

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE PROCESOS DE OXIDACIÓN PARA
LA REMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.**

NATALIA ERMINIA QUEZADA ALVARADO

PROYECTO DE HABILITACION PROFESIONAL
PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA DE LA UNIVERSIDAD DE
CONCEPCIÓN, PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL.

CHILLÁN-CHILE

2022

**ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE PROCESOS DE OXIDACIÓN PARA
LA REMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.**

Aprobado por:

Mónica Montory González
Bioquímica, Dra.
Profesora Asistente

Profesor Guía

Javier Ferrer Valenzuela
Ingeniero Civil Químico, Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Sebastián Boltaña Harms
Biólogo Marino Dr.
Profesor Asociado

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesor Asistente

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesor Asociado

Decana

AGRADECIMIENTOS

Después de años pensando en que esto sucedería, me cuesta encontrar las palabras para expresar lo que se siente al cumplir una etapa de la vida.

La universidad fue una etapa de mucho aprendizaje, donde descubrí mis capacidades, mi personalidad y mis ganas de siempre anhelar más.

Agradezco a la Universidad de Concepción y a la Facultad de Ingeniería Agrícola por permitirme crecer como profesional y persona, a los profesores por darme la confianza de trabajar y aprender aún más, y a los años de dirigente estudiantil que crearon confianza en mis decisiones.

En esta etapa que culmina, después de años de espera, en este documento, agradezco a quienes me han motivado a ser mejor y seguir adelante, a quienes no han sido egoístas y me han demostrado que puedo volar y cumplir mis sueños; agradezco a mi madre, por enseñarme que el “no puedo”, no existe, a mis abuelos que a pesar de su edad siguen esforzándose día a día, quienes me demostraron que no hay que bajar los brazos, y a mis tíos y su familia, que me enseñan que el amor es siempre está presente y que jamás estaré sola.

Y por último agradezco al amor por enseñarme que la vida siempre sigue y que soy suficiente.

Desde la distancia, cumpliendo mis sueños, ¡muchas gracias!

Taltal, julio de 2022

INDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN	1
SUMMARY	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS	7
1.1.1 INDUSTRIA DE CELULOSA	9
1.2 PROCESOS OXIDATIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	12
1.2.1 FOTOOXIDACIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo General	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1. Reactores	17
3.2. Aguas de muestra	17
3.3. Montaje y método experimental	18
3.3.1. Tratamiento Reactor UV	18
3.4. Análisis final	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1. BIOENSAYOS CON DANIO RERIO	23
4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	26
4.3. PARÁMETROS GENERALES	28
4.4. ENSAYOS DE COLORIMETRÍA	30
5. CONCLUSIONES	38
6. BIBLIOGRAFÍA	39

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Clasificación de contaminantes presentes en el agua (Modificado de Chulluncuy-Camacho, 2011).....	14
Tabla 2. Conteo de plantas de celulosa kraft operantes en Chile al año 2011, según ATCP Chile.....	16
Tabla 3. Ventajas de procesos de oxidación avanzada, Modificada de Domènech (2001).....	18
Tabla 4. Alternativas metodológicas para pruebas reactor fotooxidativo.....	25
Tabla 5. Concentraciones variables por utilizar, para las experiencias con H_2O_2	26
Tabla 6. Índices de Oxígeno disuelto, pH y Conductividad antes y después del tratamiento.....	33
Tabla 7. Resultados en Unidades de Color de tiempo cero a 300 minutos bajo tratamiento.....	34

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Distribución de consumo y generación de aguas residuales según uso. (Modificado de UNESCO, 2017).....	9
Figura 2.	Lineamientos de los ODS establecidos por la Organización de las Naciones Unidas.....	10
Figura 3.	Distribución de los usos de agua en nuestro país.....	11
Figura 4.	Gráfica condición hídrica entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos (A LA NACIÓN, 2015).....	12
Figura 5.	Configuración común a la distribución y usos del recurso hídrico.....	13
Figura 6.	Diagrama del proceso productivo de la celulosa kraft con blanqueo ECF (Luraschi, 2007).....	15
Figura 7.	Equipo estabilizador de pH.....	23
Figura 8.	Configuración estructural de reactor fotocatalítico comercial.....	24
Figura 9.	Ilustración montaje experimental de reactor comercial para el tratamiento de RIL.....	24
Figura 10.	Ilustración montaje experimental de reactor construido para el tratamiento de RIL.....	25
Figura 11.	Formato utilizado de Peróxido de Hidrogeno para el tratamiento de degradación de color de Ril de celulosa.....	26
Figura 12.	Equipo para medición de colorimetría.....	27
Figura 13.	Montaje de tubos Falcon rotulados para proceso de medición de color pre y post filtrado.....	27
Figura 14.	Disposición de los peces en acuarios.....	28
Figura 15.	Quistes de Artemia Salina, en medio para la eclosión.....	30

Figura 16.	Materiales utilizados para la construcción del reactor local.	31
Figura 17.	Resultado visible del tratamiento con 70 mL de peróxido más luz ultravioleta.....	35

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación 1. Tiempo de residencia hidráulica	27
Ecuación 2. Velocidad de salida de flujo del reactor	27
Ecuación 3. Número de Reynolds.....	28

ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE PROCESOS DE OXIDACIÓN PARA LA REMEDIACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES OF OXIDATION PROCESSES FOR
THE REMEDIATION OF WASTEWATER.

Palabras Claves: Oxidación avanzada, efluentes líquidos, tratamiento de efluentes, remoción de color.

RESUMEN

El objetivo del presente documento fue analizar, determinar y relacionar la mejor alternativa de tratamiento depurativo para efluentes de aguas residuales de la industria de la celulosa a escala de laboratorio, evaluando además el contraste de dos equipos de oxidación avanzada, en primer lugar la alternativa que podemos encontrar en el mercado, reactor industrial, respecto a una misma elaborada con materiales de fácil accesibilidad, reactor casero.

El análisis se realizó mediante la comparación de efectividad y rendimiento en la remoción de color, el cual se presenta en muchas ocasiones como indicador de contaminantes en efluentes líquidos.

Los resultados indican que ambos formatos de la alternativa de oxidación avanzada aplicada son efectivos, el cambio de materiales no genera un impacto significativo en el rendimiento y se logra de forma perfecta el tratamiento de esta propiedad organoléptica mediante la fotooxidación.

TECHNOLOGICAL ALTERNATIVES OF OXIDATION PROCESSES FOR THE REMEDIATION OF WASTEWATER.

Keywords: Advanced oxidation, liquid effluents, effluent treatment, color removal.

SUMMARY

The objective of this document was to analyze, determine and relate the best treatment alternative for wastewater effluents from the pulp industry on a laboratory scale, also evaluating the contrast of two advanced oxidation equipment, in the first place that the alternative we can find in the market, an industrial reactor, compared to a poorly made one with easily accessible materials, a homemade reactor.

The analysis was carried out through the comparison of efficacy and performance in the removal of color, which is presented on many occasions as an indicator of contaminants in liquid effluents.

The results indicate that both formats of the applied advanced oxidation alternative are effective, the change of materials does not generate a significant impact on performance and the treatment of this organoleptic property is perfectly achieved through photooxidation.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las mayores problemáticas del siglo XXI es, quizá, la necesidad de proveer agua para la creciente población mundial. El suministro de agua debe satisfacer las demandas para consumo humano, agrícola e industrial, como se muestra en la Figura 1. El panorama es tan preocupante que se estima que una sexta parte de la población mundial no tiene garantizado el acceso al agua potable (Arango, 2013).

El crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización, el aumento de la producción y el consumo han generado una demanda de agua dulce que cada día va en aumento.

En las distintas investigaciones realizadas en torno al déficit que se presenta respecto al recurso, se estima que para el 2030, el mundo tendrá que enfrentarse a un déficit mundial del 40% de agua en un escenario climático en que todo sigue igual. En la actualidad, dos tercios de la población mundial vive en regiones donde sufren escasez de agua al menos un mes al año. Unos 500 millones de personas viven en zonas donde el consumo de agua supera los recursos hídricos renovables localmente en una proporción de dos a uno (Ryder, 2017).

Este problema, ya ampliamente estudiado, se ve fomentado por la falta de equilibrio entre las aguas utilizadas y las aguas recuperadas y tratadas. A nivel

mundial, se estima que más del 80% de las aguas residuales en todo el mundo no se recolectan ni se tratan (UNESCO, 2012).

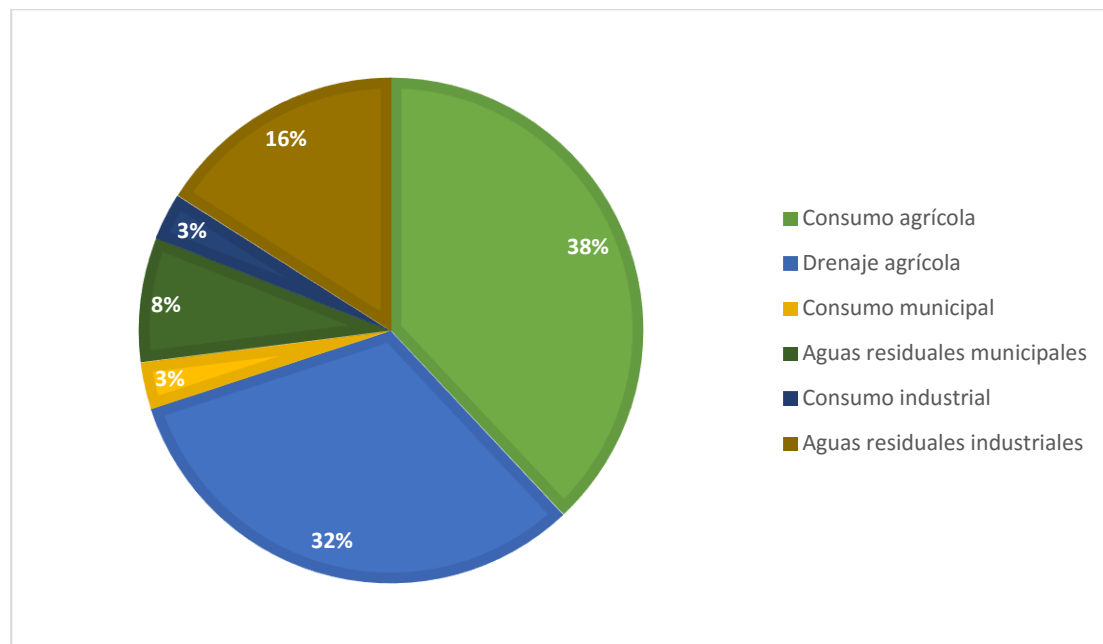


Figura 1. Distribución de consumo y generación de aguas residuales según uso.
(Modificado de Ryder, 2017)

Según Arango (2013), mientras que la demanda de agua va en aumento en relación con el recurso hídrico disponible, existe una explotación desmedida de las fuentes, además de contaminación, mal uso y desperdicio, causados por la utilización de sistemas de distribución inadecuados e ineficientes. Complementándose con ciertos obstáculos en el tratamiento de las distintas aguas residuales generadas.

Es así como a partir de estos antecedentes el conflicto hídrico ha sido un enfoque prioritario a nivel mundial, siendo incorporado dentro de la nombrada “Agenda 2030”, donde se proponen los 17 objetivos del desarrollo sostenible

(ODS), mecanismos enfocados en contribuir en este plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad.



Figura 2. Lineamientos de los ODS establecidos por la Organización de las Naciones Unidas.

Como de observar en la fig. 2, el ODS n°6, tiene como prioridad la calidad del recurso hídrico otorgada a la población, la ONU ha expresado en diversas situaciones que respecto a este objetivo la intención es “Garantizar la disponibilidad de agua y su ordenación sostenible y el saneamiento para todos”.

En este contexto nuestro país ha tomado la tarea de trabajar de forma específica estos objetivos y mecanismos dado que el conflicto del recurso no queda ajeno al acontecer nacional.

Frases como “la cantidad de agua que fluye en los ríos de Chile central se ha visto reducida en directa respuesta al déficit de precipitaciones durante la megasequía, cuyo efecto también es evidente en lagos, embalses, nieve y aguas subterráneas”, expresado en el Informe a la Nación ((CR)2, 2015), se repiten diariamente, respecto al estado de este déficit hídrico en el territorio chileno.

Generándose una gran discusión en torno a los distintos usos del recurso. Dentro del cual con un 6%, muy por debajo de las áreas de la agricultura y sanitaria, se posiciona la distribución del uso industrial (Figura 3).

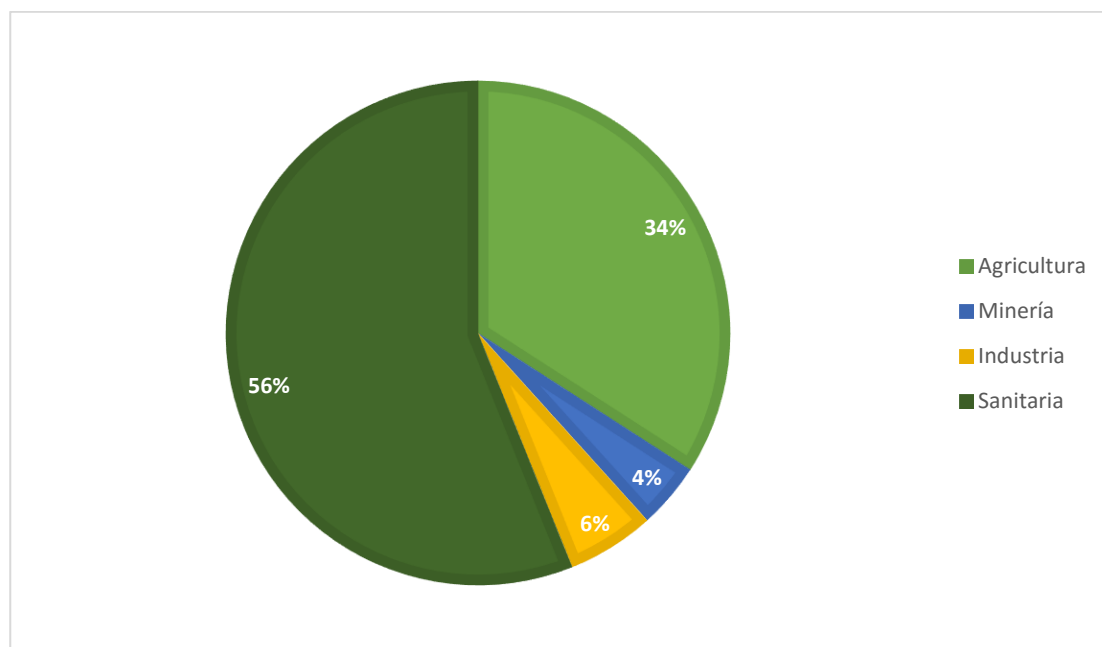


Figura 3. Distribución de los usos de agua en nuestro país.

Por lo cual, y debido al déficit hídrico, señalado en el Informe a la Nación La Megasequía 2010-2015: Una lección para el Futuro de (CR)2, que se ha desarrollado en Chile a través de los años, con un déficit promedio superior al

30% para el año 2014 entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos (Figura 4), es necesario fomentar la reutilización del recurso hídrico, para aportar en la disminución del gasto del recurso disponible, y por sobre todo dando una mirada a la nueva Región de Ñuble que abarca un área de 13.178,5 km² y un aproximado de 469.594 habitantes (INE, 2017) y con Chillán como capital regional, donde se puede desarrollar nuevas instancias de tratamientos y posterior enfoque al reúso de las aguas generadas en el área industrial.

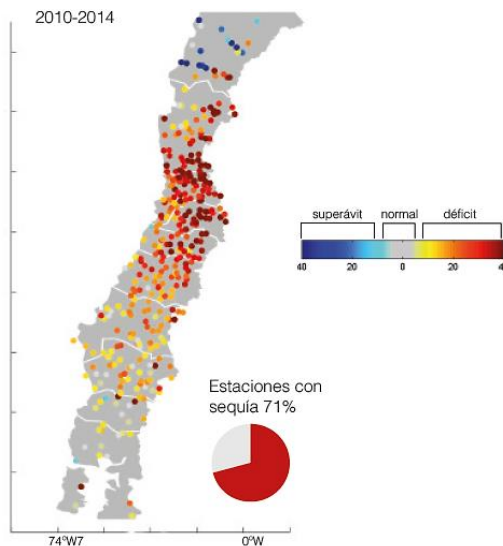


Figura 4. Gráfica condición hídrica entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos ((CR)2, 2015).

1.1 RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS

El vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres, según tengan: efectos nocivos para la salud humana; efectos ambientales negativos; repercusiones desfavorables para las actividades económicas (Ryder, 2017). Esto debido a la configuración

tradicional en temas de consumo, uso y desecho de estos residuos como se grafica en la Figura 5.

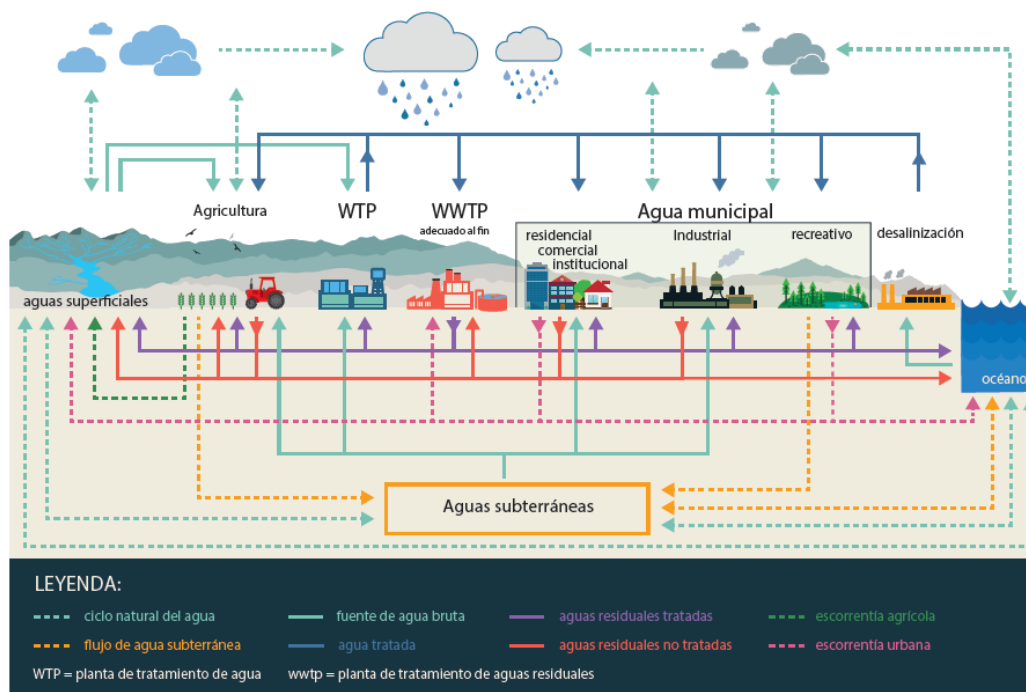


Figura 5. Configuración común a la distribución y usos del recurso hídrico.

Estas limitaciones de los métodos convencionales han sido un incentivo para desarrollar sistemas más eficientes. Dado que algunos de los contaminantes en los efluentes industriales no son biodegradables, los procesos de tratamiento convencionales no son suficientes. Para cumplir con los límites de descarga, las fábricas se ven obligadas a adoptar y probar nuevos sistemas de tratamiento no convencionales y tecnológicamente avanzados para reducir los compuestos orgánicos refractarios (Kim & Ihm, 2011) y en ocasiones con gran diligencia, el color de los procesos de aguas residuales (Karimi et al., 2009).

Tabla 1. Clasificación de contaminantes presentes en el agua (Modificado de Chulluncuy, 2011).

Físicos	Químicos	Gaseosos	Biológicos
Color	Materia orgánica	Anhídrido Carbónico	Bacterias
Olor y sabor	Acidez/Alcalinidad	Metano	Hongos
Grasas y aceites	pH	Ácido Sulfhídrico	Protozoos
Espumas	Netrógeno		Algas
Radiactividad	Fósforo		Animales
Temperatura	Salinidad		Plantas
Sólidos disueltos	Metales pesados		Virus
Sólidos suspendidos	Detergentes		
	Compuestos tóxicos		
	Pesticidas		

El color es una característica física común en aguas residuales industriales que generan un impacto visual preponderante a tratar.

1.1.1 INDUSTRIA DE CELULOSA

Los residuos líquidos del proceso productivo de la celulosa contienen compuestos orgánicos presentes en la madera que se disuelven, compuestos orgánicos que se forman en las reacciones con los reactivos de blanqueo y pulpage, y finalmente, reactivos y otros materiales que se pierden durante el proceso productivo. Algunos de los principales compuestos orgánicos que se disuelven desde la madera son: carbohidratos, compuestos fenólicos y derivados de la lignina, ácidos resínicos y ácidos grasos (Luraschi, 2007).

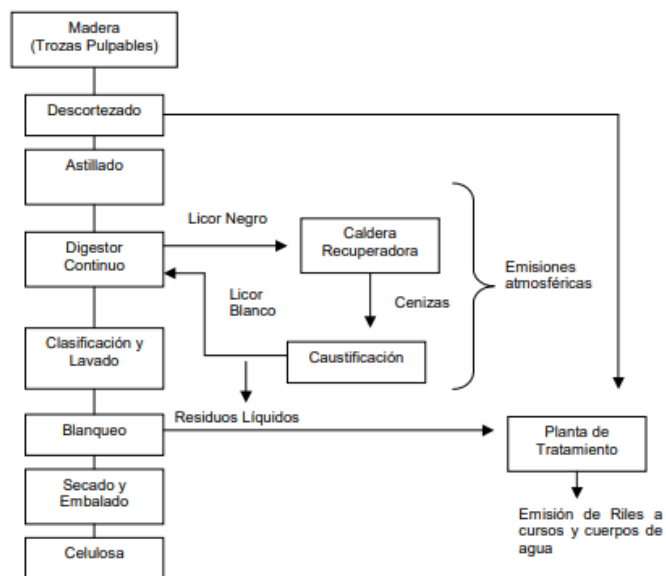


Figura 6. Diagrama del proceso productivo de la celulosa kraft con blanqueo ECF. (Fuente: Luraschi, 2007).

Dado al proceso productivo (fig. 6) de la materia prima, la madera, hasta llegar al producto de exportación, la celulosa, se reconoce una serie de actividades las cuales terminan en la producción y emisión de estos RILes, los cuales están condicionados al tipo de madera utilizada en el proceso, pero en su generalidad estos efluentes traen consigo características comunes, una de ellas es el color amarillo traslúcido característico.

En nuestro país, basada en la política exportadora del país, el sector forestal chileno comenzó la comercialización de sus productos en los cinco continentes, posicionándose como el segundo componente generador de divisas, después de la industria minera, y el primero basado en recursos renovables (CONAF, 2015). En esta industria, destaca la producción de celulosa, elemento constitutivo de la madera, representando casi un 45% del valor total de la producción del sector (Torres, 2017).

El sector forestal chileno basa su producción actual, principalmente, en la plantación de dos especies foráneas, el pino radiata (*Pinus radiata*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus*, principalmente), las cuales han logrado una muy buena adaptación a las condiciones locales de clima y suelo en la zona sur o centro-sur del país (Luraschi, 2007). Destacándose en la industria, las plantas expuestas en la tabla 2.

Tabla 2. Conteo de plantas de celulosa kraft operantes en Chile al año 2011, según ATCP Chile.

PLANTAS DE CELULOSA KRAFT EN CHILE		
Planta	Región	Propietario
Licancel	VII	Celulosa ARAUCO
Celco	VII	Celulosa ARAUCO
Arauco	VIII	Celulosa ARAUCO
Pacífico	IX	Celulosa ARAUCO
Valdivia	X	Celulosa ARAUCO
Nueva Aldea	VIII	Celulosa ARAUCO
Laja	VIII	Empresas CMPC
Santa Fe	VIII	Empresas CMPC
Santa Fe Línea II	VIII	Empresas CMPC

Pero como se menciona anteriormente, las fuentes de entrada al ambiente de sustancias contaminantes, de mayor importancia, son las aguas residuales no tratadas, plantas las cuales no están actualizadas para tratar sustancias persistentes y recalcitrantes, ni mucho menos han logrado modificar el color sustantivo que se identifica en sus riles generados.

De esta manera, la búsqueda de alternativas de tratamiento con el objetivo de refinar la depuración de residuos industriales líquidos (RIL), es una instancia con gran valor para realizar un estudio de las alternativas expuestas.

1.2 PROCESOS OXIDATIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En algunos casos, como por ejemplo al tratar contaminantes emergentes, los procedimientos convencionales resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso ulterior del efluente tratado, en estos casos, se está recurriendo en los países industrializados al uso de las llamadas Tecnologías o Procesos Avanzados de Oxidación (TAOs, POAs), muy poco aplicados y/o menos difundidos en los países de economías emergentes como los de América Latina (Domènech, 2001).

Los Procesos de Oxidación Avanzada, son definidos como los procesos fisicoquímicos que implican la formación de OH^\cdot , es decir, radicales hidroxilos los cuales tienen potenciales oxidativos por encima de los oxidantes utilizados tradicionalmente, capaces de producir profundos cambios en la estructura química de los contaminantes, además de contener distintas ventajas en el proceso de depuración, reflejadas en Tabla 3.

Tabla 3. Ventajas de procesos de oxidación avanzada, Modificada de Domènech (2001).

Ventajas de los Procesos de Oxidación Avanzada
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Provocan una transformación química en el contaminante. ➤ Consigue, generalmente, la mineralización completa del contaminante. ➤ Generalmente, se da de forma nula o en muy pequeñas proporciones la generación de lodos. ➤ Tratan eficazmente contaminante refractarios, los cuales resisten fácilmente tratamientos convencionales ➤ Tratan contaminantes a baja concentración. ➤ Usualmente no se forman subproductos de la reacción. ➤ Mejoran propiedades organolépticas del agua tratada. ➤ Generalmente, el consumo de energía es menor que en algunos tratamientos convencionales.

También la oxidación avanzada es una de las alternativas más firmes en la sustitución de las tecnologías de desinfección más comunes como la cloración, que como se ha comprobado puede generar sustancias dañinas, por lo cual se ha utilizado como una opción terciaria en el proceso de tratamiento de riles industriales como también de aguas residuales.

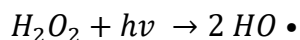
En rasgos generales, los POAs consisten en la aplicación de un agente oxidante (O₃, H₂O₂, etc.) combinado con un agente catalítico (TiO₂, Fe²⁺,

Fe³⁺, etc.) y la posibilidad de utilizar una fuente de energía (radiación UV, energía eléctrica y/o ultrasonidos), siendo los procesos más comunes: la fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO₂), el proceso Fenton y foto-Fenton, el sistema UV/H₂O₂, la ozonización, y la electro-oxidación (Rubio, 2013).

1.2.1 FOTOOXIDACIÓN

El método UV/H₂O₂ es uno de los POAs más antiguos, y ha sido exitoso en la remoción de contaminantes presentes en aguas y efluentes industriales, incluyendo organoclorados alifáticos, aromáticos, fenoles (clorados y sustituidos) y plaguicidas (Domènech, 2001).

Tratamiento de oxidación avanzada, que además de utilizar un agente oxidante como lo es el Peróxido de Hidrógeno, utiliza la luz UV para generar radicales hidroxilos (\bullet OH), los cuales inician una serie de reacciones por radicales que atacan la estructura de las moléculas orgánicas para que estas puedan descomponerse en sustancias que sean biodegradables más fácilmente, y en algunos casos llegar a la mineralización de estas moléculas (Machado *et al.*, 2003). La reacción producida entre estos dos factores, producen dos radicales hidroxilos por cada molécula de peróxido de hidrogeno, como muestra la siguiente ecuación:



Este proceso tiene grandes ventajas, como, por ejemplo, el agente oxidante es bastante accesible de forma comercial y no tiene grandes exigencias de operación y almacenaje ya que una de sus características es su estabilidad térmica, posee un alto índice de solubilidad en agua, además de ser muy efectivo en la producción de radicales hidroxilos (Domènech, 2001).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar las alternativas de procesos oxidativos como tratamiento depurativo en efluentes de residuos líquidos industriales de planta de celulosa.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar metodologías asociadas al cultivo del organismo *Danio Rerio*, como un potencial indicador de toxicidad en los procesos de oxidación.
- Diseñar y construir un equipo de fabricación local, para el tratamiento de efluentes por oxidación.
- Analizar el rendimiento de remoción de color de efluente secundario de celulosa, comparando el desempeño del equipo fabricado con el aparato comercial.

3. METODOLOGÍA

3.1. Reactores

Para la evaluación de distintas alternativas, se implementaron pruebas en dos tipos de reactores; un reactor comercial y un reactor construido en base a las características del anterior.

Materiales utilizados para la construcción del segundo reactor fueron: Vidrio, PVC, Tubo de boro silicato, lámpara (UV 25W G25WT5) y base de soporte de acero.

3.2. Aguas de muestra

Fueron utilizados efluentes de residuos industriales líquidos (RILes) provenientes de la línea secundaria de la planta de celulosa ARAUCO S.A., para esto se utilizó el protocolo instaurado en el Manual Operativo de la Norma de Muestreo de Aguas Residuales de la NCh 411/10 (SISS, 2010).

Posterior a la obtención de muestras, se registraron distintos parámetros de estas, para realizar la caracterización adecuada de los componentes del agua muestra, medidos en Laboratorio de Biotecnología Hidroambiental, empleando Multiparamétrico HANNA HI 4522, donde se obtienen valores sobre pH, conductividad y oxígeno disuelto.

Fueron usados aproximadamente 1,4 litros de muestra por experiencia estabilizados (fig. 7) a 7.0 de pH inicial, debido a esto se estimó reunir 30 litros totales de RIL para completar la investigación.



Figura 7. Equipo estabilizador de pH.

3.3. Montaje y método experimental

El sistema experimental empleado para la realización de la investigación de este proyecto se realizó en los reactores a escala de laboratorio (fig.8), para el tratamiento mediante fotooxidación, con capacidad para tratar 1,4 L. de RIL. Para estas experiencias basadas en los procesos de oxidación avanzada, las muestras de agua residual fueron tratadas con peróxido de hidrogeno, H_2O_2 , agente oxidante a 10 volúmenes, es decir, constituido por 3 gramos del compuesto puro cada 100 ml. de agua.

3.3.1. Tratamiento Reactor UV

Se montó el reactor comercial Equipo Purificación LTC-UV 40W (figura 9), para pruebas base, el cual consta con un tubo de cuarzo 18x20, 5x490 mm. y una lámpara UV 25W G25WT5, en él se encuentra una entrada y una salida de agua de muestra, conteniendo un volumen interno del reactor de 813 cm^3 de muestra, además de un volumen externo (contenedor externo y sistema de circulación) el cual completa un total de 1400 cm^3 .

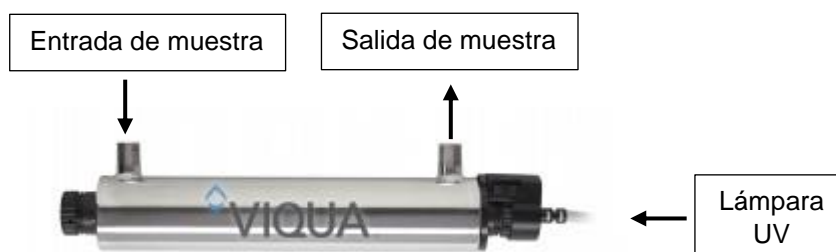


Figura 8. Configuración estructural de reactor fotocatalítico comercial.
(Fuente: elaboración propia)



Figura 9. Ilustración montaje experimental de reactor comercial para el tratamiento de RIL.
(Fuente: Elaboración propia)

El segundo reactor fue montado utilizando una lámpara UV con las mismas características que el reactor comercial, el volumen contenido en las paredes de cuarzo fue semejante, 1400 cm^3 agua de muestra.



Figura 10. Ilustración montaje experimental de reactor construido para el tratamiento de RIL.
(Fuente: Elaboración propia)

Debido a las características del reactor construido, se realizaron distintas pruebas, generándose diversas alternativas de combinaciones para evaluar efectividad del tratamiento, dentro de las cuales se tiene, la utilización de luz UV y de agente oxidante (H_2O_2), ambos a distintas concentraciones, todo a temperatura ambiente ($25 \pm 1^\circ\text{C}$), como se expone en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Alternativas metodológicas para pruebas reactor fotooxidativo.

Experiencia	Alternativas
1	Muestra + UV
2	Muestra + H_2O_2
3	Muestra + UV + H_2O_2

Tabla 5. Concentraciones variables por utilizar, para las experiencias con H_2O_2 .

Volumen de H_2O_2 (mL)	Concentración de H_2O_2 (g/L)*
70	1,5
35	0,75
15	0,32
7	0.15



Figura 11. Formato utilizado de Peróxido de Hidrogeno para el tratamiento de degradación de color de Ril de celulosa (Fuente: Elaboración propia).

3.4. Análisis final

El muestreo en los reactores (reactor fotooxidativo comercial y construido) será después de 300 minutos, con lo cual se visualizarán resultados de ambos procesos, en una muestra de la misma naturaleza, realizando una prueba final de coloración hazen 465, utilizando Spectroquant Prove 600.



Figura 12. Equipo para medición de colorimetría.

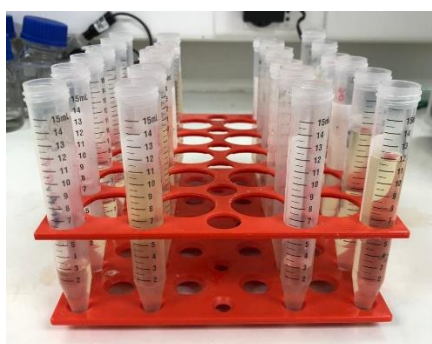


Figura 13. Montaje de tubos Falcon rotulados para proceso de medición de color pre y post filtrado (Fuente: Elaboración propia).

Además, se realizarán nuevas pruebas para caracterizar el agua de salida, midiendo y comparando los parámetros que se obtuvieron en el agua de entrada de los reactores, de esta forma se podrá observar la eficiencia del tratamiento.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. BIOENSAYOS CON *DANIO RERIO*.

Para comprobar la eficiencia post tratamiento, se realizó el estudio en el Bioterio del Centro de Biotecnología de la Universidad de Concepción Campus Concepción, del bioindicador *Danio Rerio* como potencial analizador de toxicidad aguda. Una de las características que hace a este modelo atractivo para investigación, según Vargas-Vargas (2017), es que el desarrollo embrionario y larval ocurre externamente y el proceso de desarrollo desde la fertilización hasta la edad de adulto joven es rápido. Por otro lado, una de las mayores ventajas es que en las primeras etapas de vida, embrionaria y larval, el pez cebra es transparente, lo que permite hacer seguimiento directo del desarrollo y funcionamiento de órganos internos en condiciones normales, con técnicas de microscopía convencional, sin que se requiera sacrificar al animal o colocarlo en microambientes artificiales.



Figura 14. Disposición de los peces en acuarios
(Fuente: Elaboración propia).

El estudio realizado contemplaba conocer todos los parámetros y factores primordiales para mantener la población necesaria de este individuo; alimentación, limpieza, cruza, preparación de medio, entre otros. Además de analizar el protocolo de bioensayos de toxicidad de la hormona 17 β -Estradiol (E2), trabajado dentro del laboratorio, replicándolo basados en las características comunes de esta hormona con el contenido del agua de muestra.

Basado en las alternativas de tratamiento propuestas, se necesitaba una gran cantidad de individuos en su etapa embrionaria, pero se generó una carencia momentánea de nacimiento y eclosión de los peces, haciéndose necesaria

probar nuevos protocolos, donde se dio enfoque a trabajar con *Artemia Salina* para alimentar a los peces, ya que este organismo puede estar metabólicamente inactivo (quistes), cuando las condiciones del medio no son las adecuadas, por eso es sencillo trabajar con este tipo de alimento vivo ya que no necesitarán un cuidado diario ni será necesario reproducirlos para seguir teniendo más población (Moreno, 2013). Para activar el quiste de *Artemia*, se necesita controlar salinidad, luz, temperatura, etc. todo a niveles semejantes al agua de mar.

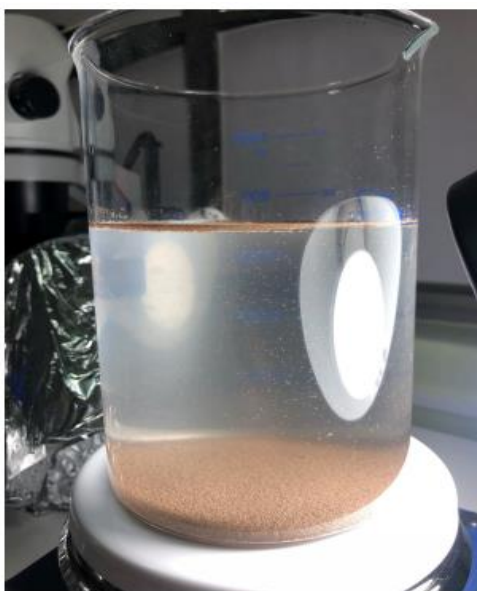


Figura 15. Quistes de *Artemia Salina*, en medio para la eclosión
(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de intentar mantener los parámetros a nivel ideal, se realizaron cinco pruebas de eclosión de Artemias, todas fallidas.

Por factores como el tiempo, baja tasa de reproducción, eclosión y nacimientos, se concluye como negativa la propuesta, quedando abierta para la próxima ocasión cuando se mejore la fertilidad de los peces.

4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Se diseñó un equipo con materiales de menor costo y fácil adquisición; tubo de vidrio, PVC y boro silicato para el cuerpo de la estructura en una base de soporte de acero, con las siguientes medidas:

Diámetro interno tubo de vidrio: 60,6 mm.

Diámetro interno tubo de borosilicato: 23 mm.

Largo del equipo fotocatalítico: 329,1 mm.



Figura 16. Materiales utilizados para la construcción del reactor local (Fuente: Elaboración propia).

La propuesta contempla realizar una comparación entre el equipo construido de forma local y un aparato comercial, ambos a escala de laboratorio, por lo

cual al momento de diseñar el equipo se calculó áreas y longitudes, para obtener un volumen semejante, siendo este de 813 mL. Volumen específico de reactor que tiene las siguientes medidas:

Diámetro interno tubo de acero: 61,5 mm.

Diámetro interno tubo de borosilicato: 23 mm.

Largo del equipo fotocatalítico: 318 mm.

Al tener un volumen (V) constante en ambos reactores y controlar el caudal (Q), se confirma trabajar con el mismo tiempo de residencia hidráulico (τ), dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = V/Q \quad [1]$$

$$\tau = 1400 \text{ mL} / 620 \frac{\text{mL}}{\text{min}}$$

$$\tau = 2,26 \text{ min}$$

Por otro lado, estableciendo un caudal común entre ambos reactores, y al haber diseñado el reactor local con un área interna semejante, podemos comprobar que la velocidad de salida es igual para ambos aparatos, dado lo siguiente:

$$v = Q/A \quad [2]$$

$$v = 620 \frac{\text{mL}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000000 \text{ mL}} / 0,40 \text{ mm}^2 * \frac{1 \text{ m}^2}{1000000 \text{ mm}^2}$$

$$v = 1550 \frac{m}{min} * \frac{1 min}{60 s}$$

$$v = 25,8 \frac{m}{s}$$

A partir de esto y siendo el mismo fluido tratado en ambos reactores, podemos concluir que la muestra que fluye por el interior de una manguera circular recta y llena está condicionada por el mismo flujo laminar dado al conocer y/o estimar el número de Reynolds, por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad [3]$$

Cuando las fuerzas viscosas del fluido tienen un efecto dominante en la pérdida de energía, el régimen del flujo se dice ser laminar, teniendo así un número pequeño de Reynolds, igual o menor 2100. Por el contrario, un flujo turbulento, se da con un número de Reynolds mayor a 10000, donde se entiende que las fuerzas viscosas no influyen en la pérdida de energía (Urrea, 2008).

4.3. PARÁMETROS GENERALES

Respecto a la caracterización del RIL se tienen los siguientes resultados:

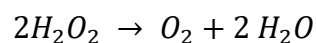
Tabla 6. Índices de Oxígeno disuelto, pH y Conductividad antes y después del tratamiento.

Parámetros	Pre-tratamiento	Post-tratamiento
Oxígeno Disuelto	78.7%	93.4%
pH	7.0	6.19
Conductividad	3350 $\mu\text{S/cm}$	3267 $\mu\text{S/cm}$

Se midió parámetros post-tratamiento a la experiencia con eliminación total de color a menor tiempo, es decir, a aquella la cual se trató con 70 mL. de peróxido de hidrogeno más aplicación de luz ultravioleta, para lograr la comparación de sus índices en general.

Tras la caracterización post-tratamiento, se logra apreciar la modificación que esta produce en la muestra, siendo mínima en lo que pH y conductividad refiere. Por otra parte, la gran diferencia en el antes y después de la muestra, trata sobre el Oxígeno Disuelto, llamando la atención que este parámetro aumente en un proceso continuo del flujo del RIL dentro del reactor, sin algún factor de aireación mecánico obligatorio.

Esto es sustentado por como lo explican algunos autores, en diversas situaciones, como por ejemplo Higuera & Tristáncho (2006), exponiendo que el peróxido de hidrogeno puede llegar a descomponerse espontáneamente en agua más oxígeno, dándose la siguiente reacción:



4.4. ENSAYOS DE COLORIMETRÍA

4.4.1 Tratamiento de Ril con Reactor Comercial.

Tabla 7. Resultados en Unidades de Color de tiempo cero a 300 minutos bajo tratamiento.

RIL									
Tiempo (min)	UV	70 mL H_2O_2 + UV	35 mL H_2O_2 + UV	15 mL H_2O_2 + UV	7 mL H_2O_2 + UV	70 mL H_2O_2	35 mL H_2O_2	15 mL H_2O_2	7 mL H_2O_2
0	323	324	324	321	351	331	333	374	347
30	371	198	281	321	375	265	273	322	323
60	390	80	218	319	386	250	271	317	322
90	404	3	115	294	374	242	268	314	317
120	422	0	17	256	341	238	271	308	313
150	434	-	0	207	292	230	267	305	313
180	446	-	-	157	248	221	261	301	309
210	458	-	-	105	181	217	261	299	310
240	476	-	-	65	127	215	257	299	306
270	473	-	-	45	81	211	248	301	302
300	475	-	-	29	37	205	243	300	302

La radiación UV sola es popular para la desinfección del agua, pero no tiene ninguna aplicabilidad en el tratamiento de efluentes (Covinich *et al.*, 2014). Esto se demuestra con los resultados de la primera prueba, valores en tabla 7, ensayo en el cual el tratamiento no dio ningún resultado de degradación de color, al contrario, este fue subiendo a medida con el tiempo.

Este resultado, en cierta medida se contradice a lo observado por Nagel-Hassemer *et al.* (2011) en su investigación del tratamiento para aguas residuales con extractos de tintes de industria de textiles, si bien no se ve gran significancia de degradación, al pasar la muestra por el tratamiento con luz UV a 0 mg L^{-1} , logra una pequeña diferencia disminuyendo el color, aun así, sustentando que para que el tratamiento con luz ultravioleta sea eficiente, se debe añadir un agente oxidante. Por lo cual, se puede inferir que la diferencia

de ambas investigaciones, dando un resultado propio de incremento en más de 150 unidades de color, está dado por las sustancias que componen la muestra de RIL de la industria de celulosa, donde reacciona la sustancia coloreada derivada de la Lignina y forma claramente subproductos que provocan mayor coloración.

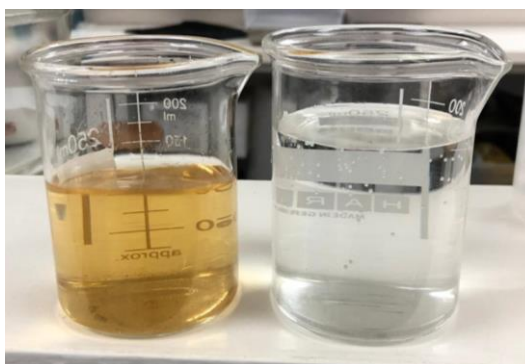


Figura 17. Resultado visible del tratamiento con 70 mL de peróxido más luz ultravioleta. A La izquierda, Ril de celulosa con color con el cual es eliminado a cuerpos de aguas superficiales. A la derecha, ril de celulosa luego de 120 minutos de tratamiento. (Fuente: Elaboración propia).

Dentro de los resultados, se puede observar que, en ambos tratamientos, UV/H_2O_2 y H_2O_2 , el tiempo de decoloración es inversamente proporcional al volumen aplicado de H_2O_2 , dándose a una mayor velocidad de reacción y degradación, en el tiempo que fue expuesta la muestra en el primer proceso, demostrando una sinergia de ambos factores.

Para la alternativa donde solo se aplicó distintas concentraciones de H_2O_2 , se observa una lenta degradación durante todo el tiempo de exposición dentro del reactor, por lo cual se entiende que a medida que el tiempo iba pasando, había una constante liberación del radical hidroxilo, el cual logra reducir y

atacar los compuestos coloreados de la muestra. Al ver la tendencia constante a decolorarse, se puede inferir que pasados los 300 minutos habría de continuar. Pero para ser un tratamiento eficiente en el factor tiempo, se ve la clara necesidad de aplicar un catalizador de la reacción provocada, es decir, nuevamente se comprueba que la eficiencia total de este tratamiento se da en enfrentar la muestra a la acción de la luz ultravioleta y el peróxido de hidrogeno.

4.4.2 Reactor comercial versus reactor construido.

Para la comparación de ambos reactores, comercial y construido, se utilizaron las mismas alternativas de tratamiento, en las mismas proporciones de volumen de oxidante y tiempo de exposición.

Se observa en todas las alternativas la misma tendencia en ambos reactores, dándose curvas de degradación de color muy similares, con diferencias insignificantes para el propósito de comparación.

Las opciones mas eficientes en términos de la degradación del color, como ha sido la tónica dentro de la investigación, es la combinación entre peróxido de hidrogeno y luz ultravioleta, siendo el primero en volumen mayor a 15 mL., ya que como se muestran en las figuras 18, 19 y 20, durante el tiempo determinado de 300 minutos de prueba, el color fue eliminado en su totalidad.

Para el volumen de 7 mL de H_2O_2 (figura 21), solo se aprecia que el reactor construido, degradó justo a tiempo (300 minutos) la totalidad de los

compuestos colorantes de la solución muestra, aún así, para el reactor comercial se aprecia que fue cuestión de tiempo la degradación total.

Las figuras 22, 23, 24 y 25, donde se observa el comportamiento de la muestra tratada bajo ambos reactores, con la inyección de peróxido de hidrogeno, sin haber utilizado la luz UV, tienen un comportamiento totalmente semejante, con una tendencia a la baja, pero para un tiempo de exposición mayor a las 5 horas, además, se denota que la diferencia entre los volúmenes aportados de H_2O_2 no son factores contribuyentes a la degradación de los compuestos coloreados de la lignina contenida en la muestra, ya que entre las cuatro diferentes concentraciones aportadas mediante los volúmenes de 70, 35, 15 y 7 mL. de peróxido de hidrogeno, se mueven entre los mismos tramos de color medido, es decir entre, las 250 y 350 unidades de color.

Respecto al contraste de ambos reactores, se demuestra que la pérdida de energía y luz generada en las conexiones de las piezas del reactor construido no condiciona ni afecta en nada el efecto causado por la reacción en sinergia de ambos factores, luz ultravioleta y peróxido de hidrogeno, también se demuestra que el cambio de materiales no ocasiona una diferencia tangencial en el propósito de atacar compuestos coloreados, por lo cual puede ser considerado una alternativa contundente en el momento de realizar reactores con el mismo propósito a escala industrial, ya que se transforma en una alternativa de menor costo, en relación a la compra de un reactor en el mercado compuesto por material de acero.

- Tratamiento de Ril con Luz Ultravioleta y 70 mL. de H₂O₂.

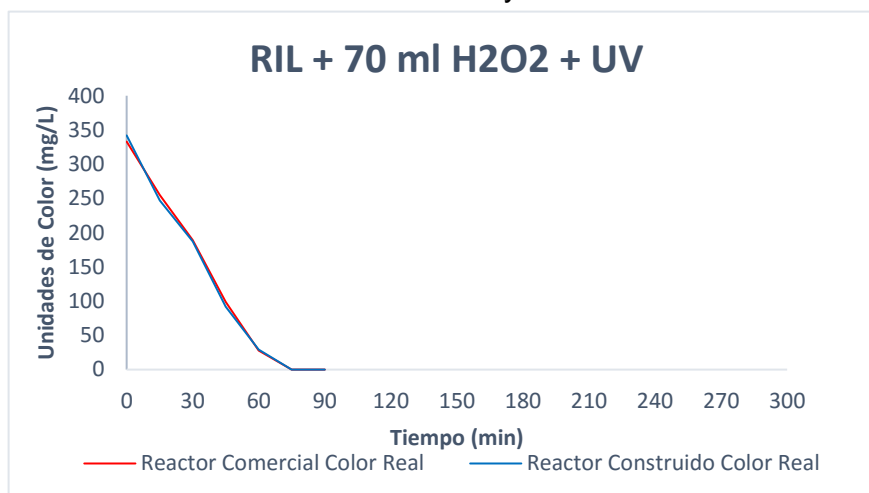


Figura 18. Contraste reactores a 70 ml H₂O₂ y luz UV.

- Tratamiento de Ril con Luz Ultravioleta y 35 mL. de H₂O₂.

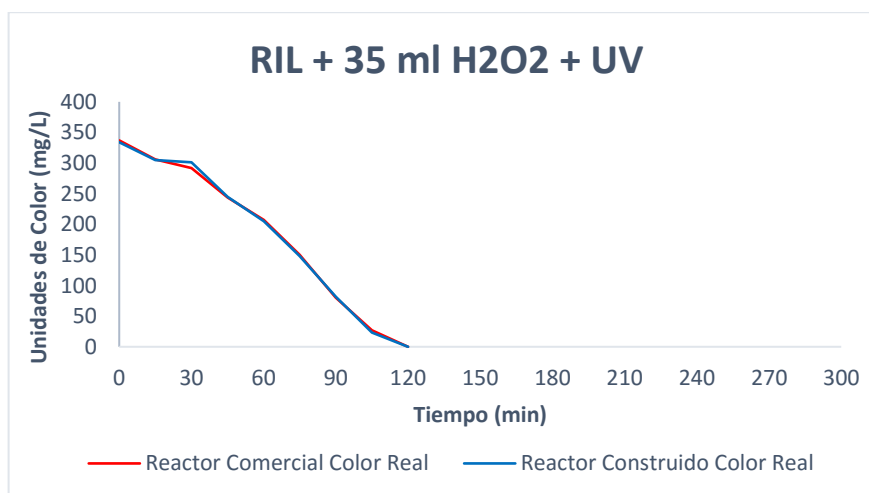


Figura 19. Contraste reactores a 35 ml H₂O₂ y luz UV.

- Tratamiento de Ril con Luz Ultravioleta y 15 mL. de H₂O₂.

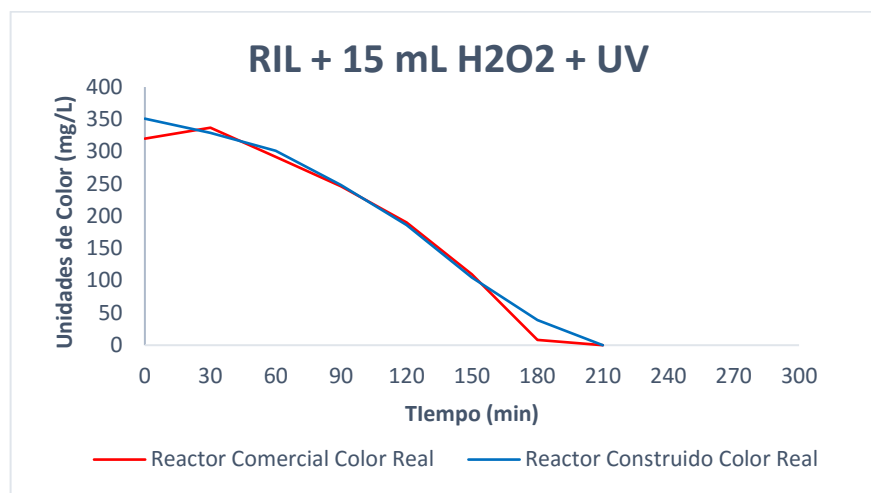


Figura 20. Contraste reactores a 15 ml H₂O₂ y luz UV.

- Tratamiento de Ril con Luz Ultravioleta y 7 mL. de H₂O₂.

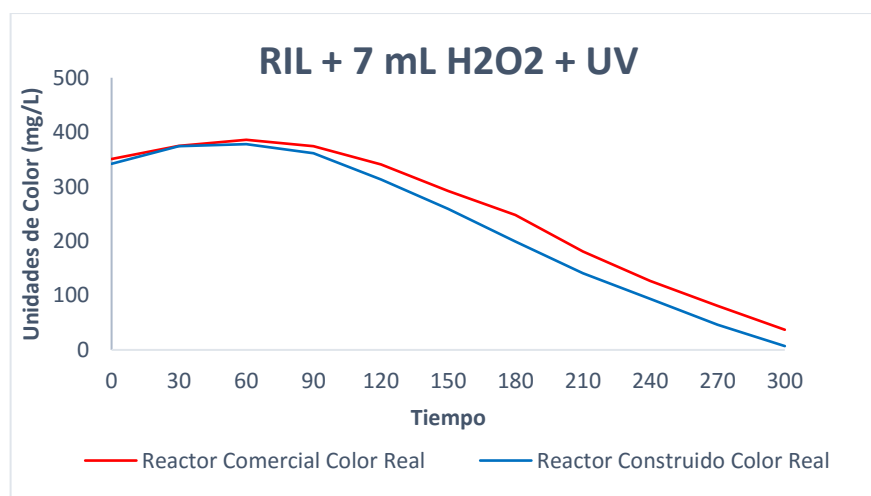


Figura 21. Contraste reactores a 7 ml H₂O₂ y luz UV.

- Tratamiento de Ril con 70 mL. de H₂O₂.

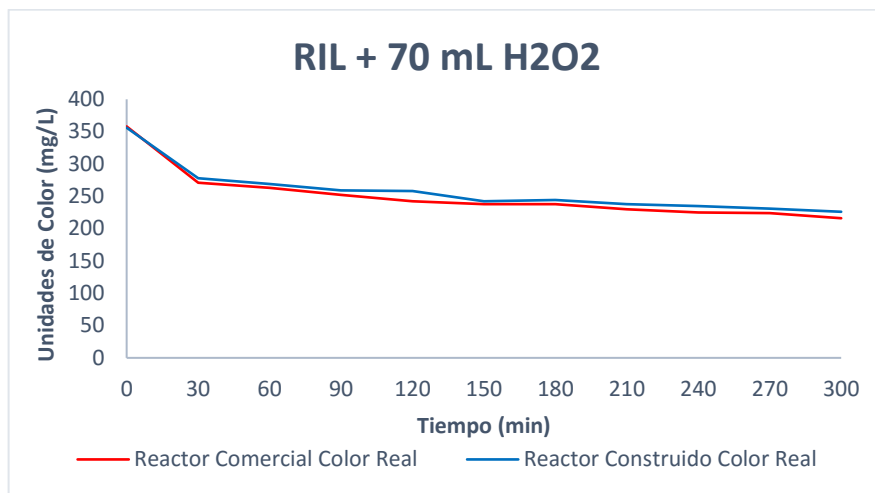


Figura 22. Contraste reactores a 70 ml H₂O₂, sin luz UV.

- Tratamiento de Ril con 35 mL. de H₂O₂.

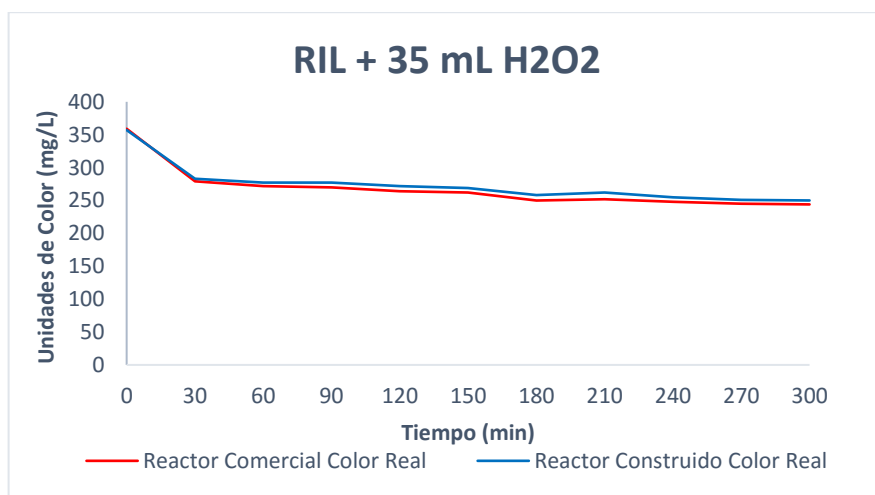


Figura 23. Contraste reactores a 35 ml H₂O₂, sin luz UV.

- Tratamiento de Ril con 15 mL. de H₂O₂.

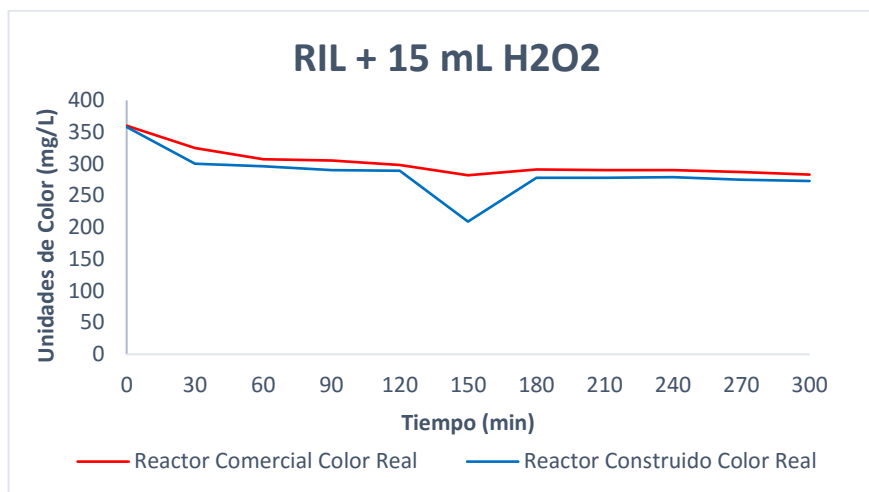


Figura 24. Contraste reactores a 15 ml H₂O₂, sin luz UV.

- Tratamiento de Ril con 7 mL. de H₂O₂.

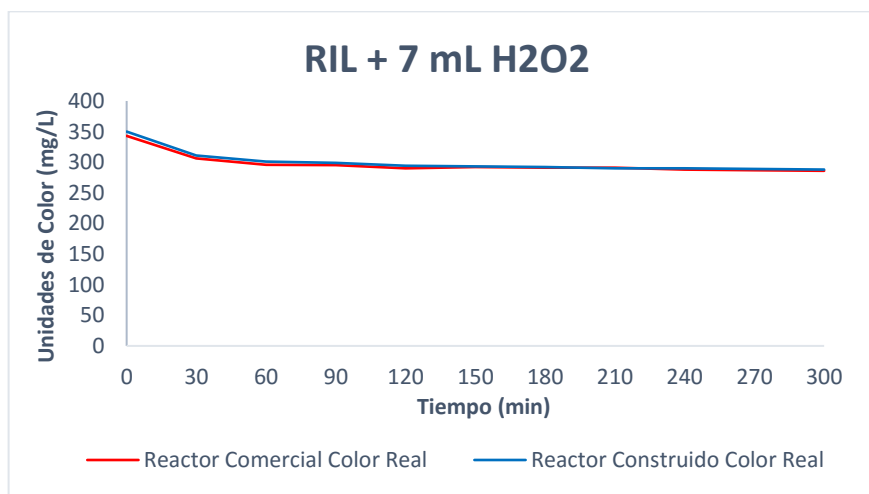


Figura 25. Contraste reactores a 7 ml H₂O₂, sin luz UV.

5. CONCLUSIONES

El organismo *Danio Rerio* es un potencial indicador de toxicidad, sobre todo para tratamiento de riles de industria celulosa, por contener sustancias a las cuales este pez es muy sensible, pero para lograr tener un eficiente trabajo, se debe lograr controlar los principales factores, como son su alimentación y reproducción para realizar los ensayos que se habían propuesto dentro de esta investigación, ya que el diseño y comparación de las alternativas expuestas en este documento fueron viables.

La construcción de un equipo reactor con materiales de fácil acceso, manipulación y de bajo costo, fue exitosa, dándose así, una opción futura para la instalación e implementación de este sistema basado en procesos de oxidación avanzada, específicamente de fotooxidación, a escala industrial, donde los grandes caudales de RILes generados por industrias como la del área de la celulosa, que contienen distintas sustancias contaminantes visualizadas en características físicas como la coloración de estos residuos, pueden ser tratadas bajando los niveles de colorantes. Dejando a expectativa que se evalúe la disminución y/o eliminación de otras sustancias persistentes contenidas en estos RILes.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Arango, Á. 2013. Crisis mundial del agua. *Producción + Limpia* 8(2): 7-8.
2. Chulluncuy, N.C. 2011. Tratamiento de agua para consumo humano. *Ing. Ind.* (29): 153-170.
3. CONAF (Chile). 2015. Sector forestal chileno: Desafíos y visión 2015-2035. Documento guía para la formulación de la política forestal chilena. CONAF. Santiago, Chile
4. Covinich, L.G., D.I. Bengoechea, R.J. Fenoglio and M.C. Area. 2014. Advanced oxidation processes for wastewater treatment in the pulp and paper industry: a review. *Am. J. Environ. Engineer.* 4(3): 56-70.
5. (CR)2 (Chile). 2015. Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. Santiago, Chile.

6. Domènech, X., W.F. Jardim y M.I. Litter. 2001. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea [en línea]. ResearchGate, Alemania. <https://www.researchgate.net/profile/Marta-Litter/publication/290852253_Advanced_oxidation_processes_for_the_removal_of_pollutants/links/569f77a508ae2c638eb7a371/Advanced-oxidation-processes-for-the-removal-of-pollutants.pdf>. [Consulta: 29 julio 2021].
7. Higuera, O.F., J.L. Tristancho. 2006. Estudio electroquímico de la reducción del peróxido de hidrógeno sobre aleaciones utilizadas en la industria joyera. Sci. Tech. 12(30): 349-354.
8. INE (Chile). 2017. Estimaciones y proyecciones 2002-2035, región comuna y área urbana y rural [en línea]. INE, Chile. <<https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>>. [Consulta: 01 agosto 2021].
9. Karimi, S., A. Abdulkhani, A.H.B. Ghazali, F.-R. Ahmadun and A. Karimi. 2009. Color remediation of chemimechanical pulping effluent using combination of enzymatic treatment and Fenton reaction. Desalination 249(2): 870-877.

10. Kim, K.-H., S.-K. Ihm. 2011. Heterogeneous catalytic wet air oxidation of refractory organic pollutants in industrial wastewaters: A review. *J. Hazard Mater.* 186(1): 16-34.
11. Luraschi, M. 2007. Análisis de la cadena productiva de la celulosa y el papel a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible: estudio del caso de Chile. CEPAL. Santiago, Chile.
12. Machado, A.E.H., J.A. de Miranda, R.F. de Freitas, E.T.F.M. Duarte, L.F. Ferreira, Y.D.T. Albuquerque, R. Ruggiero, C. Sattler and L. de Oliveira. 2003. Destruction of the organic matter present in effluent from a cellulose and paper industry using photocatalysis. *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 155(1-3): 231-241.
13. Moreno, M. 2013. Mantenimiento en el laboratorio del pez cebra (*Danio rerio*). Trabajo de fin grado, Grado en Biología. Universidad del País Vasco. Leioa, España.
14. Nagel-Hassemer, M.E., C.R.S Carvalho-Pinto, W.G. Matias and F. Lapolli. 2011. Removal of coloured compounds from textile industry effluents by UV/H₂O₂ advanced oxidation and toxicity evaluation. *Environ. Technol.* 32(16): 1867-1874.

15. Rubio, A., E.L. Chica y G.A. Peñuela. 2013. Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes. *Rev. Ambient. Agua* 8(3): 93-103.
16. Ryder, G. 2017. Aguas residuales: el recurso desaprovechado. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2017. UNESCO. París, Francia.
17. SISS (Chile). 2005. Manual operativo de la norma de muestreo de aguas residuales. NCH 411/10. SISS. Santiago, Chile.
18. Torres, G. 2017. Impacto ambiental de la industria de celulosa en Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil Química. Concepción, Chile (Documento de trabajo, gtorresf@udec.cl).
19. UNESCO (Francia). 2012. United Nations world water development report 4: managing water under uncertainty and risk [en línea]. UNESCO, Francia.
<<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000215644>>. [Consulta: 05 mayo 2021].

20. UNESCO (Francia). 2015. Agua para un mundo sostenible: datos y cifras Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015 [en línea]. UNESCO, Francia. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232273_spa>. [Consulta: 05 mayo 2021].
21. Urrea, U.R. 2008. Diseño y montaje del equipo hidráulico para el ensayo en el laboratorio del número de Reynolds y orificios de descarga libre. Trabajo, Ingeniero Civil. Corporación Universitaria Minuto de Dios. Facultad de Ingeniería. Girardot, Colombia.
22. Vargas-Vargas, R.A. 2017. Pez cebra (Danio rerio) y anestesia. Un modelo animal alternativo para realizar investigación biomédica básica. Anestesia en México 29(Supl. 1): 86-96.