,3	3300	38,6	1875
14	7,23	-136,2	3290	34,9	1800
20	7,14	-87,3	3230	35,4	1825
24	7,16	-97,5	3290	39,7	1675
27	7,10	-85,6	3290	42,2	1600
31	7,13	-73,4	3300	38,9	1650
35	7,16	-76,3	3300	42,3	1575

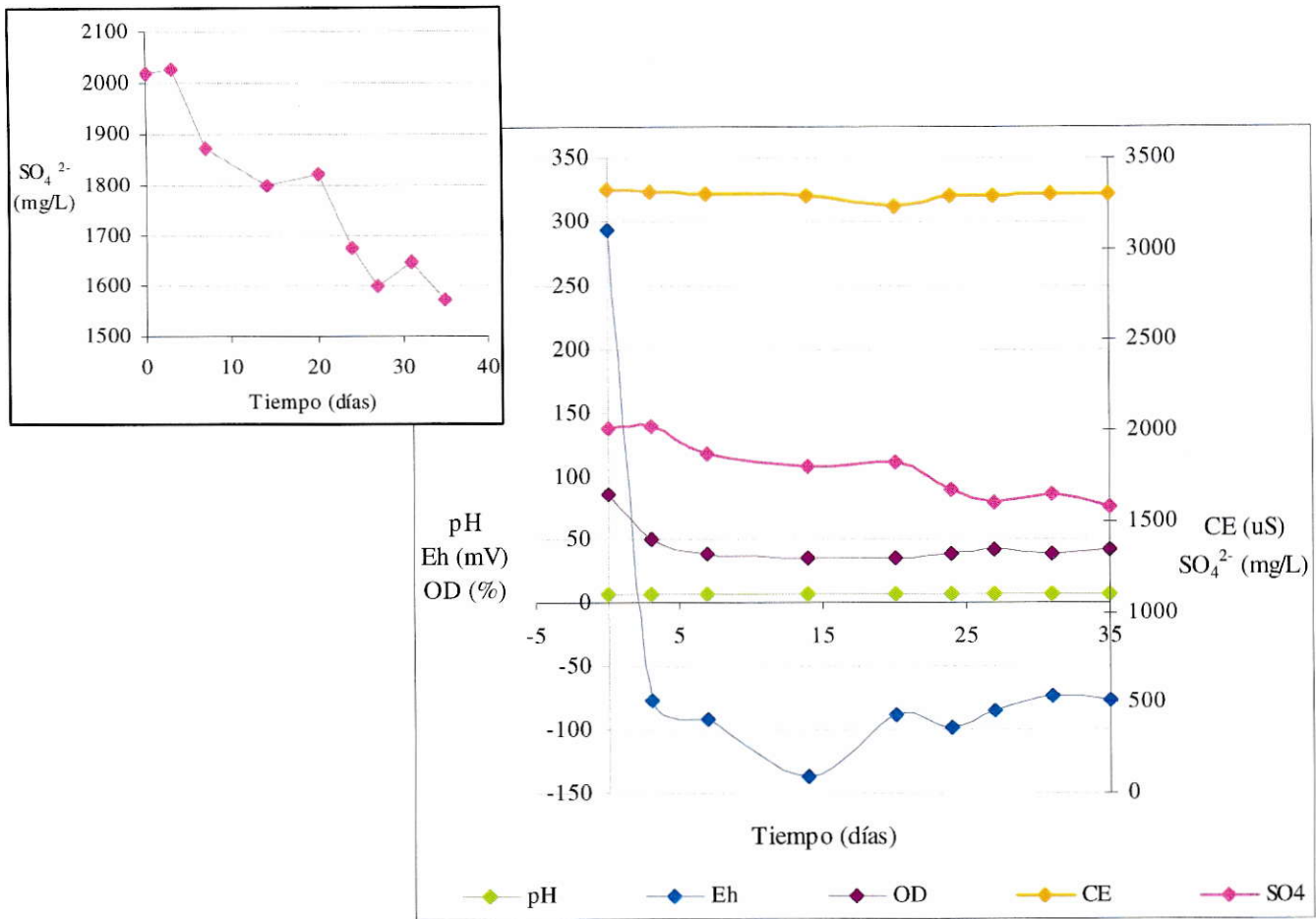


Figura 30: Gráfico tercer ciclo de operación prueba a escala banco

En el Gráfico se observa que la concentración de sulfato disminuyó en alrededor de 500 mg/L, lo que representa la mayor disminución de la concentración de sulfato medida en esta tercera etapa. Este hecho demuestra que la cantidad de melaza adicionada va en directa relación con la reducción de la concentración de sulfato, lo que es consistente con la teoría, dado que mientras más M.O. exista en el medio, más carbono y electrones tienen las bacterias para generar su energía necesaria para sobrevivir. Por lo anterior el medio se hace más favorable para la formación y

sobrevivencia de las bacterias, lo que se manifiesta en una mayor proporción de sulfato reducido.

Al igual que en la etapa anterior, los parámetros OD y Eh disminuyen y se mantienen bajos, lo que demuestra la generación del medio anaeróbico en la columna. Esta vez el valor de Eh alcanza valores inferiores a los de la etapa anterior, lo que representa un buen resultado, dado que mientras más reductor es el sistema, más propicio se hace para la reducción del sulfato.

Como se mencionó anteriormente, falta probar los dos últimos ciclos contemplados en el plan de monitoreo para determinar la cantidad óptima de adición de melaza. Para inferir cual sería el comportamiento que presentaría el sistema respecto a la reducción de sulfato al adicionar las dos cantidades de melaza que faltan por probar, se asumirá un comportamiento futuro lineal respecto al ya presentado. Para esto se realizó un gráfico de concentración de sulfato reducido en función de la proporción de melaza adicionada en cada caso (mL de melaza adicionados / L de RIL adicionados), el cual se muestra a continuación.

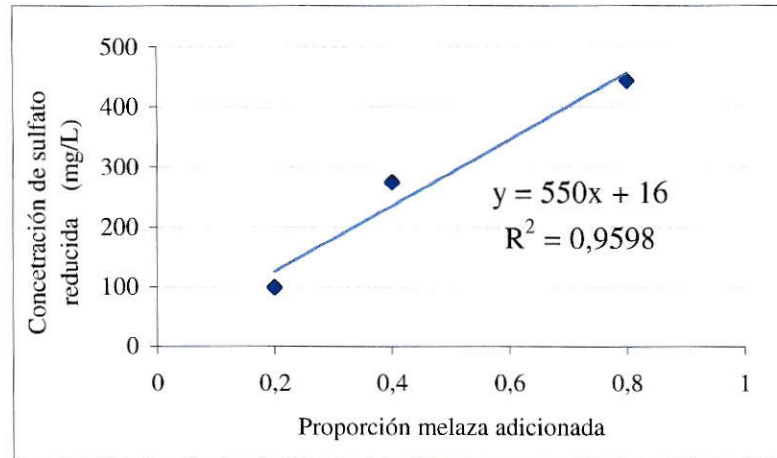


Figura 31: Gráfico tendencia de reducción de sulfato en prueba a escala banco

En el Gráfico se observa que existe una correlación lineal entre la proporción de melaza adicionada y la concentración de sulfato reducida (R^2 cercano a 1) . Si se reemplazan las dos proporciones de melaza que faltan por probar en la ecuación de la recta se obtiene que la reducción de sulfato que se obtendría al adicionar la cuarta y quinta cantidad proyectada sería 896 y 1116 mg/L respectivamente. Si estos valores se restan a una concentración inicial de sulfato de 2000 mg/L se obtiene una concentración teórica del efluente de salida de 1104 y 804 m/L respectivamente.

Si bien estos valores representan una disminución importante de la concentración de sulfato respecto a la concentración inicial, no alcanzan al valor proyectado (250 mg/L, valor de la norma). A partir de la ecuación de la recta se obtiene que se requeriría adicionar 63 mL de melaza a los 20 L de RIL que se adicionan a la columna para lograr obtener una concentración de 250 mg/L de sulfato en el efluente. Esta es una cantidad elevada, dado que si se proyecta al caudal mínimo de ingreso de

RIL al sistema (6.000 L/día) se obtiene que debieran adicionarse 19 L de melaza diarios al humedal. Si se proyecta al máximo caudal de ingreso de RIL (24.000 L/día) se obtiene que debieran adicionarse aproximadamente 76 L de melaza al día.

La adición de estas cantidades de melaza al humedal encarecerían bastante el sistema, dado que la melaza es un bien comercializado en el mercado, porque es utilizada como alimento para animales por su elevado valor nutricional.

Cabe recordar además que lo anterior se deduce a partir del supuesto de que la reducción del sulfato seguirá presentando un comportamiento lineal respecto a la cantidad de melaza adicionada (como en los ciclos anteriores), aunque es perfectamente posible que pudieran presentarse otras tendencias al adicionar más melaza.

Otro punto que es importante mencionar, es que los ciclos de operación se realizaron por aproximadamente 30 días (debido a la escasez de tiempo) y no hasta que se tuviera una cantidad de datos suficiente que permitieran demostrar que el sistema se estabilizó en un valor de concentración de sulfato. Por lo anterior, es posible que la concentración de este compuesto disminuya aún más si se mantiene cada ciclo de operación por un periodo mayor.

IV. CONCLUSIONES

A partir de la tercera y última etapa llevada a cabo fue posible determinar cómo se comporta el sistema al adicionar cantidades crecientes de melaza, permitiendo concluir que:

- Existe una correlación positiva entre la cantidad de melaza adicionada y la proporción en que se reduce el sulfato.
- Si el al adicionar cantidades de melaza mayores a las probadas en el sistema, este presenta la misma tendencia experimentada en los tres primeros ciclos de operación, se debieran adicionar aproximadamente entre 19 y 76 L diarios de melaza al humedal piloto, dependiendo del caudal de ingreso del efluente, para que la concentración de sulfato alcance el valor normado (250 mg/L). Estos valores son mayores a las proyectados inicialmente, lo que provocaría el encarecimiento del sistema si se decide escalarlo.

Para determinar la cantidad de melaza que debiera adicionarse al humedal piloto en función del caudal de ingreso de RIL, sería conveniente probar cada ciclo de operación hasta que la concentración de sulfato se mantenga constante y además continuar probando el sistema con cantidades mayores de melaza adicionadas para evaluar su comportamiento.

De todas formas, una vez determinada la cantidad antes mencionada mediante la prueba a escala banco, es de suma importancia probar los valores obtenidos en el humedal a escala piloto, dado que en este es posible probar el sistema en continuo, con caudales de ingreso de RIL mayores, variables y además se encuentra en el mismo lugar en el que se emplazaría el humedal a gran escala si se decidiese su construcción. Al mismo tiempo sería posible evaluar si en la celda 2 se produce la oxidación del excedente de M.O. aportado por la melaza, hecho que no se pudo probar en este trabajo.

Para la posible implementación del sistema a gran escala, se sugiere tener en cuenta las siguientes recomendaciones determinadas a partir de la ejecución de la primera y segunda etapas:

- Dado que es esencial tener control sobre los flujos del efluente en el humedal y que el agua clara a tratar posee una elevada carga de sólidos, debe evitarse que las cañerías y medidores de flujo del humedal se obstruyan constantemente. Por lo anterior se sugiere construir una unidad de prefiltro de mayor tamaño o más eficiente de modo que los sólidos sedimentables decanten antes de ingresar al sistema y no implantar la especie vegetal en las cercanías de las tuberías, dado que las raíces de los juncos se caracterizan por crecer rápida y profusamente, pudiendo tapar fácilmente las tuberías de ingreso de RIL en ambas celdas
- El sistema debe ser diseñado teniendo especial cuidado en que las alturas proyectadas a alcanzar por el efluente en cada celda sean efectivamente las

planeadas, dado que este parámetro es crucial para que la celda actúe de forma aeróbica o anaeróbica. Este hecho se comprobó cuando en la celda 2 el efluente alcanzó una altura de columna de RIL mayor a la proyectada, lo que provocó que se formara un medio anaeróbico propicio para la generación de bacterias sulfato-reductoras, aunque esta celda fue ideada y construida para que actúe de forma aeróbica.

Por otra parte, para la posible implementación del sistema a gran escala, se recomienda tener en cuenta y realizar estudios previos que permitan determinar:

- El efecto que provoca la altura de la columna de RIL en la celda 1, dado que se observó que mientras menor es la columna de RIL en la celda, menor es la reducción de sulfato medida. En la guía de la USEPA, 2000, se menciona que la altura de columna de RIL recomendada para humedales aeróbicos no debiera superar los 15 cm de profundidad, por lo que se infiere que sería recomendable una profundidad superior para humedales anaeróbicos, siendo que en este sistema la altura planeada para la celda anaeróbica son 10 cm
- El efecto que provoca la presencia y ausencia de especies vegetales en la celda 1 del humedal artificial, dado que las especies vegetales que se suelen emplear en estos sistemas, dentro de las cuales se encuentra la utilizada en el sistema en cuestión, se caracterizan por liberar cantidades significativas de oxígeno por sus raíces y rizomas, lo que iría en desmedro de la formación del medio anaeróbico

requerido. Este efecto se debe contrarrestar con el beneficio que implica tener estas especies vegetales como medio de soporte para las bacterias.

- El efecto que tendría en el humedal la implantación de inóculos con bacterias sulfato-reductoras en la celda 1 del humedal al momento de su construcción, para probar si así el sistema adquiere mayor efectividad en la remoción de sulfato, dado que la formación de bacterias es un etapa crucial para la efectividad del tratamiento.

Respecto a la hipótesis planteada en un comienzo, no fue posible comprobarla a cabalidad, dado que, aunque se determinó a través de la prueba a escala banco que el sistema es capaz de reducir parte del sulfato presente en las aguas claras en una proporción considerable, no se pudo comprobar que sea capaz de reducir sulfato hasta el valor objetivo planteado (250 mg/L, valor normado). Además no se pudo probar el sistema en la escala contemplada inicialmente (en humedal piloto) y en funcionamiento continuo.

Respecto al objetivo principal planteado, en cierta medida fue posible probar el sistema, pero no como se tenía contemplado al comienzo y aunque se establecieron algunas medidas de optimización, estas no pudieron ser comprobadas.

V. REFERENCIAS

1. Andia, M. & Lagos, G. (2001); Hacia la Integración de Aspectos Ambientales, Económicos y Comerciales en el Sector Minero, Costo de Cierre de Tranques de Relave en Chile; p. 117-129.
2. Barnes, L., Janssen, J., Sherren, J., Versteegh J.H., Koch R.O. y Sherren, P.J.H (1991); A New process for the microbial removal of Sulphate and heavy metals form contaminated waters extracted by a geohydrological control system; Trans IChemE; Vol 69, Part A.
3. Barton & Tomei, 1995 Barton, L. & Tomei, F . (1995); Characteristics and Activities of Sulfate-Reducing Bacteria; Biotechnology Handbooks, Vol. 8. Barton L.L.: Sulfate-Reducing Bacteria. Plenum Press, New York and London, p. 1-22.
4. British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks (2000); Ambient Water Quality Guidelines for Sulphate.
5. CONAMA (2004); Anteproyecto de Norma de Emisión para Molibdeno y Sulfato de Efluentes Descargados desde Tranques de Relave al Estero Carén; Resolución Exenta N°671.
6. Cole, S. (1998); The emergence of treatment wetlands; Environmental Science & Technolog; Vol 32, N°9, p. 218-223.
7. Convención Ramsar (1971); Acta Final de la Conferencia Internacional sobre la Conservación de los Humedales y las Aves Acuáticas; Artículo 1.
8. De la Cruz, E. (2006); Mitigacion of Acid Drainage in Underground Mines Applying Artificial Wetland, Case: Orcopampa Mine, Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr.; Vol. 9, N°17, p.69-74; ISSN 1561-0888
9. Delgado, K. (2003); Uso alternativo de residuos de caña de azúcar para la obtención de espumas rígidas de poliuretano; Tesis Profesional, Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela de Química.
10. Delpiano, R. (1998); Reuso Agrícola de Aguas Claras de Relaves Mineros; Memorias del Taller Internacional organizado por la FAO: Gestión de la Calidad del Agua y Control de la Contaminación en América Latina y el Caribe

11. Duarte, S. (1992); Desarrollo de un Bioreactor para la Reducción anaeróbica de sulfatos por *Desulfovibrio desulfuricans*; Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Química.
12. Gibson, G.R. (1990); Physiology and Ecology of the Sulphate-Reducing Bacteria; Journal of Applied Bacteriology; Vol 69; p 769-797.
13. Gopal, B. (1999); Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems; Water Science and Technology, Vol 40, núm: 3; p. 27-35
14. Herrera, L., Hernández, J.O., Ruiz P. y Gantenbein, S. (1991); *Desulfovibrio desulfuricans* Growth Kinetics; Environmental Toxicology and Water Quality; Vol. 6, p. 225-237.
15. INN (1978); Norma Chilena 1333: Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
16. Kadlec, R. (1983); The Bellaire wetland: wastewater alteration and recovery. Wetlands; p, 3, 44.
17. Lahora, A. (1999); Tratamientos Terciarios de Bajo Costo; Revista Hidropress; núm.13, p.16.
18. López, E., Anduvire, O y Baretino, D. (2002); Tratamientos Pasivos de Drenajes Acidos de Mina: Estado Actual y Perspectivas de Futuro. Boletín Geológico y Minero; Vol. 113, p. 3-21; ISSN: 0366-0176.
19. López, C. y Novoa, M. (1991); Microbiología de la Digestión Anaerobia de Aguas Residuales; Revista CNIC; Vol 22, p.1-2.
20. Manahan, S. (1991); Environmental Chemistry; 5ª Edición; Lewis.
21. Ordonez, A., Younger, P. & Jarvis, A. (1998); Depuración de agua de mina mediante humedal en UK; Procedimientos del X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia, Valencia, España; p. 307-317.
22. Parés, R. & Juarez, A. (1997); Bioquímica de los Microorganismos; Editorial Reverté, p.202 – 210. ISBN 8429174540
23. Pérez-Olmedilla, M. y Rojo, C. (2000); Función Depuradora de los Humedales I: Una revisión Bibliográfica sobre el Papel de los macrófitos. Humedales Mediterráneos; p. 115-122.

24. Pfenning, N., Widdel, F. y Truper, H.G (1978); The Dissimilatory Sulphate Reducing Bacteria
25. Postgate, J. R. (1956); Cytochrome C3 and desulphoviridin; pigments of the anaerobe *Desulphovibrio desulphuricans*. J. Gen. Microbiol., 14, 545-572
26. Richardson, C. (1985); Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands; Science núm: 228, p. 1424
27. Rodríguez, J., Torres, P., Marmolejo, L., Barba, L., Nrvæs, J. y Morán, A.(2005); Tratamiento Anaerobio de Lixiviados en Reactores UASB; Revista Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte Colombia, Vol.18, p.50 - 60
28. Seoáñez, M. (1999); Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño; Ediciones Mundi-Prensa; ISBN 8471148218
29. Trudinger, P.A y Chambers L.A (1985); Low Temperature Sulphate Reduction: Biological versus Abiological; CAN. J. EARTH SCI. 22; p. 1910-1984.
30. USEPA (2000); Handbook of Constructed Wetlands; ISBN 0-16-052999-9.
31. USEPA (2001); Guiding Principles for Constructed Treatment Wetlands: Providing Water Quality and Wildlife Habitat; EPA 843-B-00-003.

ANEXOS

ANEXO 1: Cálculo Volumen de RIL a Preparar para Prueba a Escala Banco

1. Cálculo Volumen de Poros de mezcla de Arena y Gravilla

– Densidad aparente (Da): $\frac{\text{masa sólido seco a la estufa}}{\text{volumen sólido sin compactar}} = \frac{152 \text{ g}}{100 \text{ mL}} = 1,52 \text{ g/mL}$

– Densidad real (Dr): $\frac{\text{masa de sólido seco a la estufa}}{\text{volumen de agua desplazado}^*} = \frac{76,7 \text{ g}}{30 \text{ mL}} = 2,56 \text{ g/mL}$

* volumen de agua desplazado : (volumen mezcla sólido/agua) - (volumen agua empleada)

$$\begin{aligned} &= 80 \text{ mL} - 50 \text{ mL} \\ &= 30 \text{ mL} \end{aligned}$$

– % sólidos : $(Da/Dr) \times 100 = (1,52/2,56) \times 100 = 60,2 \%$

– % volumen de poros: $100 - (\% \text{ sólidos}) = 100 - 60,2 = 39,8 \%$

– Volumen que ocupa grava 6 –10 mm en columna = $\pi \times \text{radio}^2 \times \text{altura}$
= $\pi \times (13,75 \text{ cm})^2 \times 65 \text{ cm}$
= 38.607 cm^3
= $38,61 \text{ L}$

– Volumen de poros de grava 6 –10 mm = (volumen total grava) \times (% volumen poros)
= $38,61 \text{ L} \times 0,398$
= $15,36 \text{ L}$

2. Cálculo Volumen de Poros de Grava

– Densidad aparente (Da): $\frac{\text{masa sólido seco a la estufa}}{\text{volumen sólido sin compactar}} = \frac{902 \text{ g}}{700 \text{ mL}} = 1,29 \text{ g/mL}$

– Densidad real (Dr): $\frac{\text{masa de sólido seco a la estufa}}{\text{volumen de agua desplazado}^*} = \frac{644,3 \text{ g}}{250 \text{ mL}} = 2,58 \text{ g/mL}$

* volumen de agua desplazado : (volumen mezcla sólido/agua) - (volumen agua empleada)

$$\begin{aligned} &= 750 \text{ mL} - 500 \text{ mL} \\ &= 250 \text{ mL} \end{aligned}$$

- % sólidos : $(D_a/D_r) \times 100 = (1,29/2,58) \times 100 = 50 \%$

- % volumen de poros: $100 - (\% \text{ sólidos}) = 100 - 50 = 50 \%$

- Volumen que ocupa grava 6 -10 mm en columna = $\pi \times \text{radio}^2 \times \text{altura}$
= $\pi \times (13,75 \text{ cm})^2 \times 35 \text{ cm}$
= 20.788 cm^3
= $20,78 \text{ L}$

- Volumen de poros de grava 6 -10 mm = (volumen total grava) \times (% volumen poros)
= $20,78 \text{ L} \times 0,5$
= $10,47 \text{ L}$

3. Cálculo Volumen Columna de RIL Superior

- Volumen de ril superior = $\pi \times \text{radio}^2 \times \text{altura}$
= $\pi \times (13,75 \text{ cm})^2 \times 10 \text{ cm}$
= 5.939 cm^3
= $5,94 \text{ L}$

4. Cálculo volumen Total de RIL

- Volumen total de ril = (volumen poros grava 0-10 mm) + (volumen poros grava 19-38 mm) + (volumen de columna de ril superior)
= $15,36 \text{ L} + 20,78 \text{ L} + 5,94 \text{ L}$
= 32 L

ANEXO 2: Cálculo de Cantidad de Melaza a Adicionar en Prueba Escala Banco

1. Cantidad 1

Datos:

- Caudal ingreso RIL primer ciclo de operación = $6 \text{ m}^3/\text{día}$
- Caudal ingreso melaza para primera cantidad a probar = $1,2 \text{ L/día}$

6000 L RIL	-----	1,2 L melaza
32 L RIL	-----	x L melaza

x = 6,4 mL de melaza

2. Cantidad 2

Datos:

- Caudal ingreso RIL segundo ciclo de operación = $6 \text{ m}^3/\text{día}$
- Caudal ingreso melaza para primera cantidad a probar = $2,4 \text{ L/día}$

6000 L RIL	-----	2,4 L melaza
32 L RIL	-----	x L melaza

x = 12 mL de melaza

3. Cantidad 3

Datos:

- Caudal ingreso RIL tercer ciclo de operación = $6 \text{ m}^3/\text{día}$
- Caudal ingreso melaza para primera cantidad a probar = $4,8 \text{ L/día}$

6000 L RIL	-----	4,8 L melaza
20 L RIL	-----	x L melaza

$$x = 16 \text{ mL de melaza}$$

4. Cantidad 4

Datos:

- Caudal ingreso RIL cuarto ciclo de operación = $6 \text{ m}^3/\text{día}$
- Caudal ingreso melaza para primera cantidad a probar = $9,6 \text{ L/día}$

6000 L RIL	-----	9,6 L melaza
20 L RIL	-----	x L melaza

$$x = 32 \text{ mL de melaza}$$

5. Cantidad 5

Datos:

- Caudal ingreso RIL quinto ciclo de operación = $6 \text{ m}^3/\text{día}$
- Caudal ingreso melaza para primera cantidad a probar = 12 L/día

6000 L RIL	-----	12 L melaza
20 L RIL	-----	x L melaza

x = 40 mL de melaza

ANEXO 3: Cálculo de Evapotranspiración Zona de Emplazamiento Humedal Piloto

La ecuación para calcular la evapotranspiración mediante el método de Thornthwaite es la siguiente

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} * (N/12) * (d/30) \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

$ETP_{\text{sin corregir}}$ = ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol teóricas

N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud

D = número de días del mes

La $ETP_{\text{sin corregir}}$ se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 [(10 t) / I]^\alpha \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

t = temperatura media mensual en °C

I = índice de calor anual, es la sumatoria de los 12 índices de calor mensual (i)

$$i = (t/5)^{1,514}$$

$$\alpha = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0,49239$$

Como lo indica la ecuación para calcular la $ETP_{\text{sin corregir}}$ es necesario conocer los valores de temperatura media mensual. Los valores con los que se cuenta son del año 2003 y para la ciudad de Santiago. El emplazamiento del humedal artificial es en una zona cercana a la Región Metropolitana, por lo que los valores utilizados permiten obtener valores aproximados de evapotranspiración en la zona en cuestión. Los valores de temperatura media con los que se cuenta se muestran a continuación.

Tabla 18: Temperatura media mensual Santiago, año 2003.

Mes	T° media mensual * (°C)
Enero	20,1
Febrero	19,3
Marzo	18,0
Abril	14,3
Mayo	11,8
Junio	11,5
Julio	8,90
Agosto	10,5
Septiembre	12,0
Octubre	15,4
Noviembre	17,4
Diciembre	18,0

* Los datos fueron obtenidos de la página web de la Estación de Investigaciones Ecológicas Mediterráneas (IDIEM)

Con los datos de la tabla 13 es posible calcular los valores de i , los cuales se muestran a continuación.

Tabla 19: Índices de calor mensual (i)

Mes	i
Enero	8,219
Febrero	7,728
Marzo	6,954
Abril	4,908
Mayo	3,669
Junio	3,529
Julio	2,394
Agosto	3,075
Septiembre	3,764
Octubre	5,491
Noviembre	6,606
Diciembre	6,954

Con los valores de i es posible calcular I y α , cuyos valores son:

$$I = 63,292$$

$$\alpha = 1,48887518$$

De este modo es posible calcular la ETP sin corregir, valores que se muestran a continuación.

Tabla 20: Valores de ETP sin corregir

Mes	ETP sin corregir (mm/mes)
Enero	89,39
Febrero	84,15
Marzo	75,85
Abril	53,85
Mayo	40,45
Junio	38,93
Julio	26,58
Agosto	34,00
Septiembre	41,47
Octubre	60,13
Noviembre	72,12
Diciembre	75,85

Para calcular la ETP es necesario conocer el número máx. de horas de sol para cada mes, para lo cual se utilizó la siguiente tabla.

Tabla 21: Número máx. horas de sol (Doorenbos y Pruit, 1977)

Lat. Norte	E	F	Mr	A	My	Jn	Jl	A	S	O	N	D
Lat Sur	Jl	Jn	My	A	Mr	F	E	F	Mr	A	My	Jn
50	8,5	10,0	11,8	13,7	15,3	16,3	15,9	14,4	12,6	10,7	9,0	8,1
48	8,8	10,2	11,8	13,6	15,2	16,0	15,6	14,3	12,6	10,9	9,3	8,3
46	9,1	10,4	11,9	13,5	14,9	15,7	15,4	14,2	12,6	10,9	9,5	8,7
44	9,3	10,5	11,9	13,4	14,7	15,4	15,2	14,0	12,6	11,0	9,7	8,9
42	9,4	10,6	11,9	13,4	14,6	15,2	14,9	13,9	12,9	11,1	9,8	9,1
40	9,6	10,7	11,9	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,2	10,0	9,3
35	10,1	11,0	11,9	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,3	10,3	9,8
30	10,4	11,1	12,0	12,9	13,6	14,0	13,9	13,2	12,4	11,5	10,6	10,2
25	10,7	11,3	12,0	12,7	13,3	13,7	13,5	13,0	12,3	11,6	10,9	10,6
20	11,0	11,5	12,0	12,6	13,1	13,3	13,2	12,8	12,3	11,7	11,2	10,9
15	11,3	11,6	12,0	12,5	12,8	13	12,9	12,6	12,2	11,8	11,4	11,2
10	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7	12,6	12,4	12,1	11,8	11,6	11,5
5	11,8	11,9	12,0	12,2	12,3	12,4	12,0	12,3	12,1	12,0	11,9	11,8
0° Ecuador	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

Como la zona de emplazamiento del humedal artificial está aproximadamente a 33° de latitud sur, se extrapolo el valor de horas de sol para esta latitud, obteniéndose los siguientes valores.

Tabla 22: Número máx. horas de sol a 33° L Sur

Mes	Máx. horas de sol
Enero	10,2
Febrero	10,5
Marzo	11,4
Abril	12,4
Mayo	13,4
Junio	13,9
Julio	14,1
Agosto	14,0
Septiembre	13,0
Octubre	11,9
Noviembre	11,1
Diciembre	10,3

Con estos datos es posible calcular la ETP, valores que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 23: Valores ETP mensual zona de emplazamiento

Mes	ETP (mm/mes)	ETP * ((L/m ²)/día)
Enero	78,5	2,5
Febrero	71,2	2,5
Marzo	74,5	2,4
Abril	55,6	1,9
Mayo	46,7	1,5
Junio	45,1	1,5
Julio	32,3	1
Agosto	41,0	1,3
Septiembre	44,9	1,5
Octubre	61,6	2
Noviembre	68,9	2,3
Diciembre	67,3	2,2

* La unidad mm es igual a L/m²

La superficie del humedal artificial que experimenta la evapotranspiración son 800 m² (suma superficie ambas celdas), por lo que la ETP debe multiplicarse por este valor. A continuación se muestran estos valores en donde además los L fueron transformados a m³.

Tabla 24: Valores ETP mensual del humedal artificial

Mes	ETP (m³/día)
Enero	2,0
Febrero	2,0
Marzo	1,9
Abril	1,5
Mayo	1,2
Junio	1,2
Julio	0,8
Agosto	1,1
Septiembre	1,2
Octubre	1,6
Noviembre	1,8
Diciembre	1,7