



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL USO DE LOMBRIFILTRO COMO ALTERNATIVA AL TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARRAGENINA

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el título de Ingeniero Civil Químico

MARCELO ANDRÉS BRAVO MARINNI

Profesora Tutora: Paola Bustos Gutiérrez

Ingeniero Supervisor: Claudio San Martín Jara

Concepción, 31 de Julio, 2019

RESUMEN

Danisco Chile S.A es una empresa productora de carragenina la cual es utilizada como gelificante, espesante y/o estabilizante en la industria alimenticia. De su proceso productivo se generan residuos líquidos industriales (RILes), los cuales son tratados actualmente por un proceso de separación física, coagulación y floculación, el cual entrega altos valores en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y la demanda química de oxígeno (DQO). Por tanto, el objetivo de este trabajo fue desarrollar una alternativa basada en un biofiltro a escala de laboratorio para la reducción de los parámetros de DBO_5 y DQO en los residuos líquidos industriales derivados del proceso productivo sin considerar el uso de reactivos químicos o generación de lodos.

Se realizaron pruebas a nivel de laboratorio, en donde se confeccionó un lombrifiltro mediante 4 capas filtrantes. En orden ascendente, la primera y segunda capa a base de piedras de distintos tamaños, una tercera capa de arena y para finalizar una mezcla de compostaje para lombrices, aserrín y tierra de hoja en donde se dispusieron los organismos. Se realizaron 2 pruebas con la campaña 1041, con RIL diluido y otra sin diluir. El caudal de alimentación fue de 2 L/h con un tiempo de retención hidráulico de 2 horas. Como resultado de estos ensayos se obtuvo una reducción en los parámetros de DBO_5 en un 77% y 60%, DQO en un 78% y 58% y sólidos suspendidos totales en un 98% y 97% para RIL tratado diluido y no diluido, respectivamente, en comparación al RIL crudo sin tratar.

Dado los buenos resultados, se analizó la factibilidad económica de instalar el sistema de tratamiento a escala industrial, haciendo uso de un espacio cerca de planta de RILes que actualmente se utiliza como almacenamiento intermedio para la torre de enfriamiento. Se consideró un sistema constituido por bolones de roca, roca más fina y arena que cubrieran una altura de 0,5 m, más 0,8 m cubiertos por viruta, compost, humus de lombriz y lombrices. Así, el análisis económico mostró que el proyecto sería económicamente viable a escala industrial para la campaña 1041, con un aumento del VAN a 10 años de 2,53 MUSD. En conclusión, se demostró que es factible reducir DBO_5 y DQO en RILes de una de las campañas de Danisco Chile. Por otro lado, en la medida que confirmen estos resultados para las demás campañas, se demostró que la instalación y operación del lombrifiltro a escala industrial es factible técnica y económicamente.

AGRADECIMIENTOS

No podría comenzar sin agradecer a mi familia, un apoyo fundamental durante el desarrollo de no solo mi carrera universitaria, si no de mi vida. Agradecer a mi madre Paola Marinni, a mi abuela Raquel Noches y a mi hermana Ignacia Cabrera por el apoyo día a día en los momentos difíciles y los no tanto. A mi padre, Marcelo Bravo, por siempre darme los consejos correctos en tiempos de duda, hacerme la vida más fácil y su preocupación de que nunca me falte nada.

Por otra parte, agradecer a toda la gente que conocí durante mi vida universitaria, que no solo se convirtieron en compañeros, sino que también en amigos. Especial mención a Rodrigo Gallardo, por siempre sacar risas, incluso en situaciones adversas de estrés y preocupación. Aprendí junto a él lo que era el éxito académico cuando uno se lo propone y la satisfacción que entrega el ser reconocido por tus pares cuando haces las cosas bien. Mencionar también a Soledad Belmar, una gran amiga que me sacó de apuros universitarios más de una vez, siempre extendiendo la mano para ayudarme, enseñándome lo que es la responsabilidad y constancia para lograr lo que uno quiere.

Asimismo, quisiera agradecer a toda la gente que hizo muy grata mi estadía en DuPont. A Claudio San Martín por darme la oportunidad de realizar mi práctica y habilitación profesional, además de darme a conocer la realidad de la química industrial. A Diego Kretschmar, por siempre explicar las cosas desde un punto de vista ingenieril cuando surgían dudas, que de seguro siempre me serán útil. A Elena Oyarzún, que fue mi guía dentro de la empresa durante las primeras semanas y compañera de tesis durante este largo proceso. A Camilo Angel, por su disposición a solucionar todos los problemas que me surgían y a José “el chamo” García que, sin su ayuda y alegría, este trabajo no hubiese sido posible.

Para finalizar, agradecer a la escuela de Ingeniería Civil Química de la Universidad del Bío-Bío por brindarme todas las herramientas para mi formación como profesional. Especial mención a mi profesora guía Paola Bustos, que siempre tuvo una excelente disposición para ayudar, corregir y aportar en el trabajo que se presenta a continuación.

Finalmente agradecer a todas las personas que consciente e inconscientemente aportaron un granito de arena en este largo proceso, que por cuestión de espacio no puedo mencionarlos a todos.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
TABLA DE CONTENIDOS	iii
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Datos generales de la empresa.....	1
1.2 Descripción planta tratamiento de RILes	1
1.2.1 Pretratamiento	1
1.2.2 Tratamiento primario	2
1.2.3 Lodos y clarificado	2
1.3 Situación actual planta tratamiento de RILes.....	3
2. PLANTEAMIENTO SITUACIÓN PROBLEMA.....	4
2.1 Generación de lodos.....	4
2.2 Utilización de químicos.....	5
2.3 Parámetros de medición de RILes	6
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1 Gestión del agua.....	7
3.1.1 Regulación Chilena para efluentes	7
3.2 Aspectos generales de residuos líquidos industriales.....	8
3.2.1 Características físicas de las aguas residuales.....	8
3.2.2 Características químicas de las aguas residuales.....	9

3.3 Pasos convencionales para el tratamiento de RILes	10
3.3.1 Tratamiento preliminar.	11
3.3.2 Tratamiento primario.	11
3.3.3 Tratamiento secundario.....	11
3.4 Descripción del sistema lombrifiltro.....	14
3.4.1 Estructura de un lombrifiltro	15
3.4.2 Mecanismo de acción de las lombrices	16
3.5 Variables de interés en el sistema	17
3.5.1 Condiciones de operación	17
3.5 Métodos de alimentación.....	18
3.5.1 Tiempo de retención hidráulico.....	18
3.5.2 Tasa de carga hidráulica	19
4. OBJETIVOS	20
4.1 Objetivo General.....	20
4.2 Objetivos Específicos.....	20
5. METODOLOGÍA	21
5.1 Recursos, materiales y equipos.....	21
5.2 Procedimiento	22
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
6.1 Análisis de muestras.....	23
6.2 Proyección industrial.....	25
6.3 Evaluación económica	29
6.3.1 Consideraciones.....	29
6.3.2 Estado actual de flujo de caja.....	30
6.3.3 Valor actual neto	31

6.3.4 Inversión	31
6.3.5 Proyección estimada anual con el sistema de lombrifiltro implementado.....	32
7. CONCLUSIONES.....	33
8. RECOMENDACIONES.....	34
9. REFERENCIAS	35
ANEXOS	38
ANEXO A. Diagrama de bloques planta tratamiento de RILes actual utilizado en DuPont Planta Pargua.....	38
ANEXO B. Ficha de seguridad Cloruro Férrico	39
ANEXO C. Parámetros de descarga fuera de la protección litoral.	40
ANEXO D. Imágenes lombrifiltro a escala de laboratorio	41
ANEXO E. Normas chilenas para la medición de distintos parámetros.....	43
ANEXO F. Sección de reemplazo por el lombrifiltro.	44

GLOSARIO DE TÉRMINOS

IPA: Alcohol Isopropílico.

KCl: Cloruro de Potasio.

pH: Indica la concentración de iones hidronio presentes en soluciones acuosas y sirve para la determinación de acidez y básico de una sustancia.

Carragenina: Hidrocoloide extraído de algas marinas con propiedades espesantes, gelificantes y estabilizantes.

Lavado: Reacción entre alga y cloruro de potasio.

RILes: Residuos líquidos industriales.

RIL: Residuo líquido industrial.

DAF: Flotación por aire disuelto.

FeCl₃: Cloruro Férrico.

Soda/NaOH: Hidróxido de Sodio.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Lodo prensado: Sólido obtenido del tratamiento de RILes con un contenido de humedad menor al 70%.

Lodo líquido: Sólido obtenido del tratamiento de RILes con un contenido de humedad mayor o igual al 70%.

Campaña: Referido al tipo de producto comercializado de carragenina, que depende principalmente del tipo de alga utilizada en el proceso.

Cal: Óxido de calcio.

Licor de prensa: Solución extraída del prensado de lodos.

HDPE: Polietileno de alta densidad.

SST: Sólidos suspendidos totales.

$K_2Cr_2O_7$: Dicromato de potasio.

H_2SO_4 : Ácido Sulfúrico.

RBC: Biorreactor de contacto giratorio.

N: Nitrógeno.

P: Fósforo.

HRT: Tiempo de retención hidráulico.

ρ : Porosidad del medio.

V_s : Volumen de tierra donde se encuentran las lombrices.

Q: Caudal de afluente que atraviesa el biofiltro.

HLR: Tasa de carga hidráulica.

V_{Ar} : Volumen de agua residual.

t: tiempo que demora en escurrir el agua residual.

VAN: Valor Actualizado Neto. Método de valoración de inversiones que puede definirse como la diferencia entre el valor actualizado de los cobros y los pagos generados por una inversión. Proporciona una medida de la rentabilidad del proyecto analizado en valor absoluto.

TIR: Tasa Interna de Retorno. Método de valoración de inversiones que mide la rentabilidad de los cobros y los pagos actualizados, generados por una inversión en porcentaje.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de bloques para el tratamiento convencional de aguas residuales.	11
Figura 2: Diagrama de bloques proceso de lodos activado	13
Figura 3: Esquema biorreactor de contacto giratorio (extraído de Cortez, 2013)	13
Figura 4: Diagrama esquemático de sistemas por filtración.....	14
Figura 5: Lombriz Eisenia Foetida.....	15
Figura 6: Configuración por etapas de un lombrifiltro.....	16
Figura 7: Propuesta sistema de lombrifiltro a escala de laboratorio	22
Figura 8: (i) RIL crudo (ii) RIL diluido al 25% tratado en LF (iii) RIL sin diluir tratado en LF..	25
Figura 9: Piscina disponible para la implementación de lombrifiltro.	26
Figura 10: Configuración tratamiento de RILes mediante lombrifiltro.	27
Figura 11: Vista lateral lombrifiltro escala industrial	27
Figura 12: Vista superior, distribución de aspersores y respiradores sistema lombrifiltro.	28

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Promedio mensual de lodos prensados y líquidos generados en planta de RILes de Danisco S.A.....	4
Tabla 2: Parámetros de interés de RILes para años 2018 – 2019	6
Tabla 3: Ventajas, desventajas y rendimiento de tecnologías para tratamiento secundarios	12
Tabla 4: Costos de inversión y de operación de distintas tecnologías biológicas para el tratamiento de RILes.....	15
Tabla 5: Rangos de operación y sobrevivencia lombriz Eisenia Foetida (Bollo, 1999).	17
Tabla 6: Análisis de muestreo para RIL crudo y tratado.....	24
Tabla 7: Comparación con y sin proyecto de lombrifiltro para DuPont Planta Pargua.	29
Tabla 8: Flujo de caja para situación actual de la planta.....	30
Tabla 9: Valor de la tasa de descuento del inversionista.....	31
Tabla 10: Detalle de la inversión realizada al proyecto.	31
Tabla 11: Flujo de caja para situación con proyecto.....	32

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Datos generales de la empresa

Danisco Chile S.A, ubicada en Pargua Puerto Montt es una empresa que pertenece al área de *Bioscience & Nutrition* de la empresa DuPont, dedicada a la extracción de algas de distintos tipos para la producción de carragenina la cual es utilizada como gelificante, espesante y/o estabilizante en la industria alimenticia, produciendo 1700 toneladas exclusivamente de carragenina, dividiendo su proceso en 5 etapas: picado, lavado, modificación del alga, secado y molienda.

Las principales fuentes de los RILes pertenecen a solución destilada de alcohol isopropílico (IPA por sus siglas en inglés), proveniente de la etapa de modificación y cloruro de potasio (KCl) originado en la etapa de lavado de alga, los cuales generan un caudal promedio de 156 m³/día. Así, los RILes generados poseen una gran cantidad de carga orgánica debido a las trazas de alga generadas durante el proceso.

1.2 Descripción planta tratamiento de RILes

Los RILes generados por DuPont planta Pargua son bastantes peculiares debido a que es una de las dos plantas que produce carragenina en Chile y la única que lo realiza mediante un método heterogéneo. Los RILes son tratados de manera independiente de lo que son las aguas servidas sanitarias de oficinas e instalaciones. Con respecto a las aguas lluvias, estas tampoco son incorporadas al sistema de alcantarillado de RILES, pero si pueden caer de manera natural y directa hacia el pozo de solución agotada o pozo de KCl (ANEXO A).

1.2.1 Pretratamiento

En una primera etapa para el tratamiento de RILES nos encontramos con la separación de sólidos de gran tamaño y homogeneización del RIL. Los equipos que cumplen esta función son:

(a) *Separador estático*

Los RILes fluyen a través de un separador estático el cual posee líneas configuradas de manera transversal al paso del RIL, con una apertura de aproximadamente 0,25 [mm]. El RIL es desviado

a través de estas ranuras llegando al pozo de homogeneización y las partículas sólidas que se deslizan a través de la plataforma son depositadas en un contenedor para su posterior eliminación.

(b) Estanque de homogeneización

El objetivo de este equipo es asegurar una correcta homogeneización de las aguas residuales antes de ingresar al sistema de tratamiento químico. Consiste en un estanque instalado bajo la superficie con una capacidad de 260 m³ equipado con un sistema de recirculación continuo y un sistema de adición de aire comprimido que homogeneiza los RILes dentro del estanque.

1.2.2 Tratamiento primario

Aquí es donde ocurren los procesos de coagulación y floculación, seguido por un equipo de flotación por aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés).

(a) Coagulación – Floculación

Esta etapa se lleva a cabo en un reactor tipo tubular donde ocurre la desestabilización química de las partículas coloidales y orgánicas en el RIL, para su posterior aglomeración. Esta tecnología utiliza la turbulencia dentro del reactor como mecanismo de mezclado mediante disminuciones de diámetros y codos de 90°.

Este proceso comienza con la adición de cloruro férrico (FeCl₃) al 37% como coagulante. Luego se añade hidróxido de sodio líquido (NaOH) al 26% que actúa como neutralizante por efectos ácidos del coagulante y así crear las condiciones adecuadas de pH para los procesos posteriores. Al final del reactor tubular, se dosifica un polímero electrolito aniónico como floculante al 0,32%, para generar la aglomeración y floculación de las partículas desestabilizadas.

(b) Flotación por aire disuelto

La flotación comienza luego de que el RIL tratado en el reactor tubular ingresa por el fondo del DAF, donde es succionado y mezclado con aire comprimido y agua causando la flotación de lodos en la superficie del estanque.

1.2.3 Lodos y clarificado

Finalmente, el líquido clarificado es enviado por gravedad a un estanque de almacenamiento para su posterior deposición a través del emisario submarino. Por otra parte, el lodo líquido

generado es tratado con cal y luego enviados hacia un filtro de prensa, para una reducción en el contenido de humedad para su transporte y disposición final.

1.3 Situación actual planta tratamiento de RILes

Actualmente se visualizan dos problemáticas que ocurren en planta de RILes. La primera consiste en el reemplazo de cloruro férrico como floculante, debido a problemas de corrosión en cañerías y equipos de bombeo y la segunda la sobre producción de lodos. Asimismo, la planta de tratamiento de RILes no cuenta con un sistema de tratamiento secundario para la reducción de demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Más detalles sobre la problemática se describen en la sección 2.

Así, existen otras alternativas de menos costo operacional e impacto ambiental que podrían utilizarse para el tratamiento de RILes, de las cuales se hablará en la sección 3. Así también, los resultados de la alternativa escogida a nivel de laboratorio y su proyección a nivel industrial se detallan en la sección 6.

2. PLANTEAMIENTO SITUACIÓN PROBLEMA

En planta de RILes se ha prestado principal interés en los últimos años a dos principales causas que han afectado el desarrollo normal del proceso de tratamiento. La primera se enfoca en el manejo de los lodos, principalmente debido a problemas de capacidad en el filtro de prensa. La segunda causa se enfoca en el reemplazo de cloruro férrico como floculante debido a problemas de corrosión en equipos de bombeo y tuberías por efecto de las altas concentraciones que se utilizan en la etapa de floculación, el cual ha generado inversiones en el reemplazo de equipos. Existe también énfasis en reducir dos parámetros fundamentales como lo son la DQO y la DBO, debido a los estándares de trabajo en DuPont S.A como marca corporativa y por su impacto ambiental.

2.1 Generación de lodos.

Los lodos generados en la etapa final del tratamiento de RILes son definidos como *lodo prensado* y *lodo líquido*. El tratamiento de estos lodos depende principalmente de la campaña asociada a estos.

El tipo de campaña (1033, 1031, 1041, entre otros), involucra el tipo de alga a utilizar (luga negra, luga roja y/o luga parda) y la concentración de los químicos que se utilizan en la etapa de lavado y reacción. Todo lo mencionado causa variaciones en las propiedades mecánicas del lodo. La tabla 1 muestra la cantidad de lodo generado desde octubre del 2018 a marzo del 2019.

Tabla 1: Promedio mensual de lodos prensados y líquidos generados en planta de RILes de Danisco S.A

Mes-Año	Empresa 1	Empresa 2
	Lodo prensado (kg)	Lodo líquido (kg)
Oct-18	117.320	111.010
Nov-18	100.160	89.590
Feb-19	90.620	19.300
Mar-19	112.600	43.960
Total	420.700	263.860

*En diciembre y enero se efectuó paro de planta.

Uno de los inconvenientes en la generación de lodos es el porcentaje de humedad máxima que no debe sobrepasar del 25%. Debido a esto, se adiciona óxido de calcio (cal) como agente

desecante, para que pueda ser considerado como lodo prensado y posteriormente retirado por las empresas correspondientes.

La preocupación surge en que, a pesar de que la cal compacta el lodo mejorando la etapa de filtración, también causa que el pH del licor de prensa se eleve en promedio a 13, por lo que se trata antes de ser enviado hacia el emisario submarino. Cabe además destacar que el retiro de lodos líquidos es 3 veces el costo del retiro de lodo prensado y el consumo de cal para la reducción de humedad fluctúa entre los 650 – 900 kg/mes.

Otro foco importante por considerar es la capacidad del filtro de prensa. Este, cuando se ve sobrepasado en capacidad de diseño, los lodos líquidos son enviados hacia estanques de almacenamiento, en donde se espera a que el filtro de prensa haya completado la carga máxima de operación para poder volver a cargar el lodo líquido almacenado. En caso de que el filtro de prensa no tenga la capacidad para poder tratar los lodos líquidos almacenados, estos son retirados de manera directa por camiones de empresas contratistas.

2.2 Utilización de químicos

Para efectos de coagulación y estabilización de pH, el polímero y soda que son utilizados no causan mayores problemas en el tratamiento de RILes. Por otro lado, en la etapa de floculación, el cloruro férrico si tiene efectos importantes en los equipos posteriores al reactor tubular. Se utiliza aproximadamente entre 100 – 370 kg/mes de NaOH, 2 – 12 kg/mes de polímero y 350 – 1000 kg/mes de FeCl₃ para efectos de tratamiento primario.

El cloruro férrico puede dañar distintos equipos debido a su naturaleza corrosiva (se adjunta la plantilla de seguridad en el ANEXO B). Hoy en día no se cuenta con un estudio claro de dosificación óptima para el proceso de floculación, aun así, se utilizan 3.000 ppm por costumbre de proceso mediante los operarios. Por esta razón, el reactor tubular está fabricado de polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés) debido a que otros materiales utilizados en planta, como acero al carbono, se oxidan con facilidad debido a la alta concentración de cloruro férrico utilizado.

Asimismo, la incorrecta dosificación de férrico implica que circulen trazas a equipos posteriores al reactor tubular como el DAF, el filtro de prensa y las bombas emisoras submarinas; dañando

cada uno de los equipos involucrados. Mas aún, las bombas submarinas de acero al carbono tuvieron que ser reemplazadas por acero inoxidable debido a constantes problemas de corrosión.

2.3 Parámetros de medición de RILes

El tratamiento de RILes se enfoca en reducir los parámetros que exige el DS 90 en emisiones hacia aguas marinas fuera de la zona de protección literal. Se realizan muestreos anuales que analizan todos los parámetros exigidos por norma y muestreos mensuales que involucra los parámetros más importantes decretados por la planta. La tabla 2 enseña el muestro anual de algunos de los parámetros medidos en el año 2018 y 2019 para el RIL tratado.

Tabla 2: Parámetros de interés de RILes para años 2018 – 2019

Parámetros	Unidades	Año 2018	Año 2019
Aceites y Grasas	mg/L	17	3,64
Hidrocarburos Totales	mg/L	5	<1
Hidrocarburos Volátiles	mg/L	0,2	<0,1
pH	unidad	6,7	6,6
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	142	204
DBO ₅	mg/L	3.603	6040
Fósforo	mg P/L	0,7	18,6
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg N/L	409	383

Existe especial interés hoy en día en reducir el valor de DBO₅ e incorporar estudios de DQO al sistema de tratamiento de RILes debido a que, considerando que DuPont exige altos estándares de calidad en sus productos y residuos, es necesario estar a la par con el resto de las plantas a nivel mundial.

Los niveles de DBO₅ y DQO para RILes varían entre los 500 a 10.000 mg/L dependiendo del tipo proceso y materia prima. Los altos niveles de DBO₅ en DuPont Pargua surgen debido a la alta carga orgánica que se obtiene de los residuos en las etapas de lavado y modificación del alga.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

3.1 Gestión del agua

La protección al medio ambiente se ha considerado en los últimos años como un aspecto primordial para el desarrollo íntegro en la mayoría de los países, generando conciencia que debemos cuidarlo y protegerlo.

Dentro de este ámbito, uno de los más particulares es el referente al cuidado de los recursos hídricos que comprende mares, lagos, ríos, entre otros, donde la ausencia de contaminación permite la supervivencia de la población, la flora y la fauna (*Sonune, 2004*). Es por esto, que durante años se han buscado diversas alternativas para tratar distintos residuos líquidos con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y mantener un ecosistema socialmente estable (*Salazar, 2005*).

Los problemas ambientales que pueden llegar a generar el mal tratamiento de los distintos residuos líquidos, como los domiciliarios o industriales, han generado gran interés en el último tiempo. Las legislaciones de distintos países alrededor del mundo están en constante desarrollo para que cada vez los niveles de estos contaminantes emitidos hacia los recursos hídricos y alcantarillado sean más estrictos (*Renou, 2007*), debido a la generación de malos olores y colores opacos en las aguas donde son vertidos.

Además, estas aguas residuales pueden contener altos niveles de contaminantes inorgánicos que pueden ser fácilmente biodegradables, pero existen otros componentes que pueden causar gran impacto al ecosistema cuando se encuentran altas concentraciones (*Jern, 2006*).

3.1.1 Regulación Chilena para efluentes

En Chile, en el año 2001, el ministerio de secretaría general de la presidencia publicó el decreto 90 el cual establecía la norma de “*Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales*”, donde se establecían los límites máximos de descarga para los distintos contaminantes esenciales que afectan la salud, flora y fauna chilena. Parámetros como pH (5,5 – 9,0), temperatura (20 – 40°C), sólidos suspendidos totales (80 – 300 mg/L), demanda bioquímica de oxígeno (35 – 300 O₂ mg/L) y

algunos metales pesados como el cadmio, hierro y mercurio son de especial interés en análisis de efluentes (ANEXO C)

Cabe destacar que cada parámetro se regula dependiendo del tipo de agua al que será vertido el efluente, como cuerpos de aguas fluviales, cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor, cuerpos de agua lacustres, cuerpos de agua marinos dentro de la zona de protección litoral y fuera de esta.

Según *Salazar (2005)*, los efectos de la contaminación en las aguas se pueden explicar en distintas aristas: degradación de los recursos hídricos, disminución de la calidad del agua para abastecimiento de la población en riego o uso en la industria, efectos en el proceso de auto purificación de los cauces de ríos y el ecosistema; y efectos en la salud, economía y actividades de recreación.

3.2 Aspectos generales de residuos líquidos industriales.

En particular, los residuos líquidos industriales (RILes), son generados por actividades humanas asociadas al procesamiento de alguna materia prima. La cantidad y composición de las corrientes de aguas residuales industriales depende de la actividad productiva y de otros factores (tecnología empleada, tipo de materia prima, insumos químicos, entre otros), no obstante, se caracterizan por poseer un alto contenido orgánico en comparación con las aguas residuales domésticas (*De Gisi, 2017*).

Estas corrientes de aguas residuales surgen del lavado, cocción, enfriamiento, calentamiento, extracción, subproductos de reacción, etc. de industrias con alto contenido en materia orgánica biodegradable (matadero, industrias de alimentos), de otras con materia orgánica y compuestos químicos (industria de la celulosa) o algunas que contienen sustancias inorgánicas u orgánicas no degradables (metalúrgica, textiles, química, minería).

3.2.1 Características físicas de las aguas residuales.

(i) Sólidos suspendidos totales (SST)

Son los sólidos en el agua que pueden ser atrapados por distintos tipos de filtros dependiendo del tamaño del sólido, que incluyen una amplia variedad de distintos componentes dependiendo del tipo de proceso.

(ii) Temperatura

La temperatura afecta considerablemente en aguas residuales para parámetros como la solubilidad de los gases, viscosidad y en el rendimiento de tratamientos que utilizan microorganismos, como los lodos activados (*Jaroslaw 2016*). Además, la temperatura puede afectar en la efectividad de remoción de SST, SDT, DQO, grupos fosfatos y nitratos.

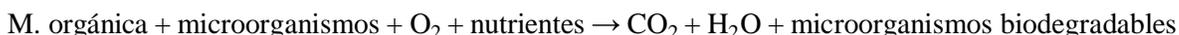
(iii) Turbidez

La turbidez mide el efecto de dispersión que los sólidos suspendidos tienen en la luz, cuanto mayor es la intensidad de la luz dispersa, mayor es la turbidez. Los contribuyentes principales a la turbidez incluyen arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida.

3.2.2 Características químicas de las aguas residuales.

(i) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO nos permite determinar la fracción biodegradable de materia orgánica presentes en una muestra. Así también, es una señal de la cantidad de comida disponible para que los sistemas biológicos puedan degradar (*Ramalho, 1996*). Actualmente, los análisis de oxidación biológica completa de materia orgánica se pueden realizar por un período de 5 días a 20°C (DBO₅) mediante el análisis de oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se han inhibido los procesos fotosintéticos de producción de dióxigeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos, como se muestra a continuación:



$$[\text{DBO}] = \frac{[\text{O}_2] \text{ mg}}{\text{L}}$$

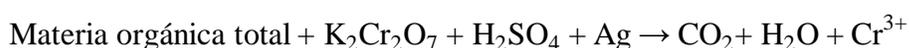
(ii) Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es un análisis empírico de laboratorio que mide la materia orgánica contenida en aguas residuales, mediante la cantidad de oxígeno consumo por la oxidación de materia orgánica.

$$[\text{DQO}] = \frac{[\text{O}_2] \text{ mg}}{\text{mL}}$$

A diferencia de la DBO, la DQO mide toda la materia orgánica contenida en aguas residuales, ya sean biodegradables o no biodegradables. En cambio, la DBO sólo mide la materia orgánica biodegradable. De esta manera, los valores de la DQO pueden estar relacionados a los valores de la DBO en una relación más o menos constante, aunque los valores de DQO son generalmente mayores. La ventaja en el análisis de DQO es que son pruebas rápidas que toman alrededor de 2 horas, en cambio las de DBO toman como mínimo 5 días para su incubación de acuerdo con la norma NCh 2313/5.

Existen varios métodos para la medición de DQO. En todos ellos, un volumen fijo con una cantidad conocida de oxidante es añadida al agua residual analizada. La base de la prueba de DQO es que casi todos los compuestos orgánicos se pueden oxidar a dióxido de carbono con un fuerte agente oxidante ($K_2Cr_2O_7$) bajo condiciones ácidas a altas temperaturas. Luego, las concentraciones de sustancias orgánicas en la muestra son calculadas mediante espectrofotometría del óxido restante, como se muestra a continuación:



(iii) pH

Como componente químico de las aguas residuales, el pH tiene una influencia directa en la capacidad y tipo de tratamiento en las aguas residuales, independientemente de si el tratamiento es físico/químico o biológico. Debido a que es un componente tan crítico de la composición de las aguas residuales, es también sumamente importante para el tratamiento de estas, debido a que muchas de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales dependen del pH para ser efectivas en el proceso, especialmente las de tratamiento biológico.

3.3 Pasos convencionales para el tratamiento de RILes

Para el tratamiento de RILes, existe una serie de pasos a seguir en la mayoría de las industrias, la cual consta de: pretratamientos; tratamientos primarios y tratamiento secundario. En algunos casos se utiliza un tratamiento terciario que involucra refinamiento y/o desinfección (Fig.1) para la obtención de agua potable (*Barrera, 2015*). Actualmente en DuPont sólo se realiza tratamiento primario para el tratamiento de RILes en la producción de carragenina.

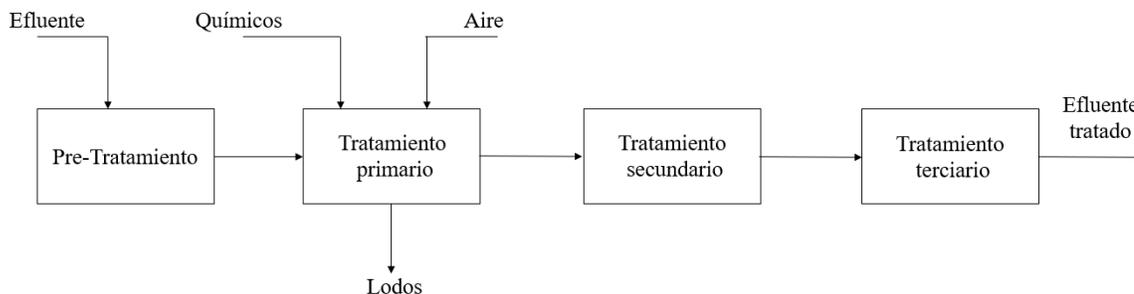


Figura 1: Diagrama de bloques para el tratamiento convencional de aguas residuales.

3.3.1 Tratamiento preliminar.

En esta etapa, todos los sólidos y partículas grandes generadas durante el proceso de producción industrial son separadas de los RILES mediante la utilización de rejillas o tamices que reducen considerablemente los SST.

3.3.2 Tratamiento primario.

El objetivo principal del tratamiento primario es la reducción del contenido de grasas, trazas de SST de menor diámetro y DBO. Los métodos de tratamiento primario fisicoquímicos suelen incluir procesos de coagulación, floculación (De Feo, 2008) sedimentación y/o flotación por aire disuelto que permite el retiro de los flóculos por la parte superior de los estanques donde ocurre la reacción fisicoquímica (Al-Mutairi, 2008).

3.3.3 Tratamiento secundario

La meta del tratamiento secundario se enfoca principalmente en la remoción de los componentes orgánicos solubles que quedan luego del tratamiento primario (Bustillo, 2015). Los tratamientos secundarios pueden ser de tipo aerobio y/o anaerobio, y generalmente poseen altos costos de inversión y mantenimiento por efecto de los microorganismos que juegan un rol importante en esta etapa. La tabla 3 entrega un resumen de las ventajas y desventajas de las tecnologías más utilizadas y su efectividad sobre algunos parámetros.

Tabla 3: Ventajas, desventajas y rendimiento de tecnologías para tratamiento secundarios

Tecnología	Ventajas	Desventajas	DBO₅ (%)	DQO (%)	SST (%)
Lodos activados	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamiento altamente eficiente. - Requiere poca superficie. - Aplicable a pequeñas y grandes escalas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de inversión. - Requiere área de disposición de lodos. 	22 – 93	27 – 86	18 – 95
Reactores biológicos rotatorios.	<ul style="list-style-type: none"> - Método de tratamiento altamente eficiente. - Requiere poca superficie. - Aplicable a pequeñas y grandes escalas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo de inversión. - Tecnología compleja. - Alto requerimiento energético. 	77 – 93	75 – 95	72 – 94
Sistemas de filtración.	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicable a pequeña y medianas escalas. - Costo relativamente bajo. - Fácil de operar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesita grandes áreas dependiendo del caudal. - Sistema de aireación. 	70 – 87	73 – 91	75 – 89

(i) Lodos activados

El proceso de lodos activados es un proceso de tratamiento biológico de aguas residuales en donde los microorganismos utilizan los contaminantes como fuente de alimento. Es un proceso de crecimiento suspendido, ya que los organismos se suspenden en las aguas residuales en lugar de unirse a un medio como en sistemas *trickle filters* o biorreactores de contacto biológico.

Los microorganismos del tipo aerobio actúan en el momento en que el efluente pasa a través de tanques de aireación, en donde digieren la materia orgánica generando más microorganismos (biomasa) y algunos subproductos (DEQ, 2009). La biomasa sedimentada se devuelve al proceso de tratamiento para proporcionar microorganismos que continuarán eliminando contaminantes (Fig. 2).

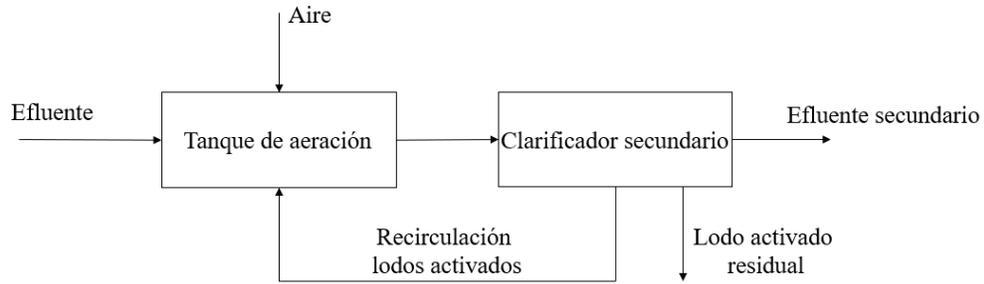


Figura 2: Diagrama de bloques proceso de lodos activado

Si bien el concepto en el funcionamiento de lodos activados puede llegar a parecer simple, el control del proceso de tratamiento es muy complejo debido a cambios en la combinación de la flora bacteriana de los tanques, variaciones en la composición química, pH y temperatura (Esparza, 2006).

(ii) Biorreactor de contacto giratorio.

Un biorreactor de contacto giratorio (RBC por sus siglas en inglés) generalmente consiste en un conjunto de discos planos o corrugados, muy espaciados, que se montan en un eje horizontal común y están parcial o completamente sumergidos en el efluente a tratar (Figura 3). El eje gira continuamente mediante un motor mecánico construyéndose una capa de biofilm en toda la superficie del medio de soporte, metabolizando los materiales orgánicos contenidos en las aguas residuales. La rotación produce turbulencia para el mezclado y el exceso de biomasa es separado del efluente clarificado (Cortez, 2013).

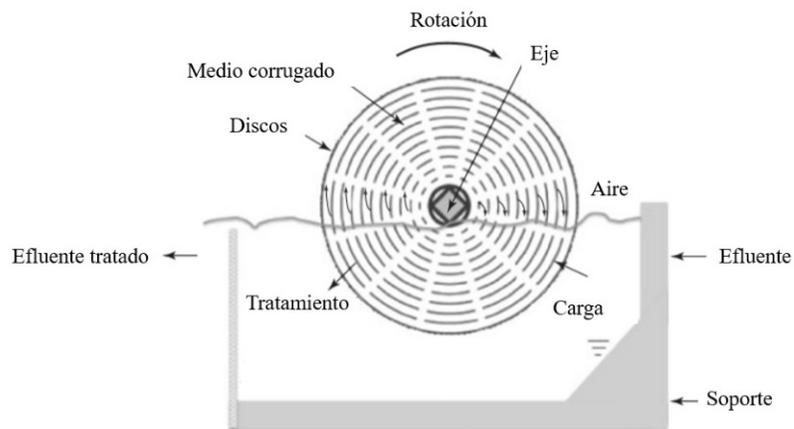


Figura 3: Esquema biorreactor de contacto giratorio (extraído de Cortez, 2013)

(iii) Sistemas de filtración

Los tratamientos biológicos se llevan a cabo en estanques los cuales pueden estar rellenos de distintos materiales, como grava, arenillas, tierra e incluso algunos polímeros en forma de pellet dependiendo del tipo de efluente que se quiera pasar a través de ellos (Figura 4), en donde los microorganismos van inmersos en el material filtrante. Los parámetros de diseño más importantes para este tipo de sistema son: tasa de carga hidráulica, tiempos de retención hidráulicos y el caudal aplicado sobre la superficie de biofiltro.

Estos sistemas en particular presentan ventaja frente a los tratamientos convencionales debido a su estabilidad ante variaciones de carga y concentración, posee bajo costos de operación y de mantenimiento (*Reed, 1987*).

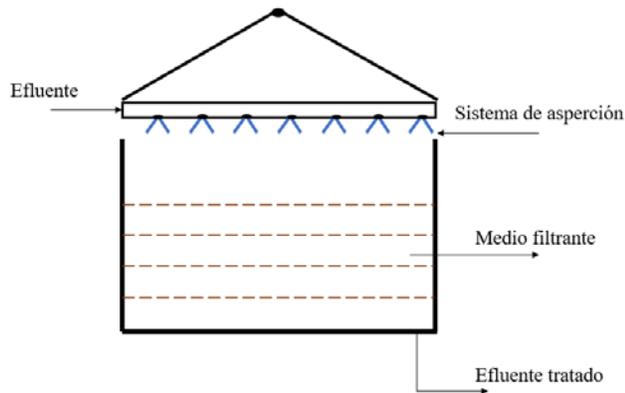


Figura 4: Diagrama esquemático de sistemas por filtración

3.4 Descripción del sistema lombrifiltro.

El lombrifiltro, vermifiltro o Sistema Tohá[®], denominado así por José Tohá, pionero en la utilización de lombrices para el tratamiento de efluentes en la Universidad de Chile (*Salazar, 2005*), es un biofiltro que opera mediante dos elementos fundamentales: un agente biológico activo (lombriz) e inertes (materiales porosos), los cuales están inmersos en una estructura generalmente de tipo rectangular. El efluente por acción de la gravedad atraviesa cada una de las capas donde finalmente se obtiene un efluente tratado y clarificado.

Esta tecnología demuestra ser económica y eficiente comparada con las tecnologías convencionales, debido a que es un proceso rápido, de fácil mantención y casi inodoro (Loehr y colab, 1984). La tabla 4 muestra los costos de inversión y mantenimiento de las tecnologías más utilizadas en tratamientos secundarios.

Tabla 4: Costos de inversión y de operación de distintas tecnologías biológicas para el tratamiento de RILes

Tecnología	Inversión (US\$)	Mantención (US\$)
Lombrifiltro	60.000 - 150.000	0,14 – 0,45
Lodos activados	66.000 - 315.000.000	0,01 – 0,28
Lagunas aireadas	12.000 - 2.110.000	0,01 – 0,76
Reactores anaeróbicos	14.000 - 3.872.966	0,018 – 1,25

Aquí, las lombrices son capaces de consumir aproximadamente la mitad de su peso en materia orgánica de aguas residuales, reduciendo parámetros indeseables, tales como SST (90 – 95%), DQO (80 – 90%), DBO₅ (80 – 90%), entre otros (Visvanathan y colab, 2005). Sin embargo, los valores de estos parámetros se pueden ver alterados por las condiciones de operación del lombrifiltro, principalmente temperatura, pH y humedad. En los sistemas de lombrifiltros no hay formación de lodos, no genera malos olores y se obtiene un agua desinfectada muchas veces apta para riego.

3.4.1 Estructura de un lombrifiltro

Los lombrifiltros están compuestos generalmente por 4 etapas de distintos materiales. La primera, es una capa a base de tierra, donde residen las lombrices, generalmente del tipo *Eisenia Foetida* (Figura 5).



Figura 5: Lombriz *Eisenia Foetida*

Aquí los sólidos suspendidos quedan atrapados y son consumidos por las lombrices. Luego, se sugiere una capa de arena fina para una segunda filtración del RIL y finalmente las siguientes dos capas compuestas de gravilla o rocas de distintos tamaños, asegurando aireación y permeabilidad (Figura 6). A pesar de esta ser una de las configuraciones más comunes, existen otras con otros tipos de materiales como el detrito y adoquín, que reemplazan a las piedras convencionales (Wang, L y colab, 2011).

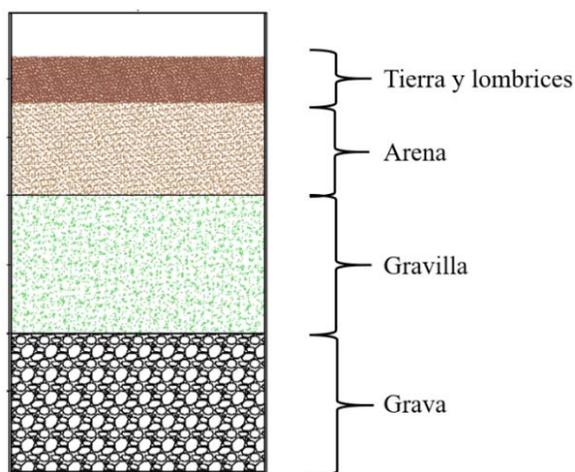


Figura 6: Configuración por etapas de un lombrifiltro

3.4.2 Mecanismo de acción de las lombrices

(i) Molienda

La materia orgánica engastada es reducida a partículas muy pequeñas, del orden de los 2-4 micrones y pasa a su intestino para la acción enzimática, en donde la molleja y el intestino actúan como un biorreactor.

(ii) Acción enzimática

Las diferentes enzimas que secretan las lombrices como lipasas, amilasas, celulasa, entre otras, realizan una rápida conversión bioquímica de los materiales celulósicos y proteicos en los residuos orgánicos. Al momento de ingerir los materiales, digieren los microorganismos patógenos y los depositan junto a los minerales y microbios de la tierra (Dash, 1978).

(iii) Las lombrices refuerzan los microorganismos descomponedores

Las lombrices potencian el crecimiento de microbios descomponedores beneficiosos como protozoos, actinomicetos y fungis en los suelos. Lo que devoran las lombrices lo excretan como nitrógeno (N) y fósforo (P) en la tierra, los cuales son utilizados por los microorganismos en la tierra para multiplicarse. Así, las lombrices y los microorganismos actúan de manera simbiótica y sinérgica para acelerar el proceso de descomposición de materia orgánica.

(iv) Humificación

La humificación consiste en la conversión de las partículas orgánicas de mayor tamaño en complejos coloides amorfos los cuales contienen materiales fenólicos, en donde cerca de ¼ de la materia orgánica es convertida en humus y el resto procesada para el crecimiento de la lombriz. Este humus es utilizado como abono para el crecimiento y sobrevivencia de las plantas, y tiene una excelente proyección en el mercado actual debido a las diversas propiedades que le entrega a los suelos para que plantas y árboles puedan crecer en distintos ambientes.

3.5 Variables de interés en el sistema

3.5.1 Condiciones de operación

Las condiciones ideales del hábitat para la lombriz *Eisenia Foetida*, corresponden a una temperatura de 20°C, pH neutro, oxígeno ambiental, baja luminosidad (debido a su naturaleza fotosensible) y humedad considerable.

Esta última es un factor de mucha importancia, ya que la lombriz entra en un período de latencia con una humedad sobre el 85% que impide el paso de oxígeno, afectando la producción de humus y su reproducción. Así también, las lombrices a temperatura y pH inadecuado (tabla 5) disminuyen su actividad sexual, producción de humus y alargan el ciclo evolutivo, hasta que se presentan las condiciones adecuadas.

Tabla 5: Rangos de operación y sobrevivencia lombriz *Eisenia Foetida* (Bollo, 1999).

Parámetro	Óptimo	Adecuado	Inadecuado
Temperatura (°C)	20	15 – 24	< 5; > 37
Humedad (%)	75	70 – 80	< 70; > 85
pH	6,5 – 7,5	6 – 8	< 4,5; > 8,5

3.5 Métodos de alimentación

Regularmente, existen tres modos por los cuales se puede abastecer de afluente a los sistemas de lombrifiltro: modo continuo, modo por lotes (batch) y modo intermitente. El riego continuo es una opción común y más utilizada en este tipo de sistemas, debido a la constante generación de aguas residuales en la industria. El intermitente puede tener sus ventajas sobre el anterior, debido a que como consiste en un riego con períodos de descarga permite una mejor aireación del sistema. Por último, el modo por lotes consiste en descargar de una vez una gran cantidad de afluente para que interactúe con las lombrices y sea filtrada de una sola vez (*Singh y colab, 2017*).

Es recomendable mantener una dispersión homogénea de las aguas residuales en toda la superficie para que las lombrices puedan interactuar y degradar la materia orgánica.

3.5.1 Tiempo de retención hidráulico

El tiempo de retención hidráulico (HRT por sus siglas en inglés) se define como el tiempo que le toma a las aguas residuales fluir a través del lecho donde habitan las lombrices y es el parámetro más importante (*Calvache, 2002*). El afluente necesita permanecer un cierto tiempo en contacto con las lombrices para la remoción de materia orgánica, en donde el tiempo mínimo óptimo según *Sinha y colab, 2008* es de 2 horas. La porosidad del medio siempre varía entre un 60% y 74%

$$\text{HRT} = \frac{\rho \cdot V_s}{Q} \quad (\text{Ec. 1})$$

HRT: Tiempo de retención hidráulico (hr)

ρ : Porosidad del medio (%)

V_s : Volumen de tierra donde se encuentran las lombrices (m^3)

Q: Caudal de afluente que atraviesa el biofiltro (m^3/h)

3.5.2 Tasa de carga hidráulica

La tasa de carga hidráulica (HLR por sus siglas en inglés) es el volumen de agua residual aplicado por unidad de área de tierra donde se encuentran las lombrices por unidad de tiempo (Ec. 2). HLR depende muchas veces de la densidad de lombrices (6000 – 8000 gusanos/m³) que se posea. Altas cargas hidráulicas pueden reducir el HRT en el lombrifiltro, lo que conlleva a una disminución en la eficiencia del tratamiento. Una aplicación de 1 m³/m²·día se considera lo mejor para un tratamiento más eficiente y estable (Li y colab, 2009).

$$\text{HLR} = \frac{V_{Ar}}{A \cdot t} \quad (\text{Ec. 2})$$

HLR: Tasa de carga hidráulica (m³/m²·día)

V_{Ar}: Volumen de agua residual (m³)

A: Área de material filtrante (m²)

t: tiempo que demora en escurrir (día)

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de lombrifiltro a escala de laboratorio para la reducción de los parámetros de DBO y DQO de los residuos líquidos industriales derivados de la producción de carragenina de la campaña 1041.

4.2 Objetivos Específicos

1. Identificar variables de proceso de interés que determinan el funcionamiento adecuado del lombrifiltro.
2. Construir lombrifiltro tomando como base las condiciones de operación y valores adecuados de las variables de interés.
3. Evaluar operación del lombrifiltro bajo dos condiciones representativas de los RILes provenientes de la producción de carragenina de la campaña 1041.
4. Analizar factibilidad técnica y económica de escalamiento de lombrifiltro para su uso a escala industrial en DuPont planta Parga.

5. METODOLOGÍA

5.1 Recursos, materiales y equipos

Se utilizaron lombrices del tipo *Eisenia Foetida* en todas sus etapas de crecimiento, adquiridas en Prosan SpA, Concepción, Chile.

El efluente crudo fue recolectado en la sala de polímeros de DuPont planta Pargua y el análisis de las propiedades físico – químicas del efluente crudo y tratado fueron analizadas por Aquagestión S.A, Puerto Varas, Chile.

El estudio piloto se realizó en una habitación en las dependencias de DuPont planta Pargua con una temperatura ambiental y de la tierra donde habitan las lombrices de 20 y 17°C respectivamente. Cabe destacar, además, que el RIL en promedio viene con una temperatura de 21°C luego de la descarga del tanque de homogeneización.

El sistema de lombrifiltro es una estructura de polipropileno que cuenta con una altura de 80 cm, un ancho de 30 cm y un largo de 40 cm, sobre un soporte de ladrillo de 11 cm. En la base posee una cámara recolectora la cual recibe el RIL filtrado, que cae mediante orificios realizados en el fondo del lombrifiltro. Por otra parte, el sistema aspersión del RIL consta de 2 cubetas perforadas que suministran el RIL por goteo.

El sistema percola a través de 4 capas filtrantes: la capa del fondo (primera capa) posee piedras entre 7 – 9 cm de diámetro y llena una profundidad de 15 cm. Sobre esta se encuentra una segunda capa que llena 10 cm de piedras entre 3 – 5 cm de diámetro y luego 5 cm de grava de 1 – 2 cm de diámetro. Posteriormente, una tercera capa que consta de arena de 2 mm de diámetro con una profundidad de 10 cm. Finalmente, la última capa de 5 cm consta de una proporción a base de sustrato equilibrado para lombrices adquirido en Prosan SpA, un compost a base de materia orgánica y tierra vegetal en donde operan las lombrices (Figura 7, ANEXO D). Se adicionó, además, una malla entre la arena y donde reposan las lombrices para impedir que estas se transporten hacia la arena.



Figura 7: Propuesta sistema de lombrifiltro a escala de laboratorio

5.2 Procedimiento

Se ambientaron las lombrices por aproximadamente 2 días para su adaptación a las condiciones ambientales y a la mezcla de tierra en la que reposan. Según lo recomendado por *Li y colab, 2009*; y en consecuencia a las dimensiones de nuestro sistema, se utilizaron 100 lombrices para este estudio. Para poder encontrar la eficiencia del lombrifiltro con respecto a los parámetros de RILes crudos generados en planta, se utilizó RIL de la campaña 1041, la cual es la producción principal de la planta, diluido en agua al 75% y sin diluir obtenido en los turnos de mañana (09:00 hrs) y tarde (13:00 hrs), dejando un tiempo de retención hidráulico de 2 horas. Para ser capaces de mantener este HRT, y de acuerdo con las dimensiones de nuestro sistema, se suministró un caudal homogéneo en toda la superficie de 2 L/h, por períodos de 9 horas de alimentación y 13 horas de descanso, por temas de horario en planta.

Se realizaron mediciones para los siguientes parámetros físico – químicos: pH, turbidez, DBO₅, DQO y sólidos totales suspendidos para RIL crudo y tratado, mediante Aquagestión (laboratorio certificado bajo norma NCh17020-of2012). Cabe mencionar que todos los parámetros fueron analizados de acuerdo con los métodos estándar para la examinación de agua residual (ANEXO E)

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis de muestras

La calidad del RILes en términos de sus características fisicoquímicas se describen en la tabla 6, para RIL crudo, RIL tratado por lombrifiltro (LF) diluido y no diluido, para RIL tratado analizado para el muestro anual en planta año 2019 y valores límites permitidos por DS90.

Los valores iniciales de pH en RIL crudo son de naturaleza neutra, entre 6,8 – 7,3, debido a la estabilización que se realiza en el tanque de homogeneización, la cual entrega un pH casi ideal para el óptimo funcionamiento de las lombrices. De acuerdo con lo que se mostró en la tabla 5, el paso por el lombrifiltro no genera variaciones significantes en los valores de pH, moviéndose entre 6,9 y 7,3 para sistema diluido y sin diluir respectivamente. La mantención de un pH estable puede estar relacionado con la rápida mineralización que realizan las lombrices a las fracciones orgánicas que posee el RIL, actuando como un agente buffer y manteniendo un pH neutro (*Arora. S, 2014*).

De la tabla 6 se observa que la DBO₅ de RIL diluido y no diluido fueron de 1917 mg/L y 3322 mg/L respectivamente, lo que muestra que las lombrices degradaron significativamente las sustancias orgánicas del RIL mediante acciones enzimáticas, ya que las lombrices funcionan como catalizadores biológicos, lo que acelera las reacciones bioquímicas y, por lo tanto, una alta eliminación de DBO₅. Asimismo, los resultados para la DQO para RIL diluido y no diluido fueron de 3647 mg/L y 7008 mg/L respectivamente, lo que ratifica la reducción de la carga orgánica del RIL.

Llama la atención que hubo una mayor eficiencia de remoción en el RIL diluido que en el sin diluir, esto puede deberse a 2 factores. El primero asociado al tiempo de almacenamiento, que tomó 2 días más para su análisis y pudo ocasionar una filtración de oxígeno a través del contenedor del RIL tratado y por ende disminuir aún más ambos parámetros. El segundo asociado al efecto que tiene el agua sobre la DQO y DBO₅, como lo reporta *Natarajan (2015)*, que disminuye de manera significativa ambos parámetros al momento de tener contacto con agua, probablemente debido a las moléculas de oxígeno que poseen y que facilitan el tratamiento.

En relación con los SST, estos se redujeron a 24 mg/L y 43 mg/L para RIL diluido y no diluido respectivamente. Por lo tanto, los resultados sugieren claramente la capacidad de los filtros de

retener las fracciones sólidas del RIL y la habilidad de las lombrices para ingerir las partículas orgánicas e inorgánicas, que finalmente las excretan en forma de humus. Asimismo, el desempeño se pudo ver desfavorecido principalmente por el arrastre de ciertas partículas de tierra y arena por efecto de una mala compactación.

Con respecto los resultados de aceites y grasas, estos disminuyeron a 14 mg/L y 24 mg/L para RIL diluido y no diluido respectivamente, asociado principalmente a la retención de estos en las distintas capas, debido a que no existen estudios previos que abalen la posibilidad de que las lombrices consuman o procesen aceites y/o grasas.

Tabla 6: Análisis de muestreo para RIL crudo y tratado.

Parámetro	RIL crudo	RIL diluido al 75% tratado en LF	RIL sin diluir tratado en LF	Tratamiento actual en planta	Valores límites DS90
DBO ₅ (mg/L)	8.310	1.917	3.322	6.040	-
DQO (mg/L)	16.770	3.647	7.008	16.489	-
Aceites y Grasas (mg/L)	310	14	24	4	150
SST (mg/L)	1.720	24	43	280	300
pH	7,2	7,2	7,1	6,6	5,5-9,0
Temperatura (°C)	19	17	16	26	-
Turbidez (NTU)	>1000	103	107	95	-

*Resultados promedios entre RIL de mañana y tarde.

Por otra parte, sin considerar las ventajas que proporcionó el RIL diluido en la disminución de los parámetros estudiados, la dilución al 75% ayudó a que el RIL pasara de una manera más prolija a través del sistema de aspersión, lo cual a escala industrial se podría asociar a un menor costo de mantención de los aspersores por causas de taponamiento.

Finalmente, comparando los valores del tratamiento de RILes por LF con el que actualmente se utiliza en planta, se puede apreciar que los valores obtenidos se acercan bastante a los resultados que se entregan del tratamiento mediante el uso de químicos, obteniendo claramente una mejor eficiencia en la remoción de SST, por lo demás, los valores obtenidos mediante LF se encuentran dentro de los parámetros de la norma chilena. La figura 8 muestra el RIL crudo obtenido del pozo de homogeneización, RIL tratado diluido al 75% y RIL tratado sin diluir.

Los resultados obtenidos están de acuerdo con lo reportado en literatura para otros residuos líquidos industriales, tal como lo menciona *Natarajan, (2015)* para RILs provenientes del proceso de destilería y *Kharwade (2011)* para el tratamiento de efluentes provenientes de redes domiciliarias, en donde reducen DBO_5 en un 90%, DQO en un 94%, y SST en un 88% aproximadamente. Además, *Natarajan, (2015)* realizó un estudio diluyendo el efluente en agua a distintos porcentajes, en donde se corrobora que al diluir el RIL existe una disminución en los parámetros de DQO y DBO_5 por efecto de dilución.

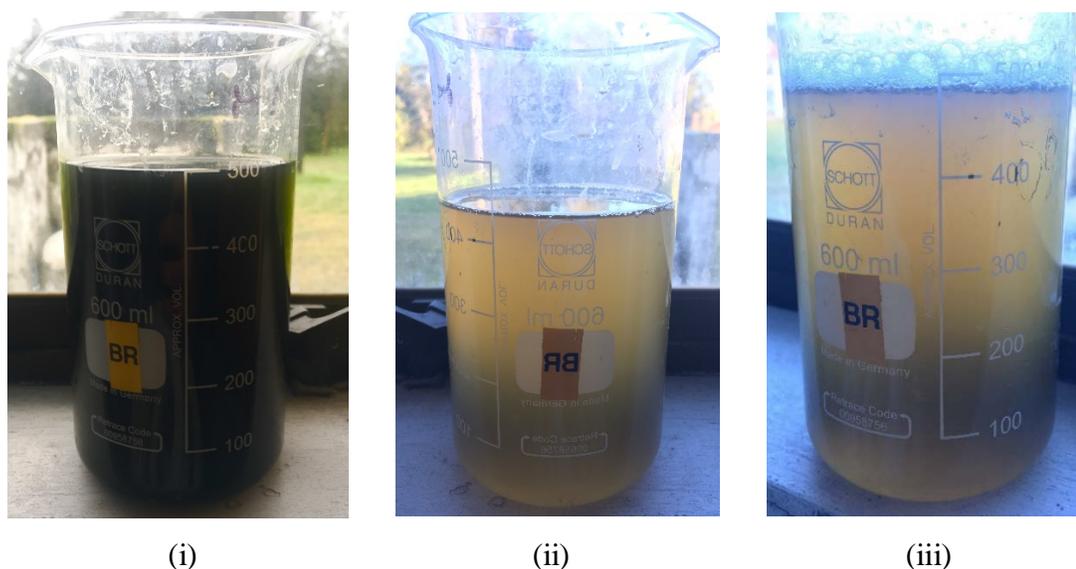


Figura 8: (i) RIL crudo (ii) RIL diluido al 75% tratado en LF (iii) RIL sin diluir tratado en LF

6.2 Proyección industrial

Actualmente se posee una pileta de 43 m. de largo, 29 m. de ancho y 1,5 m. de profundidad que se utiliza como almacenamiento intermedio para la torre de enfriamiento. Esta pileta al llegar a su nivel máximo de capacidad, generalmente en épocas de lluvia, posee un sensor de nivel que libera estas aguas hacia el emisario submarino, no siendo utilizada para ningún propósito. Es por esto, que sería factible utilizar este sector para la implementación del lombrifiltro (Fig. 9).

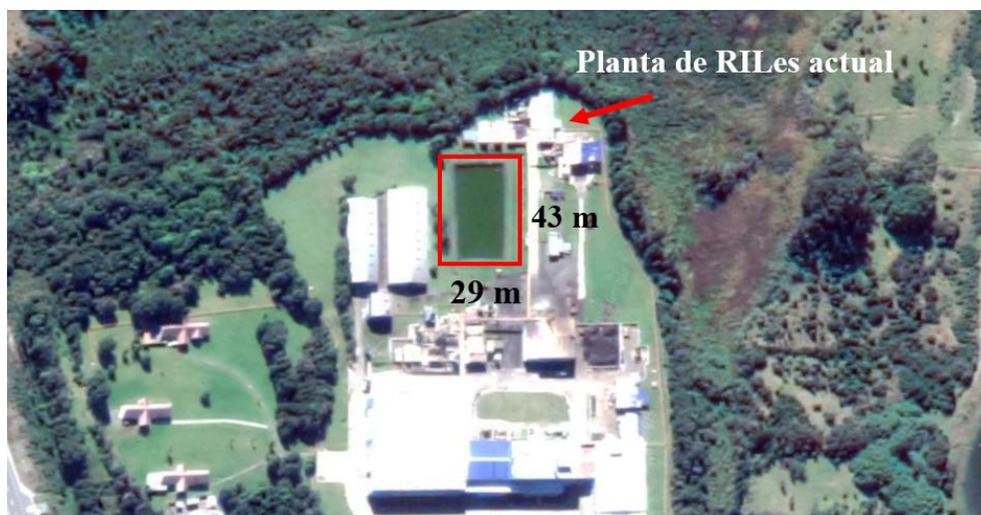


Figura 9: Piscina disponible para la implementación de lombrifiltro.

Basándonos en el trabajo realizado por *Lombifiltro Chile*, (2014) para el tratamiento de aguas servidas y debido a que no existen registros de lombrifiltros para residuos industriales líquidos generados a partir de la producción de carragenina, se realizó una proyección a escala industrial contando con un caudal promedio de $168 \text{ m}^3/\text{día}$ permitido por norma a DuPont Planta Pargua. Teniendo en cuenta que las dimensiones del lombrifiltro no se basan en las características del RIL si no que particularmente en el caudal generado, se plantea la posibilidad de implementar un módulo de lombrifiltro de 20 m. de largo por 20 m. de ancho con una superficie de 400 m^2 .

La configuración del lombrifiltro se hará en base a lo planteado a escala de laboratorio. Los RILes generados pasarán por un separador estático, llegando al tanque de homogeneización y percolarán por las capas del lombrifiltro (ANEXO F). Este contará con una primera capa de bolones de roca que cubrirá 0,2 m, una segunda capa de piedras de menor diámetro que cubrirá 0,1m, una tercera capa de arena que cubrirá 0,2 m, luego una malla Raschel para evitar que las lombrices se transporten hacia la arena; y finalmente una mezcla entre humus de lombriz, compost y viruta que cubrirá 0,8m en donde reposarán las lombrices (Fig. 10). En el fondo del sistema, se encuentra una caleta recolectora de 0,1 m que permite el impulso del fluido hacia la bomba del emisario submarino.

Generalmente a escala industrial, se maneja una altura máxima de 1m en donde reposan las lombrices para tener un acceso prolijo a la superficie, para efectos de remoción del humus y facilitar el horquille.

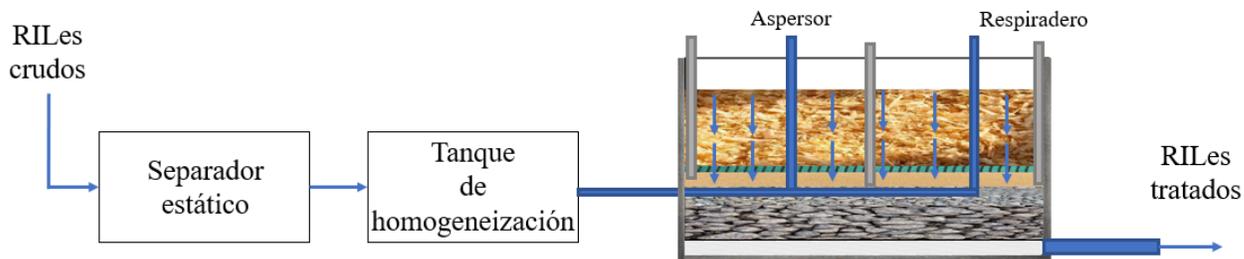


Figura 10: Configuración tratamiento de RILes mediante lombrifiltro.

El sistema de lombrifiltro se posará sobre pastelones de hormigón separados por 10 cm, los cuales entregarán soporte y permitirán el paso de los RILes tratados. Asimismo, el terreno donde estarán ubicados los pastelones tendrá una inclinación para que permita la direccionalidad del efluente hacia la cámara recolectora para evitar acumulaciones en sectores no deseados (Fig. 11). Debido a que el lombrifiltro posee un largo de 20 m. de largo, se sugiere una inclinación de 4 cm. para efectos de un buen escurrimiento del RIL tratado, teniendo en cuenta que para una canaleta de agua se debe poseer una inclinación de aproximadamente 0,6 cm. cada 3 m. de canaleta.

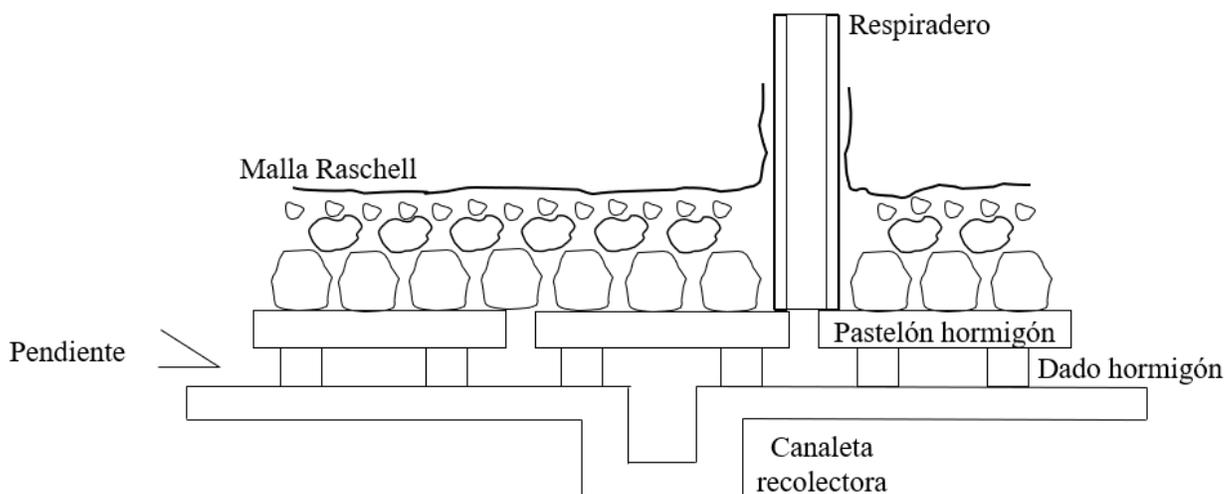


Figura 11: Vista lateral lombrifiltro escala industrial

El módulo de lombrifiltro será regado por medio de 16 regadores de baja presión del tipo Wobbler de la Firma Senninger Irrigation que se caracterizan principalmente por lograr una buena uniformidad de riego y poseer un alcance de aproximadamente 4,5 m. Además, se contará con 96 respiradores para asegurar una apropiada ventilación del sistema (Fig. 12).

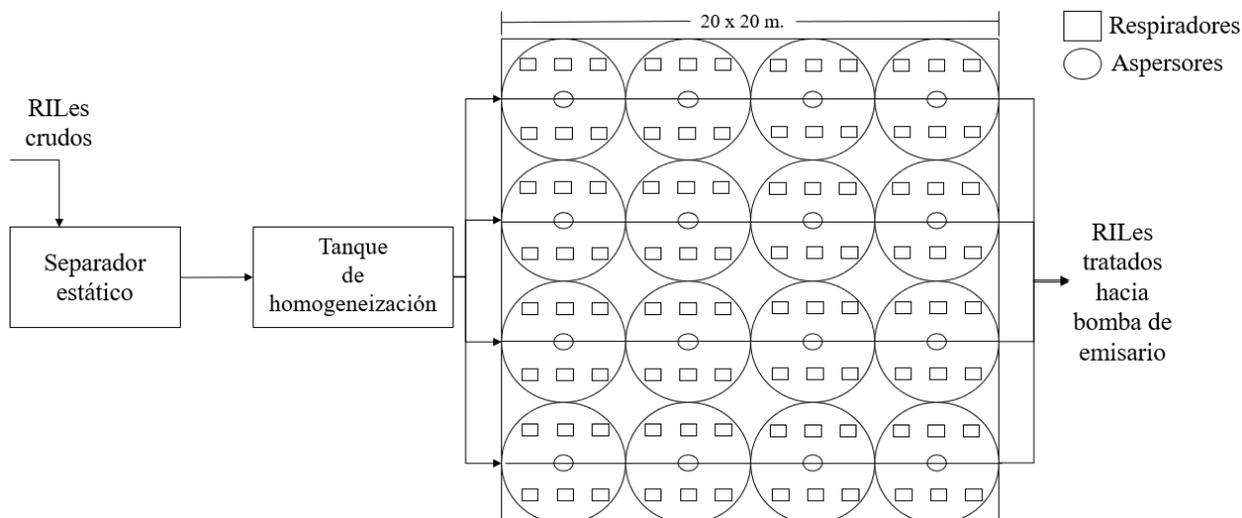


Figura 12: Vista superior, distribución de aspersores y respiradores sistema lombrifiltro.

La producción de RILes generados en DuPont Planta Parga es continua la mayoría del tiempo, aunque se posee una pequeña fracción de tiempos muertos por efectos de la disminución en los niveles de IPA para destilar, lo cual detiene la planta de RILes para que no se vea afectado el pH en el tanque de homogeneización y ocasionar problemas en el proceso de floculación, coagulación y tratamiento de los lodos. Esta fracción de tiempo muerto se puede aprovechar para realizar inspecciones a respiraderos, aspersores y realizar el mantenimiento en la capa donde se encuentran las lombrices. Asimismo, cuando se realicen paros de planta por mantención, se debe remover el 10% de la capa en donde se encuentran las lombrices para eliminar acumulaciones de humus generados por las lombrices, y no ocurran estancamientos de efluentes.

Por otra parte, para el control de las aguas lluvias y el frío que afecta a la zona sur de nuestro país, se propuso la implementación de un galpón en donde estará inmerso todo el sistema de lombrifiltro. Este sistema ayudará a que la humedad del sistema se mantenga entre un 70 – 80% y que el sistema no se inunde, ocasionando la muerte de las lombrices. Además, este galpón actuaría como una especie de fuerte para que las aves no generen contacto directo con el sistema y puedan devorar las lombrices, debido a que muy cerca existe una empresa dedicada al rubro salmonero, el cual atrae principalmente gaviotas.

El sistema de lombrifiltro no sólo posee ventajas económicas al momento de su implementación, si no también sociales y ambientales, debido a que no se utiliza ningún químico para el tratamiento de RILes (que generalmente deja trazas en las profundidades de los océanos, afectando de manera

directa la flora y fauna) y genera un efluente prácticamente libre de olor y color, lo cual es un gran beneficio para las poblaciones cercanas a la planta.

Hoy en día se tiene registro de varias industrias que se han visto beneficiadas por la implementación de lombrifiltro, como lo es la planta de tratamiento de aguas servidas de Essbio ubicada en Tumbes, la planta procesadora de alimentos Agrofoods ubicada en Malloa y la industria faenera Faenagro ubicada en Graneros que reportan ahorros en el consumo eléctrico y un aumento en la capacidad del tratamiento, generando así un mayor ingreso. La tabla 7 muestra un resumen de la situación con y sin proyecto de lombrifiltro.

Tabla 7: Comparación con y sin proyecto de lombrifiltro para DuPont Planta Pargua.

Situación sin proyecto	Situación con proyecto
Uso de cloruro férrico y otros químicos (antiespumantes, polímeros, cal, entre otros).	Las lombrices tratan los RILes generando un efluente limpio y dentro de norma.
Gasto en el manejo y transporte de lodos.	No hay utilización de químicos ni generación de lodos
Altos costos de generación eléctrica mediante bombas que suministran los distintos químicos.	Bajos costos energéticos ya que sólo se necesitan dos bombas para su funcionamiento
Reducción variable en ciertos parámetros en el tratamiento de RILes.	Generación de humus para su posterior venta o aporte al sector agrícola cercano.

6.3 Evaluación económica

Al implementar el sistema de lombrifiltro se elimina por completo el consumo de cloruro férrico, soda cáustica, polímero, cal y retiro de lodos, por lo que a simple vista el proyecto es viable económicamente; sin embargo, se debe cuantificar el ahorro económico, el cual se presenta a continuación:

6.3.1 Consideraciones

Para hacer efectivo el flujo de caja se deben tomar ciertas suposiciones económicas que simplifiquen el análisis y represente de mejor manera las operaciones económicas de la planta:

- a) La producción aumentará en un 4% anualmente, partiendo por los valores reales de producción del año 2018.
- b) Se consideró un IPC promedio del 2% anual, lo cual afecta directamente en:

- i) Los costos de materia prima del producto (algas y químicos).
 - ii) Los costos directos de producción (sueldos de operadores, energía eléctrica y carbón para la caldera).
 - iii) Los costos indirectos (sueldos administrativos, sueldos de mantención, repuestos y depreciación del producto retenido en bodegas).
 - iv) El precio de venta de la carragenina.
 - v) El precio de compra de cloruro férrico, hidróxido de sodio, polímero, cal y retiro de lodos.
- c) Se analizará el flujo de caja a 10 años.
- d) Valor de dólar promedio 681,50 CLP/USD.

6.3.2 Estado actual de flujo de caja

Por motivos de confidencialidad, la compañía no puede describir en detalle los costos asociados a producción, materias primas, sustancias químicas, entre otros. Por lo que la tabla 8 se resumirá en costo neto de materias primas, costos directos de producción y costos indirectos totales.

Tabla 8: Flujo de caja para situación actual de la planta

Item	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Producción (mton)	1.750	1.820	1.893	1.969	2.047	2.129	2.214	2.303	2.395	2.491	2.590
Precio (USD/kg)	21,9	22,5	23,2	23,9	24,6	25,3	26,1	26,9	27,7	28,5	29,4
Ingreso (mUSD)	38.245	40.969	43.885	47.010	50.357	53.943	57.783	61.898	66.305	71.026	76.083
Costo Neto Materias Primas (mUSD)	16.040	16.409	16.786	17.172	17.567	17.971	18.385	18.808	19.240	19.683	20.135
Costos directos de proceso (mUSD)	1.939	1.984	2.029	2.076	2.124	2.172	2.222	2.274	2.326	2.379	2.434
Costos indirectos totales (mUSD)	7.910	8.092	8.278	8.468	8.663	8.862	9.066	9.275	9.488	9.706	9.930
Costos (mUSD)	25.889	26.484	27.094	27.717	28.354	29.006	29.674	30.356	31.054	31.768	32.499
Margen Bruto (mUSD)	12.356	14.484	16.792	19.293	22.003	24.936	28.110	31.542	35.250	39.257	43.583

Se puede concluir, analizando el flujo de caja, que el proceso y producción de carragenina es rentable para la compañía en un tiempo estimado de 10 años, por lo que, en base a esto, se estimará

la tasa de retorno de la inversión a considerar para el proyecto y el valor actual neto del sistema implementado, y por consiguiente el beneficio económico que traerá.

6.3.3 Valor actual neto

Se calculará el VAN (valor actual neto) correspondiente a los 10 años descritos en el flujo de caja para tener un punto de comparación en los análisis descritos en las siguientes secciones. En este caso, el grado de riesgo del proyecto es moderado, pues consiste en la modificación de terreno ya existente, por lo que se elegirá un valor para la tasa de descuento (%r) entre 15 y 25%. Para efectos de cálculo, se utilizará un valor del 20% para r, el cual se obtiene de la tabla 9. Entonces, evaluando el flujo de caja actual, se obtiene que el VAN es de 90,55 MUSD en 10 años.

Tabla 9: Valor de la tasa de descuento del inversionista.

Tipo de proyecto	Grado de riesgo	%r
Corto plazo	Bajo	10 – 15
Mediano plazo	Moderado	15 – 25
Largo plazo	Alto	25 – 50 o más

6.3.4 Inversión

La tabla 10 resume la inversión para la implementación del sistema de lombrifiltro, que detalla los valores del sistema de aspersores, sistema de ventilación, lombrifiltro (incluye estructura y materiales filtrantes), *piping* (incluye parrón y accesorios), bombas, instalación eléctrica, instrumentación, edificación y lombrices. La suma corresponde a un monto total de 237.544 USD, el cual se agregará como valor negativo para el flujo de caja en el año cero.

Tabla 10: Detalle de la inversión realizada al proyecto.

Inversión	Costo (USD)
Lombrices	68.062
Bombas	8.805
<i>Piping</i>	11.739
Instalación eléctrica	7.337
Instrumentación	1.468
Lombrifiltro	22.744
Edificación	117.389
Total	237.544

6.3.5 Proyección estimada anual con el sistema de lombrifiltro implementado.

La proyección de la tabla 11 muestra el flujo de caja con el lombrifiltro implementado para el tratamiento de RILes. Este tratamiento contempla la eliminación absoluta de los químicos utilizados actualmente (cloruro férrico, soda cáustica, polímero, antiespumante y cal), la reducción en el costo energético y la eliminación de los costos asociado al retiro de lodos.

De esta manera, se realizó el cálculo del VAN con la modificación en planta, el cual entregó un monto de 93,08 MUSD en 10 años, mayor al valor actual, lo que significa que el proyecto tiene una rentabilidad económica en diez años de producción. Debido a que al realizar la inversión del proyecto no se produce un flujo negativo en el año cero, se hace imposible calcular una tasa interna de retorno, lo que revela que la inversión se rentabiliza de inmediato; por lo que se puede concluir que el sistema es rentable económicamente.

Tabla 11: Flujo de caja para situación con proyecto

Item	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Producción (mton)	1.750	1.820	1.893	1.969	2.047	2.129	2.214	2.303	2.395	2.491	2.590
Precio (USD/kg)	21,9	22,5	23,2	23,9	24,6	25,3	26,1	26,9	27,7	28,5	29,4
Ingreso (mUSD)	38.245	40.969	43.885	47.010	50.357	53.943	57.783	61.898	66.305	71.026	76.083
Costo Neto											
Materias Primas (mUSD)	16.040	16.409	16.786	17.172	17.567	17.971	18.385	18.808	19.240	19.683	20.135
Costos directos de proceso (mUSD)	1.939	1.984	2.029	2.076	2.124	2.172	2.222	2.274	2.326	2.379	2.434
Costo químico RILes (mUSD)	-216	-221	-226	-231	-237	-242	-248	-253	-259	-265	-271
Costo Retiro de Lodos (mUSD)	-168	-172	-176	-180	-184	-188	-193	-197	-202	-206	-211
Costo Eléctrico (mUSD)	-116	-119	-122	-125	-127	-130	-133	-136	-140	-143	-146
Inversión (mUSD)	-238	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costos indirectos totales (mUSD)	7.910	8.092	8.278	8.468	8.663	8.862	9.066	9.275	9.488	9.706	9.930
Costos (mUSD)	25.151	25.973	26.570	27.181	27.806	28.446	29.100	29.769	30.454	31.154	31.871
Margen bruto (mUSD)	13.095	14.996	17.316	19.829	22.551	25.497	28.683	32.128	35.851	39.871	44.212

7. CONCLUSIONES

Se identificaron las variables de mayor relevancia para la operación del lombrifiltro las cuales fueron temperatura, humedad y pH. De ellas fue posible controlar pH y humedad.

Se construyó un lombrifiltro a escala de laboratorio que constó de un armazón de polipropileno sobre un soporte de ladrillos con una cámara recolectora en su base y etapas diferenciadas con distintos tipos de gravas, arena y una última capa de compost, aserrín y tierra en donde residían las lombrices.

Se logró reducir los distintos parámetros estudiados como DBO₅, DQO, aceites y grasas, sólidos suspendidos totales y turbidez para RIL diluido y no diluido a escala de laboratorio para los RILes de la campaña 1041.

El análisis técnico y económico reveló que es factible la construcción de un lombrifiltro a escala industrial para la campaña 1041, sin generación de lodos ni utilización de químicos, aumentando el VAN en \$2,54 MUSD.

Finalmente, se puede concluir que el objetivo del proyecto se ha logrado con claridad, ya que el sistema operó de manera óptima a escala de laboratorio bajo las condiciones mencionadas y es económicamente viable a nivel industrial.

8. RECOMENDACIONES

Se sugiere, a escala de laboratorio, compactar la tierra a su máxima capacidad para disminuir los vacíos de material filtrante y así obtener un mayor clarificado del RIL.

Asimismo, generar una proporción adecuada entre compost, aserrín y tierra para la última capa beneficiaría la retención del RIL y el tiempo retención hidráulico no se vería afectado. Por último, se deben realizar muestreos a las campañas restantes que se realizan durante el año, para corroborar la eficiencia del lombrifiltro manteniendo un caudal constante durante todo el día.

A escala industrial, se sugiere mejorar el separador estático para que la capa en donde reposan las lombrices no se sobrecargue de materia orgánica en la superficie y pueda ser digerida por las lombrices.

9. REFERENCIAS

Al-Mutairi, N.Z, (2008). Evaluation study of a slaughterhouse wastewater treatment plant including contact-assisted activated sludge and DAF. *Desalination* 225 (1), 167–175.

Arora. S., Rajpal A., Bhargava, R., Pruthi, V., Bhatia A., and Kazmi A., (2014). Antibacterial and enzymatic activity of microbial community during wastewater treatment by pilot scale vermifiltration system, *Bioresource Technology*, 2014, 132141, 166.

Barrera, C.E, (2015). Reduction of pollutants and disinfection of industrial wastewater by an integrated system of copper electrocoagulation and electrochemically generated hydrogen peroxide, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 50:4, 406-413.

Bollo E, (2003). Lombricultura – Una alternativa de reciclaje. 14-48.

Bustillo, C.F, (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management* 161, 287–302.

Calvache W. Chavez M. & Duran C. (2002). Tratamiento de aguas: tratamiento primario y parámetros hidráulicos. Universidad Central del Ecuador, Escuela de Ingeniería.

Cortez, S, (2013). Bioreactors: rotating biological contactors. Institute for Biotechnology and Bioengineering, Centre of Biological Engineering, University of Minho, 1015-1019.

Dash, M.C, (1978). Role of Earthworms in the Decomposer System. In: J. S. Singh and B. Gopal, Eds., *Glimpses of Ecology*, India International Scientific Publication, New Delhi, 399-406.

De Feo, G, (2008). Definition of a practical multi-criteria procedure for selecting the best coagulant in a chemically assisted primary sedimentation process for the treatment of urban wastewater. *Desalination* 230 (1-3), 229–238.

De Gisi, S, (2017). Industrial Wastewater Treatment. Technical University of Bari, 23-25.

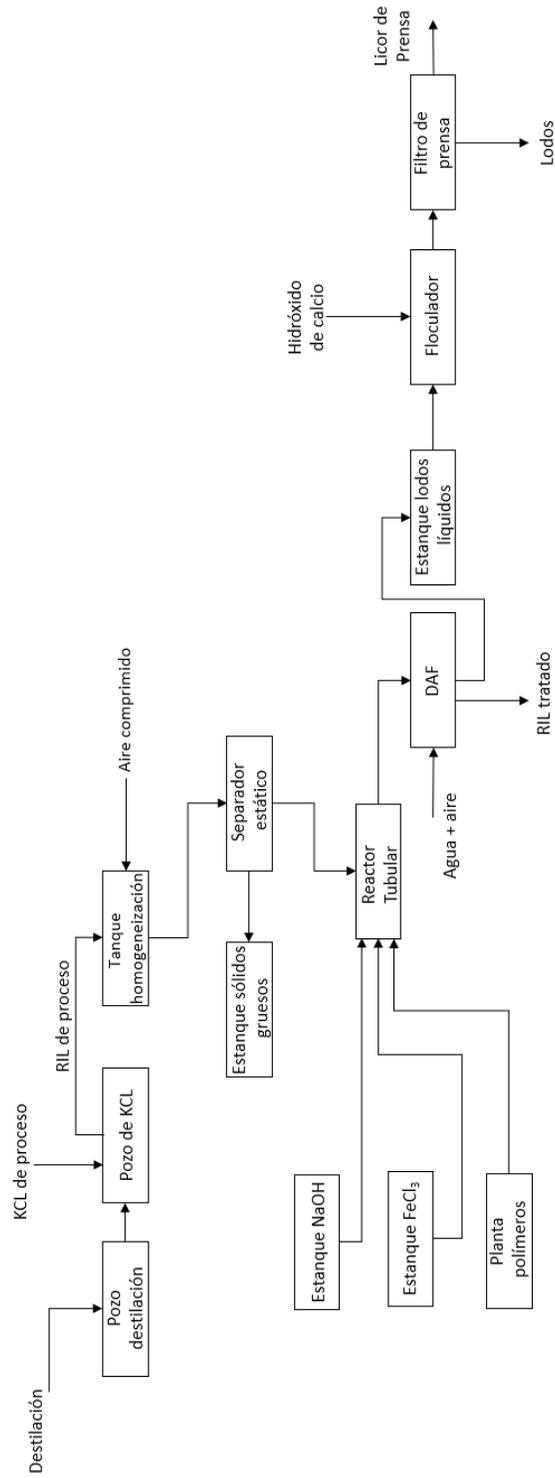
Department of Environmental Quality (DEQ), (2009). Activated sludge process control. Training manual for wastewater treatment plant operators, Water resources division, 1-11.

- Esparza M.H, (2006). Removal of high phenol concentrations with adapted activated sludge in suspended form and entrapped in calcium alginate/cross-linked poly(N-vinyl pyrrolidone) hydrogels, *Biotechnology Process*, vol. 22, 1552-1555.
- Hemalatha, B., (2013). Comparative evaluation of biodegradability of yardwaste and fruitwaste with industrial effluents by vermicomposting. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, E-ISSN2249-8974, Vol. II, 36-39.
- Jern, W, (2006). *Industrial Wastewater Treatment*. World Scientific Publishing Company, 3-27.
- Kharwade, A.M., Khedikar, I.P. (2011). Laboratory scale studies on domestic grey water through vermifilter and non-vermifilter. *Journal of Engineering Research and Studies*, E-ISSN0976-79, 35-39.
- Li, Y-S., Xiao, Y-Q., Qiu, J-P., Dai, Y-Q. and Robin, P. (2009). Continuous village sewage treatment by vermifiltration and activated sludge process. *Water Science and Technology*, Vol. 60, 3001-3010.
- Loehr, R.C, Martin, J.H, Neuhauser,E.F, & Malecki M.R, (1984). *Waste Management Using Earthworms: Engineering and Scientific Relationships*, National Science Foundation, Technical Report No. NSF/CEE-84007, 128.
- Lombifiltro Chile (2014). Proyecto Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Mediante Sistema Tohá o Lombrifiltro para loteo C.N.T. Tumbes. Informe de Diseño. *Ingeniería Ambiental*. 5-10.
- Lourenco, N., & Nunes, L. M., (2017). Optimization of a vermifiltration process for treating urban wastewater. *Ecological Engineering*, 100, 138-146.
- Natarajan, N. & Kannadasan N., (2015). Effect of Earthworms on Distillery Effluent Treatment through Vermifiltration. *Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 5, Issue 12, (Part -2), 102-106.
- NCh 2313/5. Of 96, decreto supremo N° 146 de 1996 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 5: Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5).
- Ramalho R.S, (1996). *Tratamiento de Aguas residuales*. Editorial Reverté, S.A.Barcelona, 47-63.

- Reed S.C, (1987). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, McGraw-Hill, N.Y.
- Renou, S, (2007). Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1098-1001.
- Salazar, P. I, (2005). Sistema Tohá; una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales. *Facultad Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile*, 5.
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R.R., (2017). A mechanistic review on vermifiltration of wastewater: Design, operation and performance. *Journal of Environmental Management*, 197, 656-672.
- Sinha R.K., Bharambe, G., and Bapat, P., (2007). Removal of high BOD and COD loadings of primary liquid waste products from dairy industry by vermifiltration technology using earthworms”, *Indian Journal of Environmental Protection*, 27(6), 486-501.
- Sinha, R. K., Bharambe, G., & Chaudhari, U. (2008). Sewage treatment by vermifiltration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low-cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *The Environmentalist*, 409-420.
- Sonune, A, (2004). Developments in wastewater treatment methods. *Desalination*, 167, 55-63.
- Visvanathan, C, Trankler, J, Jospeh, K, & Nagendran, R, (2005). *Vermicomposting as an Eco-tool in Sustainable Solid Waste Management*; Asian Institute of Technology, Anna University.
- Wang, L, Zheng, Z, Luo X, Zhang J, (2011). Performance and mechanisms of a microbial-earthworm ecofilter for removing organic matter and nitrogen from synthetic domestic wastewater. *Journal of Harzadous Materials*, 195, 245-248.
- Wiszniowski, J, (2016). The effect of temperature on the efficiency of industrial wastewater nitrification and its (geno)toxicity. *Archives of Enviromental Protection*, Vol.42, no. 1, 27-34.

ANEXOS

ANEXO A. Diagrama de bloques planta tratamiento de RILes actual utilizado en DuPont Planta Parga.



ANEXO B. Ficha de seguridad Cloruro Férrico

Cloruro Férrico	
Nombre común	Cloruro Férrico
Número CAS	7705-08-0
Peso molecular	162.2 g/mol

Propiedades físicas

Propiedades	Valores (con unidades)
Punto ebullición	316 °C
Punto de fusión	304 °C
Olor	Ácido clorhídrico
pH	1,8
Estado Físico	Negro a café
Solubilidad en agua	480 g/L a 20 °C
Densidad de vapor vs. Aire	5.6
Presión de vapor	1 hPa a 20 °C
Viscosidad	14 cP

Reactividad química

Propiedades	Condiciones
Data de corrosión	Corrosivo a la mayoría de los metales
Data estabilidad química/térmica	Estable bajo condiciones de almacenamiento
Información de incompatibilidad	Fuertes agentes oxidantes, potasio, metales alcalinos, bases, exotérmico en contacto con agua.
Información de descomposición	Cuando se calienta hasta el punto de descomposición emite gases altamente tóxicos.
Formación de reacción.	Reacciona con agua para formar gases tóxicos y corrosivos.

ANEXO C. Parámetros de descarga fuera de la protección litoral.

Límites máximos de concentración para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la zona de protección litoral

Contaminantes	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	mg/L	150
Sólidos sedimentables	ml/l/h	20
Sólidos suspendidos totales	mg/L	300
Aluminio	mg/L	10
Arsénico	mg/L	0,5
Cadmio	mg/L	0,5
Cianuro	mg/L	1
Cobre	mg/L	3
Índice de Fenol	mg/L	1
Cromo Hexavalente	mg/L	0,5
Cromo total	mg/L	10
Estaño	mg/L	1
Fluoruro	mg/L	6
Hidrocarburos totales	mg/L	20
Hidrocarburos volátiles	mg/L	2
Manganeso	mg/L	4
Mercurio	mg/L	0,02
Molibdeno	mg/L	0,5
Níquel	mg/L	4
pH	Unidad	5,5 - 9,0
Plomo	mg/L	1
SAAM	mg/L	15
Selenio	mg/L	0,03
Sulfuro	mg/L	5
Zinc	mg/L	5

ANEXO D. Imágenes lombrifiltro a escala de laboratorio



(i) Armazón lombrifiltro



(ii) Primera capa de piedras 7-9cm.



(iii) Segunda capa con piedras de 3-5cm y grava pequeña.



(iv) Tercera capa de arena y cuarta capa de compost, aserrín y tierra de hoja.

ANEXO E. Normas chilenas para la medición de distintos parámetros.

- NCh 2313/3, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 3: Determinación de Sólidos Suspendedos Totales secados a 103°C - 105°C.
- NCh 2313/1, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 1: Determinación pH.
- NCh 2313/2, Of 95, decreto supremo N° 545 de 1995 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 2: Determinación de la Temperatura.
- NCh 2313/5, Of 96, decreto supremo N° 146 de 1996 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 5: Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).
- NCh 2313/6, Of 97, decreto supremo N° 317 de 1997 del Ministerio de Obras Públicas: Aguas Residuales - Métodos de análisis Parte 6: Determinación de Aceites y Grasas.

ANEXO F. Sección de reemplazo por el lombrifiltro.

