



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

ANÁLISIS DE LAS BRECHAS NORMATIVAS Y TECNOLÓGICAS DE LA INDUSTRIA DE CELULOSA EN LA CUENCA BIOBÍO, EN EL CONTEXTO DE LOS POTENCIALES IMPACTOS DE SUS EFLUENTES LÍQUIDOS EN LOS ECOSISTEMAS ACUÁTICOS.

Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniero Ambiental

PABLO ANDRÉS GUTIÉRREZ MARTÍNEZ

Profesor Guía: Dr. Oscar Parra
Profesora Co-guía: Dra. Patricia González
Profesora Comisión: Paula Nieto

Concepción, Chile
2021



“Análisis de las brechas normativas y tecnológicas de la industria de celulosas en la cuenca del río Biobío, en el contexto de los potenciales impactos en sus efluentes líquidos en los ecosistemas acuáticos.”

PROFESOR GUÍA: Dr. OSCAR PARRA BARRIENTOS

PROFESOR CO- GUÍA: Dra. PATRICIA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

PROFESOR COMISIÓN: Mg. PAULA NIETO PINO

CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, junio 2021



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPIRITU

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE ANEXOS	x
AGRADECIMIENTOS	xi
RESUMEN	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Producción de celulosa Kraft a nivel global	4
2.2 La industria de la celulosa en Chile	5
2.3 Proceso productivo de celulosa	9
2.4 Proceso de celulosa Kraft	11
2.4.1 Preparación de la madera	14
2.4.2 Proceso de cocción	17
2.4.3 Proceso de recuperación de reactivos y energía	19
2.4.4 Deslignificación con oxígeno	21
2.4.5 Blanqueamiento de la pulpa	21
2.5 Caracterización de efluentes de plantas de celulosa Kraft e impacto en el medio ambiente	25
2.6 Tratamiento de efluentes de celulosa proceso de celulosa Kraft	28
2.7 Industrias de celulosa en la cuenca del río Biobío	33
2.8 Normativa y tecnología en la industria de la celulosa	36
2.8.1 Mejores tecnologías disponibles (MTD) o BAT (Best available technology)	37
2.8.2 Valores límite de emisión o estándares de descarga	37
2.8.3 Certificación de procesos	38
2.9 Normativa aplicada a las plantas de celulosa para efluentes líquidos en Chile	38
2.10 Norma Secundaria de Calidad ambiental para la cuenca del río Biobío (NSCA)	41

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS	44
3.1 Objetivo General	44
3.2 Objetivos específicos	44
4. ÁREA DE ESTUDIO	45
4.1 Descripción del área de estudio.....	45
5. METODOLOGÍA	51
5.1 Objetivo específico 1: Sintetizar información disponible de las plantas de Celulosa Kraft en la cuenca del río Biobío con énfasis en sus efluentes líquidos.	51
5.2 Objetivo específico 2: Analizar mediante la Norma Secundaria de calidad ambiental para la cuenca del río Biobío la calidad de agua con énfasis en los contaminantes característicos de las descargas de plantas de celulosa.	51
5.3 Objetivo específico 3: Realizar un análisis comparativo de la normativa de descarga de efluentes a los sistemas acuáticos de la Industria de Celulosa.....	53
5.4 Objetivo específico 4: Describir el estado del arte de las mejores tecnologías disponibles asociadas a la generación de efluentes líquidos en la Industria de Celulosa.	54
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
6.1 Resultados para el objetivo específico 1: Sintetizar información disponible de las plantas de Celulosa Kraft en la cuenca del río Biobío con énfasis en sus efluentes líquidos.	57
6.1.1 Planta CMPC Laja	57
6.1.2 Desarrollo tecnológico en Planta Laja.....	57
6.1.3 Análisis de evolución de concentraciones en efluente de descarga Planta Laja.....	59
6.1.4 Normativa aplicable a CMPC Planta Laja	60
6.1.5 Planta CMPC Santa Fe.....	61
6.1.6 Desarrollo tecnológico CMPC Santa fe en cuanto a descarga de efluentes	61
6.1.7 Análisis de evolución de concentraciones en efluente de descarga Planta Santa Fe	62
6.1.8 Normativa aplicable a Planta CMPC Santa Fe	64
6.1.9 Planta CMPC Pacífico	65

6.1.10 Desarrollo tecnológico Planta Pacífico en cuanto descarga de efluentes	65
6.1.11 Análisis de evolución de concentraciones en efluente de descarga Planta Pacífico.....	66
6.1.12 Normativa aplicable a Planta CMPC Pacífico	68
6.1.13 Análisis evolución de la tecnología en plantas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío y de la carga contaminante.	71
6.2 Resultado para objetivo específico N°2: Analizar mediante la Norma Secundaria de calidad ambiental para la cuenca del río Biobío la calidad de agua con énfasis en los contaminantes característicos de las descargas de plantas de celulosa	73
6.2.1 Análisis de tabla de promedios en estación de invierno y verano.....	79
6.2.2 Análisis por contaminante.....	81
6.3 Resultados objetivo específico 3: Realizar un análisis comparativo de la normativa de descarga de efluentes a los sistemas acuáticos de la Industria de Celulosa	95
6.3.1 Celulosa en Suecia.....	96
6.3.2 Legislación ambiental sueca para descargas industriales de Plantas de celulosa.....	96
6.3.3 Celulosa en Canadá	98
6.3.4 Legislación ambiental canadiense para descargas industriales de Plantas de celulosa.....	99
6.3.5 Marco ambiental federal	100
6.3.6 Celulosa en Estados Unidos.....	103
6.3.7 Normas en Estados Unidos de América	103
6.3.8 Análisis derecho comparado descarga de efluentes en plantas de celulosa Kraft entre los países de Chile, Suecia, Canadá y Estados Unidos.	108
6.4 Resultados Objetivo específico 4: Describir el estado del arte de las mejores tecnologías disponibles asociadas a la generación de efluentes líquidos en la Industria de Celulosa	110
6.4.1 Mejor tecnología disponible asociada a generación de efluentes líquidos	110
6.4.2 Descortezado en seco	111

6.4.3 Cocción extendida o modificada	113
6.4.4 Digestores Batch.....	114
6.4.5 Digestores continuos	115
6.4.6 Lavado mejorado de pulpa y depuración de pasta cruda en ciclo cerrado	116
6.4.7 Deslignificación con oxígeno.....	117
6.4.8 Blanqueamiento ECF moderno.....	119
6.4.9 Blanqueamiento TCF	123
6.4.10 Reciclaje de agua	126
6.4.11 Eliminar los condensados contaminados y reutilizar los condensados en el proceso	127
6.4.12 Tratamiento primario.....	129
6.4.13 Tratamiento aeróbico	130
6.4.14 Tratamiento anaeróbico	132
6.4.15 Tratamiento terciario	134
6.5 Brechas normativas y tecnologías asociada a la generación de efluentes líquidos de la Industria de Celulosa en la Cuenca del río Biobío.	138
6.5.1 Brechas normativa de las empresas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío, en cuanto a descarga de efluentes.....	138
6.5.2 Brechas tecnológicas de las empresas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío, en cuanto a la mejor tecnología disponible.....	140
7. CONCLUSIONES	143
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	149
9. ANEXOS.....	162

INDICE DE TABLAS

Tabla N°1: Principales empresas productoras de celulosa en Chile.	6
Tabla N°2: Componentes de la madera presente en las materias primas más usadas en la industria de la celulosa.....	11
Tabla N°3: Carga contaminante del efluente de descortezado.....	17
Tabla N°4: Caracterización de los efluentes generados en el procesamiento de celulosa Kraft blanca.	25
Tabla N°5: Características típicas del efluente de celulosa Kraft.	30
Tabla N°6: Caracterización efluente secundario de celulosa Kraft tras tratamiento con sistema de lodos activados.	33
Tabla N°7: Plantas de celulosa que descargan efluentes en el río Biobío, tipo de proceso y tratamiento.....	35
Tabla N°8: Identificación de Clases de Calidad de Agua	43
Tabla N°9: Características de las clases de calidad de agua, en cuanto Biota/eutroficación y parámetros químicos.	43
Tabla N°10: Clasificación servicios ecosistémicos en la cuenca del río Biobío.	47
Tabla N°11: Efluentes industriales que descargar al río desde aguas arriba hacia la desembocadura.	49
Tabla N°12: Bibliografía analizada para el estudio del estado del arte de tecnologías para descarga de efluentes.	54
Tabla N°13: Comparación de concentraciones promedio de parámetros en el efluente de descarga en Planta Laja	59
Tabla N°14: Comparación de carga contaminante emitida al río Biobío en Planta Laja.....	60
Tabla N°15: Comparación de concentraciones promedios de parámetros en el efluente de descarga en planta Santa Fe.....	63
Tabla N°16: Comparación de carga contaminante emitida al río Biobío en Planta Santa Fe.....	64
Tabla N°17: Caracterización de parámetros de efluente de descarga en Planta Pacífico.....	67
Tabla N°18: Comparación de carga contaminante emitida al río Biobío en Planta Pacífico.....	68
Tabla N°19: Tecnologías empresas CMPC en la cuenca del río Biobío desde río arriba hacia abajo.....	69

Tabla N°20: Tabla comparación Plantas de celulosa CMPC e en función a la carga contaminante emitida al río Biobío.....	70
Tabla N°21: Información general de empresas CMPC celulosa en la cuenca del Río Biobío.....	73
Tabla N°22: Ubicación de los puntos de medición, expresados en sistemas de coordenadas UTM, datum WGS84, huso correspondiente y código BNA asociado.	74
Tabla N°23: Parámetros medidos para el cumplimiento de DS N°9/2015	75
Tabla N°24: Estaciones sin monitoreo por parámetros.....	75
Tabla N°25: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-20...	76
Tabla N°26: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-30...	77
Tabla N°27: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-40...	77
Tabla N°28: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-50...	78
Tabla N°29: Análisis clases de calidad de agua para el promedio de los parámetros estudiados en las estaciones BI-20, BI-30, BI-40 Y BI-50 durante 2016-2020.....	79
Tabla N°30: Parámetros y límites para plantas de celulosa Kraft MTD en Suecia.	98
Tabla N°31: Parámetros medidas para los efluentes de plantas de celulosa en Quebec y Onrario, Canadá para proceso de celulosa Kraft.	102
Tabla N°32: Parámetros regulados por la US EPA para las plantas de celulosa.	104
Tabla N°33: Límites para efluentes de descarga de nuevas plantas de celulosa con mejor tecnología existente (NSPS)(BAT).	105
Tabla N°34: Resumen de las practicas permitidas para los efluentes.	106
Tabla N°35: Parámetros que son controlados en los diferentes países estudiados	106
Tabla N°36: Cuadro comparativo límites de descarga de efluente diario para principales contaminantes de plantas de celulosa.	107
Tabla N°37: Carga contaminante de efluentes de descortezado húmedo y descortezado en seco antes de planta de tratamiento.....	113
Tabla N°38: Principios generales de cocción modificada o extendida	114
Tabla N°39: Efectos de las diferentes tecnologías de deslignificación en el número kappa y el efluente de DQO.	119
Tabla N°40: Secuencias de blanqueamiento usadas en plantas de celulosa modernas.....	121

Tabla N°41: Ejemplo de secuencia de blanqueo para Pinus radiata.....	123
Tabla N°42: Ejemplo de secuencia de blanqueo para Eucaliptus globulus	123
Tabla N°43: Diferencias entre proceso de blanqueado ECF y TCF en distintas variables.....	125
Tabla N°44: Eficiencia de eliminación de sistemas de tratamientos secundarios en efluentes de la industria de celulosa Kraft y papel.	133
Tabla N°45: Mejores tecnologías disponibles en el contexto de descarga de efluentes y mejora de efluente.....	135
Tabla N°46: Comparación mejor tecnología disponible en cuanto a descarga de efluentes con tecnología utilizada en plantas CMPC en la cuenca del río Biobío.	140



INDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Principales países productores de celulosa en el mundo en el año 2018.....	5
Figura N°2: Evolución producción, comercio y consumo de celulosa	6
Figura N°3: Variación de exportación entre 2019-2020 de productos forestales.....	9
Figura N°4: Diagrama esquemático de proceso de celulosa química al sulfato Kraft.....	14
Figura N°5: Diagrama de preparación de madera, descortezado y astillado.....	16
Figura N°6: Circuito de recuperación de químicos y energía	21
Figura N°7: Secuencia típica de blanqueo de celulosa Kraft (DoEopD1D2).	24
Figura N°8: Principales fuentes de contaminación de efluentes durante el proceso de celulosa Kraft	27
Figura N°9: Sistema típico para tratamiento de residuos líquidos.....	29
Figura N°10: Empresas CMPC en la cuenca del Río Biobío.	34
Figura N°11: Estaciones de monitoreo a lo largo del río Biobío. Fuente:	42
Figura N°12: Cuenca del río Biobío	45
Figura N°13: Cuenca hidrográfica del río Biobío y sus principales centros poblados, en celeste el río Biobío y el verde sus principales afluentes	49
Figura N°14: Estaciones de monitoreo elegidas a lo largo del río Biobío.....	53
Figura N°15: Cuenca del río Biobío, con las plantas de celulosa CMPC y los puntos de monitoreo utilizados.....	74
Figura N°16: Concentraciones promedio de amonio en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	82
Figura N°17: Concentraciones promedio de amonio en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	83
Figura N°18: Concentraciones promedio de Nitrato en las distintas áreas de vigilancia para la NSCA.	84
Figura N°19: Concentraciones promedio de Nitrato en verano en las distintas áreas de vigilancia para la NSCA.....	85
Figura N°20: Concentraciones promedio de Nitrógeno en las distintas áreas de vigilancia de NSCA.	86
Figura N°21: Concentraciones promedio de Nitrógeno en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	86

Figura N°22: Concentración promedio de fósforo en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	88
Figura N°23: Concentración promedio de fósforo en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	88
Figura N°24: Concentración promedio de Sólidos suspendidos totales en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	89
Figura N°25: Concentración promedio de Sólidos suspendidos totales en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	89
Figura N°26: Concentración promedio de Conductividad en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	90
Figura N°27: Concentración promedio de Conductividad en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	91
Figura N°28: Concentración promedio para DBO5 en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	92
Figura N°29: Concentración promedio de DQO en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura N°30: Concentración promedio de DQO en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.....	93
Figura N°31: Sistema típico OCYTRAC de dos etapas	118
Figura N°32: Diagrama de unidad de operación de clarificador por aire disuelto (DAF).....	129
Figura N°33: Ilustración de un tratamiento de lodos activados, equipado con un clarificador y con recuperación de lodos.....	131
Figura N°34: Diagrama de flujo de proceso productivo general de celulosa Kraft con la mejor tecnología disponible (MTD) para cada etapa (Elaboración propia).137	

INDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1: Tabla 1 del DS 90/2000 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales sin capacidad de dilución.	162
Anexo N°2: Tabla 2 del DS 90/2000 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor.....	163
Anexo N°3: Resumen áreas de vigilancia establecidas en la NSCA en la cuenca del rio Biobío.....	163
Anexo N°4: Acuerdo de producción limpia para el sector de industrial de celulosa de 1999.....	165
Anexo N°5: El protocolo de Kyoto	165
Anexo N°6: Parámetros y frecuencia de monitoreo de contaminantes en el efluente según RCA para Planta Santa fe.	166
Anexo N°7: Parámetros y frecuencia de monitoreo de contaminantes en el efluente según RCA para Planta pacifico.....	167
Anexo N°8: Límites para efluentes con la mejor tecnología disponible alcanzable económicamente. (BAT)	167
Anexo N°9: Límites para efluentes según mejor tecnología de control disponible (BPT).....	168

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres Pablo y Carola y mi hermano Sebastián, por apoyarme y animarme durante todo el proceso, del cual sin ellos no habría sido posible. También agradecer a mis tíos Ray Mundo, Carlos, Paulina, Patricia, Julio, Silvana, Pilar, Oliver, Daniela y Matías y mis abuelos Bernardo, María, Andrés y María Isabel, que siempre me brindaron su apoyo y amor en el proceso de crecimiento académico y personal. Además, de mis primos pequeños que siempre son una fuente de motivación y resiliencia en momentos de bajo ánimo.

Agradecer también a mi profesor guía Oscar Parra, que siempre me ayudo incluso cuando tuvimos que cambiar completamente el enfoque de la tesis, siempre estuvo presente en el momento de tener dudas, se preocupaba de cómo iba avanzando y siempre estaba disponible para enviarle un WhatsApp y que me ayudara. También a las profesoras Patricia González y Paula Nieto que en cada reunión me señalaban los puntos que podía mejorar y me ayudaban a hacerlo.

Agradezco también a todos los amigos que hice durante este proceso, siempre estuvieron ahí para apoyarnos mutuamente entre los cuales están Eduardo, Gustavo, Sebastián, Matías, Daniel, Bárbara y Gabriela que fueron pilares fundamentales para llevar a cabo actividades académicas y extraacadémicas en pubs al frente de la universidad.

También agradecer a mis amigos de la vida que siempre me han ayudado y apoyado durante todo el proceso, Pablo, Edo, Benjamín, Isidora, Esteban, Tomas, Carlos, Felipe y Camila.

Finalmente quiero agradecer a cada persona, compañero, amigo, profesor que han estado presente en esta importante etapa de mi vida.

Gracias

RESUMEN

La cuenca del Río Biobío es de suma importancia para el país, debido a su envergadura y características, este río provee de múltiples servicios ecosistémicos con actividades que generan importantes ganancias económicas y culturales tales como las plantas de celulosa de la Empresas CMPC la cual desde que se instauró en Chile en 1959, ha tenido un creciente aumento de producción y desarrollo, contando hoy en día con tres industrias de celulosa Kraft blanqueada, que corresponden a CMPC Laja, CMPC Santa Fe y CMPC Pacífico, las cuales producen cerca de 2.230.000 ton/año. Los efluentes generados por estas industrias se caracterizan por poseer sólidos suspendidos, materia orgánica, color, Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbible (AOX), de los cuales algunos de ellos, según lo reportado en literatura son considerados altamente tóxicos.

En el año 1985, tras la alarma de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de Estados Unidos sobre el hallazgo de dioxinas y furanos en el efluente de plantas de celulosa (compuesto altamente tóxico), los ojos del mundo se concentraron en las plantas de celulosa a nivel mundial, los países debieron tomar medidas drásticas sobre regulación de efluentes y en el desarrollo de nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente. Como consecuencia de lo anterior, cada país ha adoptado una normativa propia basándose en distintos parámetros como estándares de descarga o mejor tecnología disponible.

El objetivo de este estudio fue analizar las brechas normativas y tecnológicas, de las plantas de celulosa pertenecientes a la empresa Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones (CMPC) ubicadas en la cuenca del río Biobío, en cuanto a la normativa de descarga de países de alto desarrollo en políticas medio ambientales y la mejor tecnología disponible en el contexto de descarga de efluentes a ecosistemas acuáticos.

Para la realización de este trabajo se aplicó una metodología de estudio multidimensional integrando conocimiento de análisis de parámetros en la cuenca del río Biobío con énfasis en parámetros de efluentes de plantas de celulosa, se estudió también el desarrollo de las plantas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío y como estas han ido evolucionando tecnológicamente en cuanto a descarga de efluentes, donde se pudo evidenciar como las tecnologías han tenido un enorme desarrollo en comparación con la tecnología empleada en los primeros años de operación de plantas CMPC en Chile.

Se hizo un análisis de derecho comparado, el cual al estudiar la normativa de descarga de efluentes de países con gran desarrollo y conocimiento en plantas de celulosa como son Suecia, Estados Unidos y Canadá, se dejó en evidencia los puntos fuertes y las falencias de la normativa nacional en temas de descarga de efluentes. También se desarrolló una lista del estado del arte para la industria de la celulosa Kraft, dando una explicación para la mejor tecnología disponible (MTD) y señalando sus beneficios medioambientales que conlleva al momento de implementarla.

Finalmente, ya recopilada la información necesaria relativa a las plantas de celulosa en la cuenca del río Biobío, la normativa internacional y nacional, además de las mejores tecnologías disponibles, se procedió a relacionar y analizar la información concluyendo cuales son las brechas normativas y tecnológicas de las plantas de celulosa en la cuenca del río Biobío. Se determinó, con la comparación con la normativa internacional, que existen parámetros de descarga que la normativa chilena no considera. Por ejemplo, la norma de emisión de descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (D.S 90/2001), no cuenta con parámetros de suma importancia para la evaluación de los efluentes de industrias de celulosa como Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y color. Por otra parte, este cuerpo normativo es de carácter nacional, lo que significa que no toma en cuenta las distintas características y

variables propias de cada ecosistema al momento de regular la de descarga de efluentes.

En cuanto a las diferencias tecnológicas empleadas por Empresas CMPC, se apreció la continua evolución que han tenido las plantas de celulosa a lo largo del tiempo, implementando las Mejores Tecnologías Disponibles(MTD), entre las que destacan el descortezado en seco, Cocción extendida, pre-deslignificación con oxígeno de doble reactor, secuencia de blanqueo libre de cloro elemental moderna con etapa de extracción alcalina reforzada con peróxido de hidrogeno y oxígeno, tratamiento secundario de efluentes con tecnología combinada de lodos activados y sistema de birreactor de lecho móvil (MBBR).



1. INTRODUCCIÓN

La industria de la pulpa y el papel es una de las industrias más importantes del mundo, esto, debido a la alta demanda de productos de papel a nivel mundial, produciendo más de 400 millones de toneladas al año (Bajpai, 2015). Desde la década de 1960, la preocupación por la degradación del medio ambiente ha alterado en gran medida las condiciones de la mayoría de las industrias del mundo occidental, donde la industria de la pulpa y el papel es una de las industrias que se ha encontrado con mayores desafíos (Bersgquist, 2018). La razón, es que la industria de la celulosa es considerada como un gran consumidor de recursos naturales como madera, agua y energía, siendo un colaborador significativo en las descargas de contaminantes que provocan impactos adversos en los ecosistemas acuáticos (Latorre et al., 2005). Estos impactos son complejos debido a la acción combinada de parámetros físicos y químicos como, el olor, color o la turbidez, sustancias tóxicas potenciales, ya sean procedentes de la madera (ácidos resínicos, ácidos grasos, lignina y sus derivados, esteroides, entre otros) o generados en el proceso (compuestos clorados, compuestos de azufrados, y la eutrofización, provocada por niveles de nutrientes tales como fósforo y nitrógeno). Estos efluentes se caracterizan por un alto contenido en compuestos orgánicos tóxicos e incluso inhibitorios, algunos de ellos con carácter mutagénico y genotóxico, e incluso citotóxico (Hernández, 2015). El aumento de las preocupaciones sobre estas cuestiones ambientales, entre las que destacan la contaminación del aire y el agua, y el cambio climático, han llevado a la introducción de políticas ambientales nuevas y más estrictas. Estas políticas incluyen tanto reglamentos en forma de normas de rendimiento (valores límite de emisión), requisitos tecnológicos, así como diversos instrumentos basados en incentivos como impuestos/tasas y, derechos de emisión negociables. Además de estos, también es importante considerar el papel de los enfoques voluntarios y la autorregulación, que a menudo forma parte de las estrategias de sostenibilidad corporativa (King, 2012).

La tecnología implicada en el proceso productivo de la celulosa ha experimentado importantes mejoras, lo que ha llevado a producir pulpas con alta resistencia, rendimiento y blancura, mientras que en términos medio ambientales los avances tecnológicos han logrado reducir el impacto ambiental de sus emisiones, en algunos casos llegando a disminuir su concentración en el efluente final hasta en un 90% (Särkkä et al, 2018).

En Chile el crecimiento en la industria de celulosa Kraft tiene un rol fundamental en el desarrollo y en la economía nacional, representando un 2,1% del PIB (Producto Interno Bruto) nacional (ODEPA, 2018), ubicándose entre los mayores 10 productores de celulosa Kraft blanqueada en el mundo junto con países como Estados Unidos, Suecia, Canadá y China (CEPI, 2018). En Chile existen 10 plantas de industria de celulosa pertenecientes a las empresas Arauco y CMPC, donde ocho tienen proceso químico en base a sulfato Kraft y dos de ellas usan proceso mecánico. Tres de ellas corresponden a las plantas de la empresa CMPC, las cuales se encuentran ubicadas en la cuenca del río Biobío, el cual, debido a sus características y envergadura, es de suma importancia económica, cultural y recreacional para la región del Biobío y para Chile. En nuestro país se producen 4,8 millones de toneladas de celulosa Kraft blanqueada/año, de las cuales 2,2 millones de toneladas, o sea un 45,8% corresponde a la producción de celulosa Kraft blanqueada por empresas CMPC que descargan sus efluentes en la cuenca del río Biobío (INFOR, 2019). Debido a la contaminación mencionada previamente e impulsada por la implementación de una nueva legislación ambiental en Chile más rigurosa y presiones internacionales, esta industria ha invertido en el poder eliminar sus impactos ambientales, implementando tecnología moderna con el objetivo de mantener y mejorar la eficiencia de producción y así aumentar su compromiso con el medio ambiente. En el caso particular de la industria de celulosa Kraft, ésta ha adoptado la tendencia mundial de enfocarse en la eliminación de los impactos ambientales desde el origen, implementado la mejor tecnología disponible (MTD) para así mejorar la eficiencia de producción aumentando el compromiso con el

medio ambiente, reduciendo compuestos órganoclorados (AOX) como dioxinas policloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF) y otros compuestos generados durante la etapa de blanqueo La disminución de AOX ha sido posible reemplazando el cloro molecular por procesos que ocupan dióxido de cloro, llamados ECF (Elemental Chlorine Free) y otras mejoras al proceso productivo interno (Jarpa, 2014).



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Producción de celulosa Kraft a nivel global

La pulpa y el papel es una de las industrias más importantes del mundo y los productos de papel se encuentran entre los principales productos de exportación en muchos países, teniendo una significativa demanda global, llegando a producir más de 400 millones de toneladas anualmente. Entre los productos de papel de más alta demanda están en papel gráfico, cartones, papel tisú, papel de embalaje, entre otros. Actualmente debido al mundo tecnológico en que vivimos, se ha visto una disminución de producción de papel gráfico, sin embargo, esto se ha visto compensado por una mayor cantidad de producción de papel tisú y papel de embalaje. Para la demanda y producción de papel y cartón, China tiene el primer lugar con un 25% de la demanda mundial y el 26% de la producción total de papel y cartón y, Estados Unidos el segundo lugar. En términos de producción de pulpa, América del Norte, Asia y Europa representan la mayor parte del papel y la pulpa del mundo (Armstrong, 2020). La producción de celulosa a nivel mundial cuenta con un ranking de países productores presentados en la Figura N°1, de los cuales Estados Unidos es por lejos, el mayor productor con un total de 52 millones de toneladas anuales. Es el mayor productor de celulosa Kraft de fibra larga, celulosa Kraft sin blanquear y celulosa semi-química, además del segundo mayor productor de celulosa de fibra corta en el mundo. Canadá se encuentra en un tercer lugar y es el mayor productor de celulosa mecánica del mundo (FAO,2021). Es importante señalar que sólo los 10 mayores productores del mundo representan un 85% de la producción de celulosa mundial y dentro de estos se encuentran dos países de Latinoamérica, que son Brasil con un tercer lugar y Chile siendo el décimo mayor productor, generando un total de 21 y 5 millones de toneladas anuales respectivamente en el año 2018. Junto con los países latinoamericanos mencionados, también países como Indonesia y Sudáfrica han incrementado la producción y exportación de celulosa, esto se debe a que, al igual que en Chile, las condiciones climáticas son una ventaja para el rápido crecimiento de distintas

especies de árboles, además del apoyo de políticas públicas para el crecimiento industrial (Grandón, 2011).

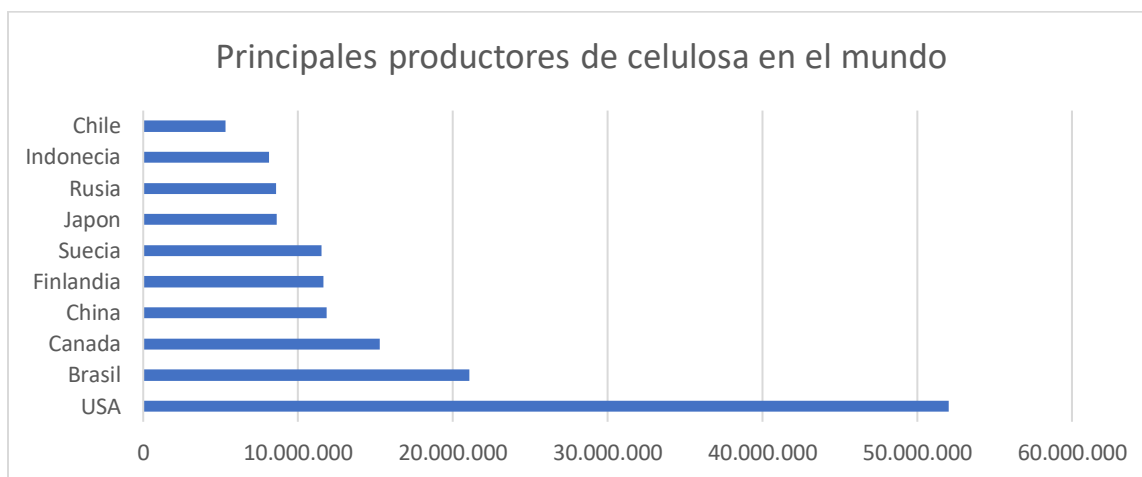


Figura N°1: Principales países productores de celulosa en el mundo en el año 2018.

Fuente: FAO,2021.

2.2 La industria de la celulosa en Chile

La producción de pulpa comenzó en Chile a fines de la década de 1950 y ha crecido exponencialmente durante las décadas siguientes debido a las condiciones favorables que ofrece el mercado internacional y ciertas ventajas competitivas (rápido crecimiento de especies forestales utilizadas para producir pulpa, menores costos laborales, mejoras tecnológicas, etc.). La industria chilena de celulosa se encuentra actualmente entre los diez principales productores del mercado mundial, donde anualmente produce más de 4.79 millones de toneladas de pulpa (ODEPA, 2018; FAO, 2021). La producción de celulosa por parte de la industria chilena, producto de continuas y cuantiosas inversiones en nuevas plantas y del aumento de capacidad de producción de las plantas ya instaladas, se duplicó entre el año 2000 y el año 2015 (Figura N°2). Existen 10 plantas de celulosa en Chile, de las cuales 8 son plantas de celulosa química Kraft (Tabla N°1) pertenecientes a dos grandes empresas que cubren la totalidad de la producción nacional, estas son

Empresas Arauco y Compañía Manufacturera de papeles y cartones (CMPC). La pulpa blanqueada de eucaliptus (BEKP) es la que ha tenido un mayor aumento de producción, además cabe mencionar, que empresa Arauco está llevando a cabo un megaproyecto de US\$2.350 millones llamado “Modernización Ampliación Planta Arauco (MAPA)” cuyo objetivo es el aumento de producción desde las 800.000 ADt/año, actuales a 2.100.000 ADt/año, lo que la convertiría en la planta productora de celulosa de mayor producción de Chile (ODEPA, 2018).

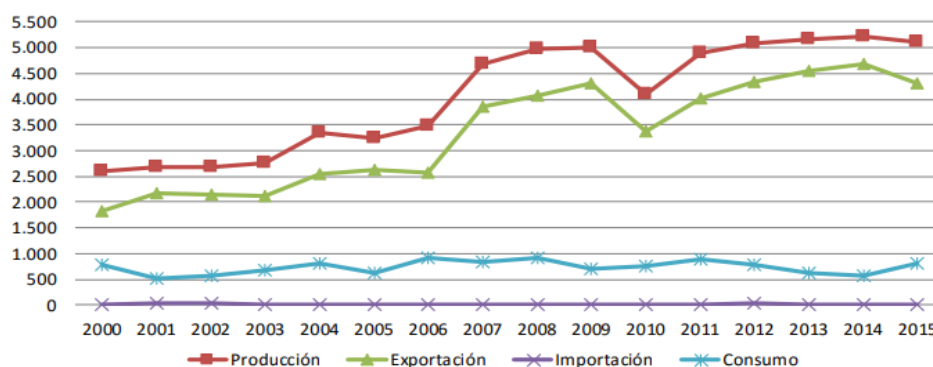


Figura N°2: Evolución producción, comercio y consumo de celulosa.

Fuente: (ODEPA, 2018).

Tabla N°1: Principales empresas productoras de celulosa en Chile.

Región	Nombre empresa	Comuna	Tipo de pulpa	Capacidad instalada (ADt/año)
Pulpa mecánica y termo mecánica				
Región del Maule	Cartulinas CMPC SPA (Planta maule)	Yerbas Buenas	Termo mecánica, Pino radiata	380.000
Región de los ríos	Cartulinas CMPC SPA (Planta Valdivia)	Valdivia	Termo mecánica, Pino radiata	70.000
Pulpa química				

Región del Maule	Celulosa Arauco y Constitución S.A (Constitución)	Constitución	Cruda, Pina radiata	355.000
	Celulosa Arauco y Constitución S.A (Licancel)	Licantén	Blanqueada, Pino radiata	150.000
Región del Biobío	Celulosa Arauco y Constitución S.A (Arauco)	Arauco	Blanqueada, Eucalipto	290.000.
			Blanqueada, Pino radiata	500.000
	Celulosa Arauco y Constitución S.A (Arauco) (Con Proyecto MAPA) *	Arauco	Blanqueada, Eucalipto	2.100.000**
			Blanqueada, Pino radiata	
	Celulosa Arauco y Constitución S.A (Nueva Aldea)	Ranquil	Blanqueada, Eucalipto	1.070.000
	CMPC Pulp SPA (Laja)	Laja	Blanqueada, pino radiata	330.000
CMPC Pulp SPA (Santa fe)	Nacimiento	Blanqueada, eucalipto	1.500.000	
Región de la Araucanía	CMPC Pulp SPA (Pacífico)	Collipulli	Blanqueada, Pino radiata	500.000
Región de los Ríos	Celulosa Arauco y Constitución S.A (Valdivia)	San Jose de la Mariquina	Blanqueada, Pino radiata Blanqueada, Eucalipto	550.000

*: Proyecto MAPA de Celulosa Arauco se encuentra actualmente en construcción.

**.: Producción futura estimada con proyecto “Modernización Ampliación Planta Arauco”.

Fuente: ODEPA, 2018; SEIA, 2014.

El sector forestal chileno basa su producción actual principalmente en la plantación de dos especies foráneas, el pino radiata (*Pinus radiata D. Don*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill*), 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). La industria de la celulosa en Chile se ha consolidado como una potente fuente de crecimiento económico para el país y es la base del sector forestal chileno y, motor de las exportaciones nacionales, abarcando un total de un 45% del total de productos forestales. Hoy en día el sector forestal en Chile es una de las actividades más dinámicas de la economía chilena, constituyéndose un pilar fundamental de la estrategia de desarrollo nacional con un amplio reconocimiento internacional. Esta industria se basa en la exportación de sus productos, por lo que genera una gran cantidad de ganancias para Chile, además, se ha visto en una constante evolución, manteniéndose competitivamente a la par con el mercado exterior y teniendo una permanente modernización tecnológica en el proceso tecnológico, adaptándose así a los parámetros ambientales internacionales y ambientales (INFOR, 2019).

El sector forestal en Chile representa un 1.9% del PIB nacional, donde la región del Biobío representa el 60% del PIB forestal y da empleo a 33.700 personas, de las cuales 7.880 pertenecen a la industria de la celulosa (INFOR, 2020). Luego de un récord histórico registrado en el año 2018 con US\$6.838 millones, las exportaciones de productos forestales han tenido una disminución en los últimos años, en el año 2020 totalizaron US\$4.949 millones lo que es un 12,6% menos a lo registrado en el 2019- Dentro de los productos que han tenido una mayor disminución están los de celulosa (Figura N°3) con un 27,9% de disminución de pulpa blanqueada de eucalipto, 23,2% de pulpa blanqueada de pino radiata y un 20 % de pulpa cruda de pino radiata, lo que se explica con variaciones del precio de la pulpa en el mercado, tensiones internacionales entre los mercados de Estados Unidos y China y la pandemia global del covid-19, sumado con la disminución en el consumo de papel gráfico y de diario, causaron que la empresa BO Paper, que producía pulpa termomecánica de pino radiata, se viera forzado a terminar sus operaciones en el presente año (INFOR, 2021; Rybert, 2021).

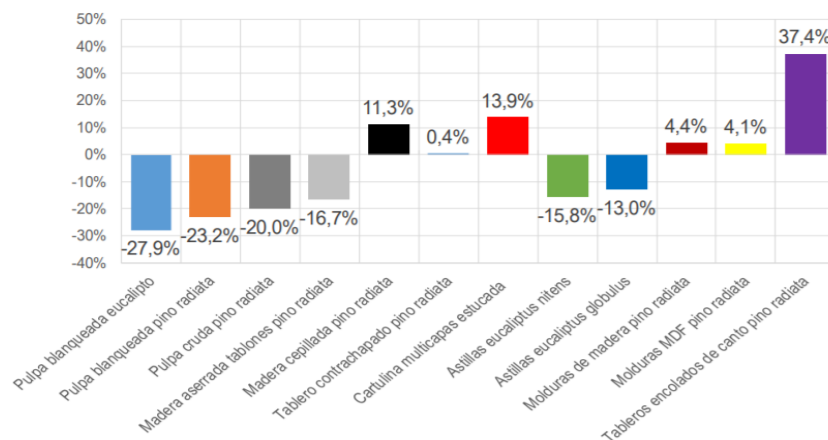


Figura N°3: Variación de exportación entre 2019-2020 de productos forestales.

Fuente: INFOR, 2019.

De los 115 países que recibieron productos forestales chilenos en el 2020, sólo los dos principales, que son China y Estados Unidos, contribuyeron el 52,4% del total exportado. China adquiere en mayor parte productos de pulpa de celulosa, donde la pulpa blanqueada de pino representó el 41,9% del total enviado a ese país, mientras que la pulpa blanqueada de eucalipto participo con un 29,5%. En el caso de Estados Unidos, el principal producto comercializado con este país es la moldura solida de madera, representado un 21,8% de total exportado. Por su parte, bastante más alejado que los primeros lugares, se encuentra Japón, con una participación de 6,1% (US \$404 millones), donde el principal producto comercializado son las astillas de *Eucalipto globulus* con un 4,2% del total (INFOR, 2021).

2.3 Proceso productivo de celulosa

Las plantas de celulosa y papel integra una variedad de diferentes y complicadas áreas de proceso como la preparación de madera, cocci3n de la pulpa, recuperaci3n de qu3micos, blanqueamiento y creaci3n de papel para as3 convertir la madera al producto final. La materia prima principal para la producci3n de celulosa es la madera, pero tambi3n se puede producir a partir de papel reciclado y en otros pocos casos de paja, c3ñamo, algod3n o cualquier otro material que contenga celulosa

(Bajpai,2015). Esta se puede clasificar según la longitud de la fibra entre las que están: la fibra corta, las cuales son maderas duras y frondosas provenientes de eucalipto, abedul, haya, o roble, etc. La fibra corta tiene entre 0,75 mm y 2 mm de largo, alto contenido de celulosa y es ideal para producción de impresión y escritura. Así también están las de fibra larga, que se obtiene de madera blanda de coníferas como el pino, abeto, etc. Su mayor uso es para la producción de papel con alta resistencia, como cartulinas, sacos de papel y cajas de cartón (Luraschi, 2007).

La pulpa de celulosa dependiendo de su proceso se puede separar en dos grandes grupos:

- Pulpa química: En términos generales se obtiene sometiendo astillas, partículas o residuos de madera a través de un proceso de cocción con diferentes químicos a altas temperaturas y presiones, que tienen por objetivo separar las fibras de celulosa de los demás componentes de la madera, los tipos más comunes son la pulpa química al sulfato mejor conocida como pulpa Kraft y la pulpa química al sulfito. Además, se pueden ser blanqueadas o sin blanquear (pulpa cruda) (Ruiz, 2008).
- Pulpa mecánica: La pulpa mecánica se obtiene mediante la aplicación de energía mecánica sobre la madera, provocando la ruptura de las uniones entre las fibras. Se reconoce la pulpa mecánica propiamente tal, donde los trozos son presionados sobre una piedra giratoria, y las pulpas termo mecánica y quimio-termo mecánica, que utiliza comúnmente astillas de madera como materia prima, la cuales son sometidas previamente a un agente químico a altas temperaturas (Ruiz, 2008).

Para términos comerciales en las pulpas de la celulosa al sulfato Kraft se reconocen las categorías: Pulpa química Kraft blanqueada de fibra larga (Bleached Softwood Kraft Pulp, BSKP), pulpa química Kraft de fibra corta (Bleached Hardwood Kraft Pulp, BHKP) y también está la pulpa química Kraft sin blanquear o pulpa cruda (Unbleached Softwood/hardwood Kraft Pulp, UKP) (Luraschi, 2007).

2.4 Proceso de celulosa Kraft

El proceso de celulosa al sulfato Kraft produce una variedad de pulpa que es usada principalmente para empaquetado, tisú, papeles de alta resistencia y cartón. Como señala Bajpai, 2015, debido a sus ventajas en la recuperación de químicos y resistencia de la pulpa, es el método más utilizado en el mundo, representado un 91% de la producción de celulosa química y un 75% del total de la pulpa producida a nivel mundial.

La madera está conformada por cuatro componentes principales, la celulosa, la hemicelulosa, compuestos extraíbles y lignina. Para liberar las fibras de celulosa de la matriz de la madera, es necesario remover la lignina, compuesto que mantiene unidas a dichas fibras y le entrega rigidez a la madera (ver tabla N°2) (Kringstad, 1984).

Celulosa: La celulosa es un homopolímero del tipo polisacárido lineal con una masa molecular de 10000 Da.; que representa aproximadamente un 40% de la madera. El polímero es formado por unidades β -Dglucopiranososa, las cuales están unidas por enlaces glucosídicos. Estas moléculas se organizan en una forma cristalina constituyendo las microfibrillas en la madera; las que a su vez conforman a las fibras de celulosa (Carrasco, 2005).

Hemicelulosa: “La hemicelulosa de la madera es un heteropolímero ramificado compuesto por unidades de carbohidratos diferentes a las de la celulosa; con una masa molecular relativa mucho menor que la celulosa y también con grado de polimerización inferior (aproximadamente de 200)” (Kringstad, 1984).

Lignina: Definida por Carrasco, 2005, como un polímero de carácter aromático; es decir, aproximadamente por un 5% de este son monómeros de fenol, moléculas de estructura plana, con capacidad de absorber luz, e hidrofóbicos. Este biopolímero presenta una composición diferente según la especie vegetal que lo sintetiza. De esta manera, las ligninas de madera se han clasificado en: ligninas de maderas blandas (como Pino spp.), que tienen una gran polimerización del alcohol coniferílico

y en ligninas de maderas duras (como Eucaliptus spp.), formadas principalmente por la copolimerización de los alcoholes coniferílicos y sinapílicos.

Extraíbles: “Se les denomina “extraíbles” a componentes no-estructurales de la lignocelulosa, estos incluyen una gran variedad de compuestos químicos como grasas, compuestos fenólicos, ácidos resínicos, ceras y compuestos inorgánicos. Parte de estos compuestos son responsables de toxicidad en el efluente” (Kringstad, 1984).

Tabla N°2: Componentes de la madera presente en las materias primas más usadas en la industria de la celulosa.

Componentes de la madera	Eucalipto (%)	Pino (%)
Celulosa	42-46	43-50
Hemicelulosa	35	25
Lignina	17-26	25-31
Compuestos Extraíbles	0,2-3,5	0,5-7,0

Fuente: Rivera, 2012.

El objetivo general del proceso productivo de celulosa Kraft (Figura N°4) es el de remover la mayor cantidad de lignina posible, sin sacrificar fuerza en las fibras, y de esta forma liberar las fibras y remover impurezas (Särkkä, 2018). El proceso químico Kraft puede producir distintos tipos de pulpa y debido a sus ventajas en la recuperación de químicos y calidad de la pulpa, domina la industria representando 91% de pulpa química y un 75% de toda la pulpa producida. El proceso químico Kraft usa un licor de cocción alcalino que consiste en una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio para digerir la madera. Este licor de cocción llamado “licor blanco” es mezclado con las astillas de madera, en un tanque de reacción a alta temperatura (150-170 °C), después que las astillas de madera han sido cocidas, el contenido del digestor es descargado bajo presión a un tanque de soplado, así la masa se comienza a ablandar, las astillas cocidas impactan con la entrada

tangencial del tanque de soplado resultando en la desintegración de las astillas cocidas en fibras o pulpa (Baipaj, 2015). El licor usado, llamado “licor negro”, contiene productos de reacción de lignina, hemicelulosas y extraíbles de la madera, y es separado de la pulpa mediante una etapa de lavado de pulpa cruda, para luego ser concentrado y quemado en una caldera de recuperación, recuperando así los químicos de cocción empleados en el proceso de cocción y generando energía. El fundido formado en la caldera de recuperación es disuelto en agua para formar licor verde (mayormente carbonato de sodio y sulfuro de sodio), el que luego es llevado a una planta de caustificación para recuperar el licor blanco, en esta etapa el licor verde reacciona con óxido de calcio para así convertir el carbonato de sodio regenerando el licor blanco (Noel, 2017). La pulpa después de su lavado pasa por un proceso de deslignificación con oxígeno, la cual se considera la primera etapa del proceso de blanqueo, en esta etapa, oxígeno y álcali es usado para eliminar parte de la lignina residual en la pulpa después de la cocción para luego pasar a la planta de blanqueo (pulppapermill, 2015). El objetivo de la planta de blanqueo es remover sustancias que le dan color a la pulpa como lignina y compuestos orgánicos colorados incrementando su brillo (blancura) y limpieza sin producir un deterioro en las características físicas y químicas de la pulpa (Gellerstedt, 2009). En los puntos siguientes se detallan las distintas etapas del proceso Kraft.

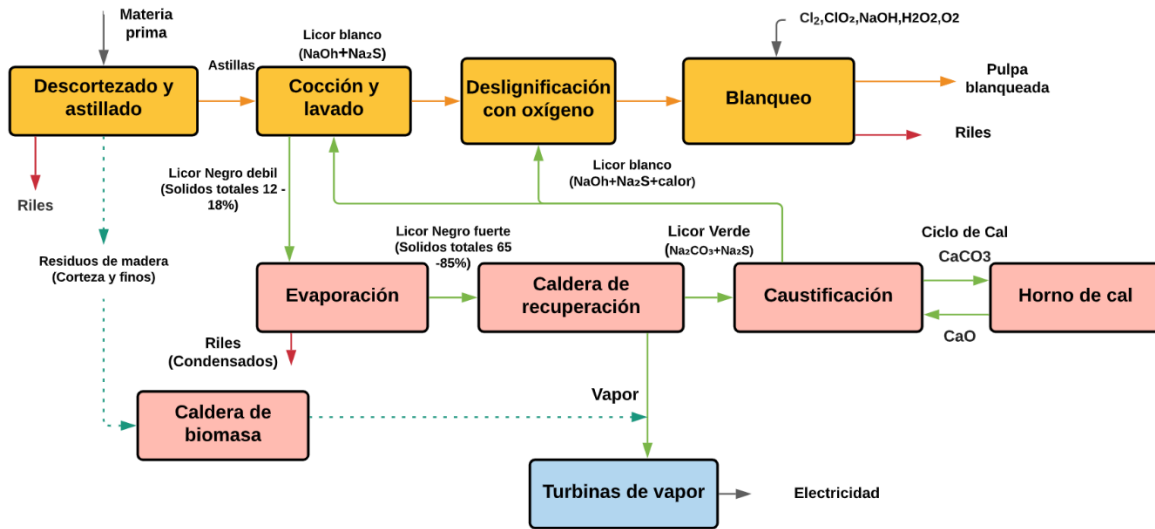


Figura N°4: Diagrama esquemático de proceso de celulosa química al sulfato Kraft.

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de Bajpai, 2015; Moreira, 2012; Noel, 2017.

2.4.1 Preparación de la madera

La madera llega a la fábrica de pasta en forma de troncos en bruto (denominados en ocasiones como rollizos) o como astillas de una planta de cortado de tablonés. En la zona de preparación de la madera se llevan a cabo varias tareas básicas, las cuales son: recepción y ordenamiento de troncos en patios de maderas, aprovisionamiento por especies, limpieza y recogida de todos los materiales desechados en las operaciones anteriores y envío para su eliminación final. La madera se transforma en astillas o troncos adecuados para la transformación en pulpa mediante una serie de pasos, entre los que figuran el descortezado, el aserrado, el astillado y el tamizado. El descortezado de los troncos es de importancia fundamental para la eficiencia del proceso de pulpa y blanqueamiento, ya que en la corteza hay compuestos responsables de un alto consumo de reactivos en el proceso de pulpa y también compuestos resiníferos que pueden dar lugar a

contaminación en la pulpa blanqueada. Los troncos deben ser descortezados ya que la corteza contiene poca fibra, presenta un alto contenido de sustancias extractivas, es oscura y con frecuencia acarrea grandes cantidades de tierra (Bajpai, 2015). Los rollizos de madera son cargados en los descortezadores para así convertirlos en astillas o chips, esto se hace ya que el digestor requiere de una medida específica de madera para la correcta impregnación de los químicos. Un equipo común utilizado para el proceso de descortezado es el del tambor rotatorio, el cual mediante la fricción de la madera y con el tambor permite retirar la corteza de los rollizos; los tambores de descortezado son equipos grandes, con un diámetro entre 3 y 5 metros y una longitud entre 15 y 25 metros, cuyas dimensiones están relacionadas con la capacidad de producción de la planta, el tipo de madera y las dimensiones del tronco procesado, mientras que uno de los equipos más empleados para la generación de astillas, consiste en un disco giratorio con cuchillas en su interior, el cual es alimentado por un potente motor eléctrico. La corteza es llevada a través de una cinta transportadora para ser usada como combustible en una caldera de biomasa. Previo a la fase de digestión las astillas pasan por un proceso de clasificación de astillas, ya que, como fue mencionado anteriormente, para una digestión eficiente es necesario que las astillas tengan una medida específica, la cual es entre 22-24 mm de largo y un espesor de 2-4mm. Las astillas aceptadas continúan a la fase siguiente, las de gran tamaño son devueltas para ser re-astilladas y los finos convergen junto con la corteza a la caldera de biomasa. La visualización de este proceso se puede apreciar en la Figura N°5 (RIADICYP, 2008).

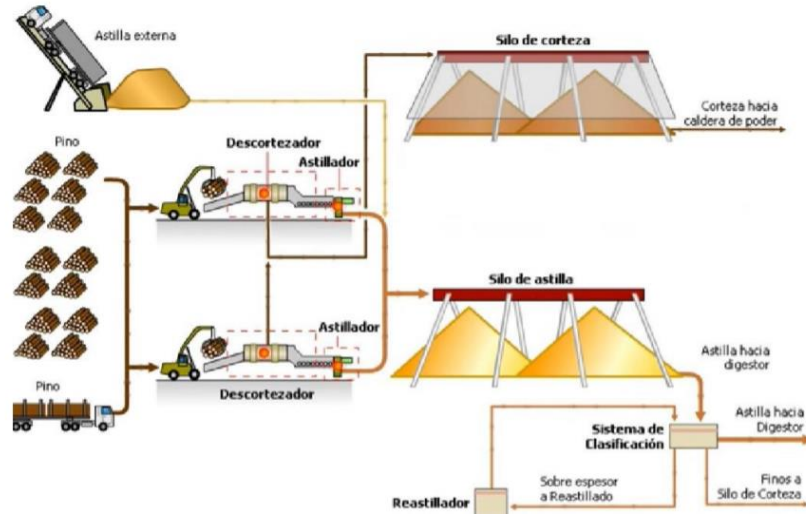


Figura N°5: Diagrama de preparación de madera, descortezado y astillado.

Fuente: Lorenzi, 2018.

Los efluentes generados en etapa de preparación de la madera son originados mayoritariamente por la etapa de descortezado; pero también pueden venir del rociado a la pila de maderas con agua y la escorrentía del patio de maderas pluviales que también pueden estar contaminadas. En el caso de descortezado húmedo, el descortezado se produce con altos volúmenes de agua, el agua en el proceso es reciclada; pero cierta cantidad se pierde por desbordamiento; en el proceso de descortezado húmedo, de 3 – 10 m³ de agua por tonelada de celulosa producida es descargado. Este efluente se caracteriza por contener nutrientes, fibras y compuestos orgánicos que consumen oxígeno como ácidos resínicos y ácidos grasos los cuales son tóxicos para la vida acuática (Bajpai, 2015). La carga contaminante de los efluentes generados por el descortezado se puede ver en la tabla siguiente (Tabla N°3).

Tabla N°3: Carga contaminante del efluente de descortezado.

Técnica de descortezado	Volumen de efluente m3/m3 madera	Kg DBO ₅ /m3 madera	Kg DQO/m3 madera	G Fosforo Total/m3 madera
Descortezado húmedo	0,6 - 2	0,9	4-6	7-5

Fuente: European Commission, 2013.

2.4.2 Proceso de cocción

Las astillas de madera son transferidas desde el contenedor de astillas hacia la zona de alimentación para la etapa de cocción, desde el contenedor de astillas las astillas de madera son ingresadas a una tolva de vaporación, el chip dependiendo de su grado de humedad, contiene tanto aire como líquido, este aire debe ser removido para que sea posible la penetración de los licores de digestión (Melanson, 2000). Luego las astillas son llevadas a un tanque de impregnación donde son impregnadas con licor blanco, el cual es el licor de cocción compuesto hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (NaS₂), a una presión de (6,0 – 7,0 bar) para comenzar el proceso de digestión. El sulfuro de sodio se hidroliza en presencia de agua mediante una reacción reversible produciendo hidróxido y sulfhidrato de sodio como se ve a continuación (pulppapermill, 2015):



Cuando las astillas de madera empiezan a calentarse dentro del digestor comienza la deslignificación, esto ocurre generalmente cuando se llega a un rango de temperatura entre 135 – 175 °C en donde la estructura de la lignina y otros compuestos orgánicos se descomponen en fragmentos más pequeños y son solubilizados en la solución alcalina. La carga de iones hidróxido, iones sulfuro de hidrogeno, iones sodio, la temperatura de cocción y el tiempo de cocción son los parámetros que controlan las condiciones de cocción y las propiedades de la pulpa.

El tiempo y la temperatura de cocción se relacionan estrechamente, ya que una temperatura más alta hace que las reacciones químicas avancen más rápido y, por lo tanto, un menor tiempo es necesario (Svärd, 2014). El proceso de cocción se da en tres fases, la fase inicial donde se da principalmente la extracción de lignina y carbohidratos, removiendo aproximadamente un 20% de cada uno. Luego en la fase de deslignificación denominada “Bulk” la degradación de lignina se vuelve más selectiva y se produce la disolución del 90% de la cantidad de lignina original, en este punto la deslignificación se ralentiza debido a que la porción de lignina final es mayoritariamente lignina no reactiva formada por reacciones de condensación durante la cocción, a esta fase se le llama fase de deslignificación residual (Santos et al., 2013). Durante el proceso de cocción el álcali puede ser consumido de cinco formas, a través de la neutralización de diferentes ácidos orgánicos (ácidos de madera originales o producidos por hidrólisis), reaccionando con resinas de la madera, mediante disolución de carbohidratos y siendo absorbido en las fibras. Alrededor de un 60-70% de álcali es consumido por neutralización de ácidos orgánicos, mientras que alrededor de un 20 – 30 % de álcali es consumido por la degradación de productos de lignina (pulppaper, 2015).

La cantidad de la lignina residual en las fibras es expresada con un número Kappa, éste es uno de los parámetros más importantes medidos en la fabricación de pulpa química, influyendo en parámetros como el rendimiento, la calidad de la pulpa, la carga alcalina, la generación de sólidos y el consumo de productos químicos en la planta de blanqueo. En este contexto se puede mencionar que gran parte de los contaminantes generados en el efluente de celulosa provienen de la planta de blanqueo debido a reacciones de la lignina con productos clorados. Es por ello que se han implementado distintos métodos de deslignificación extendida, logrando reducir el número Kappa lo máximo posible en el proceso de cocción para así usar una menor cantidad de químicos y consecuentemente reducir la carga contaminante del efluente (Knowpulp, 2020). Finalmente, las fibras liberadas son enviadas a un área de lavado donde la mayor parte de los químicos de cocción usados son

separados de la fibra, a esta solución resultante del proceso de cocción se le denomina licor negro, el cual es una compleja mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos. La parte orgánica se origina de la madera disuelta y es principalmente lignina, hemicelulosa, extractivos y productos degradados, mientras que el contenido inorgánico se origina de los químicos de cocción, principalmente iones de sodio (Svärd, 2014). El licor negro separado de la fibra es enviado al sistema de recuperación donde se recuperan los químicos de cocción para ser reutilizados.

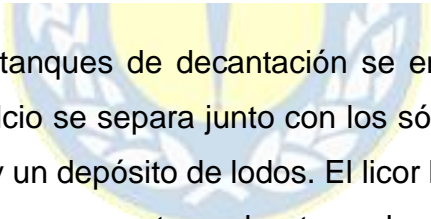
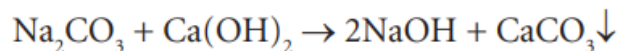
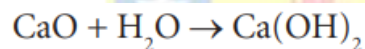
2.4.3 Proceso de recuperación de reactivos y energía

Una de las grandes ventajas del proceso Kraft es la posibilidad de recuperación económica de los productos químicos de licores de cocción (ver Figura N°6), que es fundamental porque:

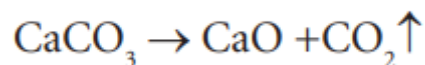
- Evita el desperdicio de agentes de deslignificación cuya sustitución constante haría que el funcionamiento de la planta fuera más costoso.
- Hace posible el uso de energía liberada en la quema de materia orgánica contenida en el licor.
- Reduce el efecto contaminante de los cursos de agua a los que se liberan los efluentes de la planta.

Después de las etapas de cocción y lavado, se obtiene un líquido oscuro con aproximadamente el 15% de los sólidos totales, rico en compuestos de sodio y materia orgánica llamado licor negro. La primera sección del sistema de recuperación es la evaporación y su objetivo es concentrar el licor negro hasta alrededor del 60% de los sólidos totales (Bajpai, 2015). El licor negro, con un 14 - 16% de sólidos, se evapora inicialmente en evaporadores de efecto múltiple, de los que sale con alrededor del 55 -60% del total de sólidos. La evaporación es necesaria para que el licor entre en la caldera de recuperación en condiciones que permitan su combustión. En la caldera de recuperación es quemado, donde la parte orgánica se consume como combustible generando calor que se recupera en la parte superior

del horno en forma de vapor a elevada temperatura (Kringstad,1984). El sodio y el azufre inorgánicos se recuperan como una masa fundida que consiste principalmente en sulfuro de sodio (NaS₂) y carbonato de sodio (Na₂CO₃), esta masa fundida entra a un estanque de disolución con agua para formar el licor verde (Tran, 2008). El licor verde es bombeado hacia la planta de caustificación, la cual tiene como objetivo transformar el licor verde en licor blanco con una cierta concentración de álcalis. De las sales que componen el licor verde, el sulfuro de sodio es el agente de deslignificación, mientras que el carbonato de sodio está prácticamente inactivo. Por lo tanto, es necesario convertir Na₂CO₃ en NaOH. Esto se logra mediante el tratamiento del licor verde con Ca(OH)₂ que se obtiene de CaO, como se muestra a continuación(Svärd, 2014):



El licor producido en los tanques de decantación se envía a filtros presurizados donde el carbonato de calcio se separa junto con los sólidos suspendidos. Al final se obtiene el licor blanco y un depósito de lodos. El licor blanco es llevado hacia un estanque para ser usado nuevamente en la etapa de cocción. El lodo tiene una concentración aproximada de 15% sólidos; el cual es enviado a un filtro de vacío donde se concentra a aproximadamente el 55%, y luego el carbonato cálcico restante se calienta en el llamado horno de cal que regenera el CaO, que vuelve al ciclo como se muestra en la siguiente reacción (RIADICYP, 2008):



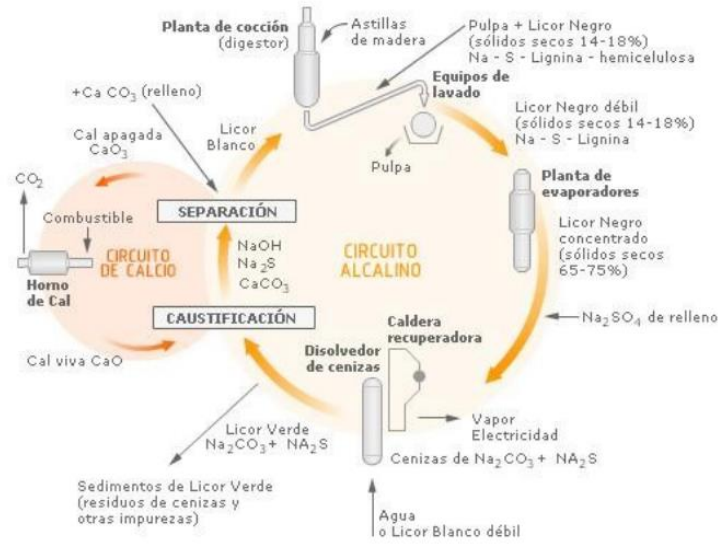


Figura N°6: Circuito de recuperación de químicos y energía.

Fuente: Fernández, 2008.

2.4.4 Deslignificación con oxígeno

El blanqueo es un proceso dirigido en varias etapas, mediante el cual se refina y aclara la pasta de celulosa cruda. El objetivo es disolver (pasta química) o modificar (pasta mecánica) la lignina cruda que no se eliminó durante los procesos de elaboración de la pasta, manteniendo la integridad de las fibras. Una fábrica produce pulpa de celulosa dependiendo de las características deseadas, variando el orden, la concentración y el tiempo de reacción de los agentes blanqueantes (Kringstad, 1984).

2.4.5 Blanqueamiento de la pulpa

En el blanqueo del proceso Kraft, se usan distintos métodos y químicos para deslignificar la pulpa manteniendo una pulpa de alta calidad y estables. Por razones técnicas y económicas, la lignina residual se elimina casi o completamente mediante

un proceso en continuo que utiliza diferentes etapas simples en secuencia, con lavados intermedios y recirculación de filtrados dentro de la secuencia. En cada una de las etapas de blanqueo se usan distintos químicos con condiciones de operaciones específicas. Las primeras etapas se pueden considerar como una continuación del proceso de deslignificación iniciado en la cocción; las últimas etapas oxidativas destruyen y eliminan el color residual (Bajpai, 2010). El proceso en múltiples etapas es necesario porque ningún sistema reactivo único o multirreactivo aplicado en etapa simple, puede producir pasta con la blancura objetivo, que es del 87 – 90 % según estándar ISO internacional. Cada etapa es optimizada de forma de contribuir al proceso deslignificante mediante la eliminación, solubilización y decoloración de los materiales coloreados remanentes. El alcanzar el nivel de blancura deseado se debe hacer sin disminuir la resistencia de la pasta por lo que, se deben controlar una serie de variables para asegurar el resultado deseado como: Carga del producto químico, consumo del producto químico, consistencia, temperatura, tiempo de reacción y pH (RIADICYP, 2008).

La planta de blanqueo es el foco más importante en cuanto a la contaminación de efluentes en la fábrica de celulosa. Tradicionalmente el blanqueo de la pasta se ha realizado con secuencias que incluyen tratamiento oxidativo con cloro y derivados para disolver la lignina, alternados con etapas alcalinas para disolver los productos de degradación de lignina. El proceso con cloro se ha usado por largos años, debido principalmente a su bajo coste y a su efectiva selectividad con la lignina. Este proceso consume grandes cantidades de agua (60 – 100 m³/t) generando un gran volumen de efluente con alta carga contaminante, estimándose que la sección de blanqueo es la responsable de 50 - 70 % de contaminación acuosa de la planta Kraft, con 45% de DBO, 40% de sólidos suspendidos, 60% de DQO, 60% del color y 100% de generación de compuestos orgánicos absorbibles (AOX) (Noel, 2017). La tecnología empleada en la fase de blanqueo ha experimentado cambios extremadamente rápidos tras el descubrimiento y la alarma mundial de la alta toxicidad de los efluentes de plantas de celulosa en los años 80, en donde se

encontraron dioxinas y furanos en los efluentes, eliminando el uso de cloro elemental y utilizando en su lugar dióxido de cloro y otros agentes oxidantes con el objetivo de disminuir las concentraciones de AOX en el efluente y demostrando mediante estudios que el método de blanqueo ECF es virtualmente libre de dioxinas y sustancias tóxicas persistentes bioacumulables, mientras que la cantidad de compuestos organoclorados que quedan en el efluente tienen una composición similar a los generados naturalmente y no son persistentes (Baipaj, 2015). Actualmente existen tres procesos de blanqueo: tradicional que utiliza Cloro Elemental (en desuso); Elemental Chlorine Free (ECF) con Dióxido de Cloro (dominante en la industria); y Totally Chlorine Free (TCF) proceso totalmente libre de cloro (poco utilizado) (Ruiz, 2008). La figura N°7 muestra secuencia de blanqueo del tipo ECF moderna. La mayor parte de los químicos usados en las distintas etapas del blanqueo son agentes altamente oxidantes, estas se intercambian entre etapas ácidas con químicos como cloro elemental(C), dióxido de cloro(D), ozono(Z) y se continúa con una etapa de extracción alcalina que puede ser reforzada con oxígeno (EO), con peróxido de hidrógeno (EP) o ambos (Eop), para así eliminar los productos de degradación de lignina (RIADICYP, 2008). A continuación, se describen las secuencias de blanqueo para la secuencia (D0EOPD1D2).

- **Primera etapa de dióxido de cloro (D0):** El dióxido de cloro es uno de los principales químicos usados para el blanqueo de pulpa, en esta primera etapa normalmente se utilizan entre 10-12 kg/ADt; pero puede variar dependiendo del número Kappa de entrada para la etapa de blanqueo. La solubilidad del ClO_2 disminuye con la temperatura, por lo que se prefiere trabajar con una temperatura de 70°C. El tiempo de retención de dióxido de cloro en la etapa de deslignificación es de 45 minutos aproximadamente. El pH es de suma importancia ya que en la reacción de ClO_2 con pulpa, dependiendo del pH se descompone en diferentes especies como clorato y clorito, comúnmente el pH óptimo es de 3,5 a 4,0 (Dence y Reeve, 1996).

- **Etapa de extracción (E):** La etapa de extracción alcalina es esencial después de la etapa de blanqueo con químicos de cloro para así remover productos de lignina clorados y oxidados desde la pulpa. También ayuda la reactivación de la lignina residual para la próxima etapa de oxidación. Como no todos los compuestos de ligninas cloradas son solubles en agua, es necesario añadir una solución de soda débil para la disolución de estos, en algunos casos se agrega oxígeno y peróxido de hidrogeno para obtener mejores resultados y reducir el consumo de dióxido de cloro en la etapa siguiente (pulppapermill, 2015).
- **Etapa D1 y D2:** En la etapa final de blanqueo al igual que en la primera se añade dióxido de cloro. El objetivo principal de esta etapa es aumentar el brillo para alcanzar el nivel de blanqueado deseado, esto se logra mediante reacciones de oxidación entre los enlaces dobles del carbono y el oxígeno presentes en la pulpa, haciendo que el cloro reaccione con los grupos cromóforos existentes, permitiendo la ruptura y así quitando el color amarillo. Normalmente tiene una retención de 3 horas cada etapa a una temperatura de 70-75°C y se opera a un pH cercano a neutro entre 5,5 – 6 para así alcanzar un mayor nivel de blancura. (Dence y Reeve, 1996).

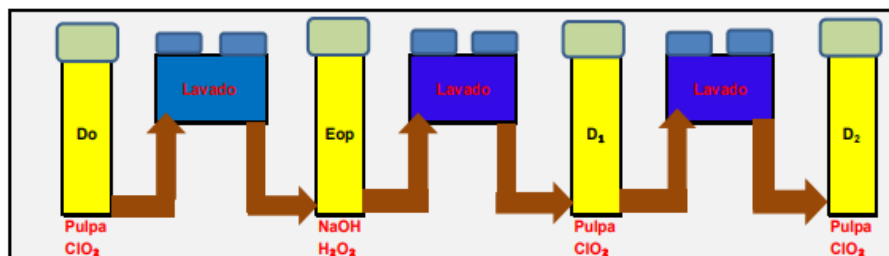


Figura N°7: Secuencia típica de blanqueo de celulosa Kraft (DoEopD1D2).

Fuente: Rivera, 2012.

2.5 Caracterización de efluentes de plantas de celulosa Kraft e impacto en el medio ambiente

La industria de celulosa Kraft, debido a las características de su proceso productivo, hace un uso intensivo del agua, ocupando el tercer lugar a nivel mundial en cuanto a la extracción de agua dulce, por detrás de la minería y la industria química (Bajpai, 2013). Lo anterior, se evidencia en los elevados volúmenes de descarga de efluentes que posee, con un valor promedio de 45 m³ por tonelada de producto elaborado, llegando incluso a alcanzar los 60 m³ (Carrasco, 2004).

Esta industria ha sido durante años considerada como una de las principales fuentes de contaminación del medio ambiente, pudiendo producir repercusiones en los ecosistemas (Ali y Sreekrishnan, 2001). Los residuos líquidos si bien son generados a partir de varias etapas en el proceso productivo (Tabla N°4 y figura N°8), la mayor carga contaminante proviene, principalmente, de la secuencia de blanqueo, lavado de equipos y derrames de pulpa (Morales, 2014). “En general estos efluentes se caracterizan por su alto contenido de sólidos suspendidos, carga orgánica (DBO5 y DQO), color por presencia de ligninas, derivados de ligninas, taninos y compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX), estos últimos para el caso de celulosa Kraft blanqueada” (Carrasco, 2015).

Tabla N°4: Caracterización de los efluentes generados en el procesamiento de celulosa Kraft blanca.

Fuente de contaminación de los efluentes	Características de efluentes
Agua utilizada en la manipulación y transporte de la madera, etapa de descortezado y lavado de chips	Sólidos Suspendidos DBO5 Color Ácidos de resina
Etapa de cocción y condensados de licores	DBO

	Compuestos de azufres reducidos
Efluente obtenido en etapa de blanqueo	DBO Color Sólidos Suspendidos AOX Fenoles
Derrames a lo largo del proceso	DBO DQO Color Sólidos suspendidos AOX

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de Bajpai, 2015; Gavrilescu, 2007.



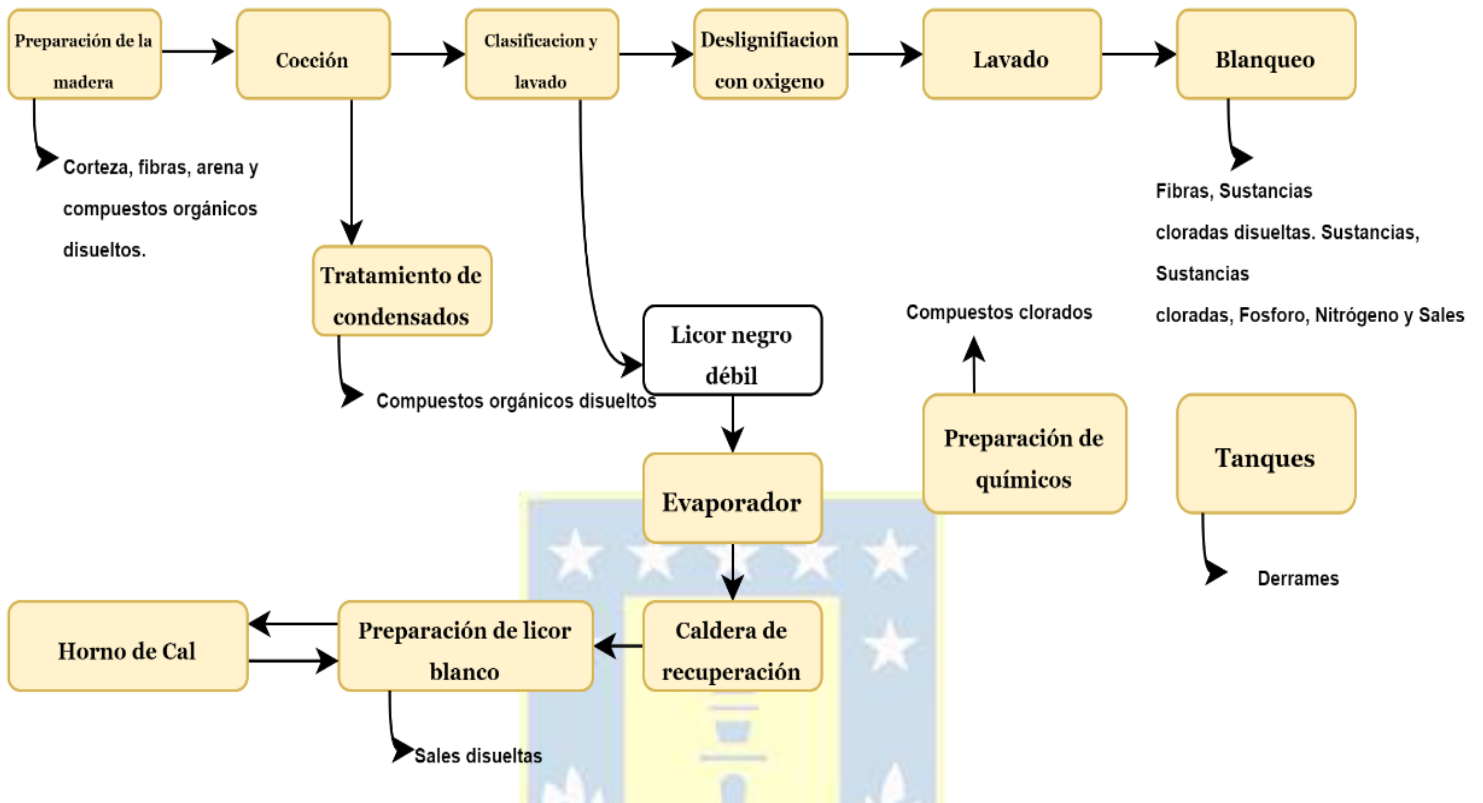


Figura N°8: Principales fuentes de contaminación de efluentes durante el proceso de celulosa Kraft.

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de Bajpai, 2015; Gavrilescu, 2007.

Alrededor de 300 contaminantes han sido identificados en la planta de blanqueo y 200 de ellos son compuestos orgánicos clorados que incluyen ácidos de resinas clorados, fenoles clorados y dioxinas. Parte de estos compuestos como los fenoles clorados y dioxinas son considerados tóxicos, no biodegradables y con una tendencia a la bioacumulación, dentro de los compuestos organoclorados, los más famosos son las dioxinas, éstas vienen de dos familias de compuestos nombradas dibenzo-para dioxina cloradas (PCDD) y dibenzofuranos policlorados (PCDF), dentro de estas familias, las que han causado mayor controversia son las 2,3,7,8-

TCDF Y 2,3,7,8-TCDD las cuales son especialmente toxicas, cancerígenas y bioacumulables (Bajpai, 2016).

Los compuestos derivados de la degradación de la lignina son comúnmente considerados como el mayor responsable de compuestos clorados, sin embargo, otros compuestos importantes encontrados en el efluente son compuestos derivados de la madera, compuestos como ácidos resínicos, ácidos grasos, fitoesteroles y terpenos, estos compuestos son sustancias lipofílicas apolares y son formados en el proceso de digestión y forman parte del licor negro, estos pueden llegar al efluente por la adición de estos compuestos en las fibras que llegan a la planta de blanqueo o por derrames de licor negro durante el proceso Kraft (Noel, 2017).

Las descargas de plantas de celulosa también pueden contener un alto nivel de nutrientes como fósforo y nitrógenos los cuales aumentan el crecimiento bacteriano y algal, además de la materia orgánica que es incorporada en la cadena trófica y genera eutrofización. El fosforo lo proporciona la materia prima, se genera en el sistema de recuperación y se añaden al sistema de tratamiento secundario de efluentes, ya que el efluente de la celulosa es bajo en nutrientes, y estos son necesarios para el crecimiento de la biomasa y la floculación de lodos (Lillo, 2013).

Se ha demostrado una variedad de respuestas en poblaciones de peces que viven en los ecosistemas receptores de descargas de efluentes de plantas de celulosa blanqueada, estudios como los de Chamorro et al., 2010; Barra et al., 2021, y Chiang et al., 2010 indican respuestas estrogénicas, causadas por compuestos que impactan en el sistema endocrino, esto genera un retraso en la maduración sexual, gónadas más pequeñas, cambios en la reproducción de peces y alteraciones en el tamaño del hígado.

2.6 Tratamiento de efluentes de celulosa proceso de celulosa Kraft

Debido a las características de los efluentes de celulosa Kraft y con el objetivo de generar residuos finales que cumplan con los flujos y concentraciones de

contaminantes estipulados en la normativa vigente y disminuir sus repercusiones en el medio acuático receptor, es necesario que el efluente recolectado de las distintas etapas del proceso productivo pase por un tratamiento antes de descargarla en el cuerpo de agua receptor. Las tecnologías de tratamiento llamadas “al final del tubo” han sido bien estudiadas y desarrolladas en las últimas décadas y se pueden clasificar en tres etapas: tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario (ver Figura N°9) (Zaror, 2020). En la Tabla N°5 se presenta una caracterización de un efluente típico de la industria de celulosa sin tratamiento.

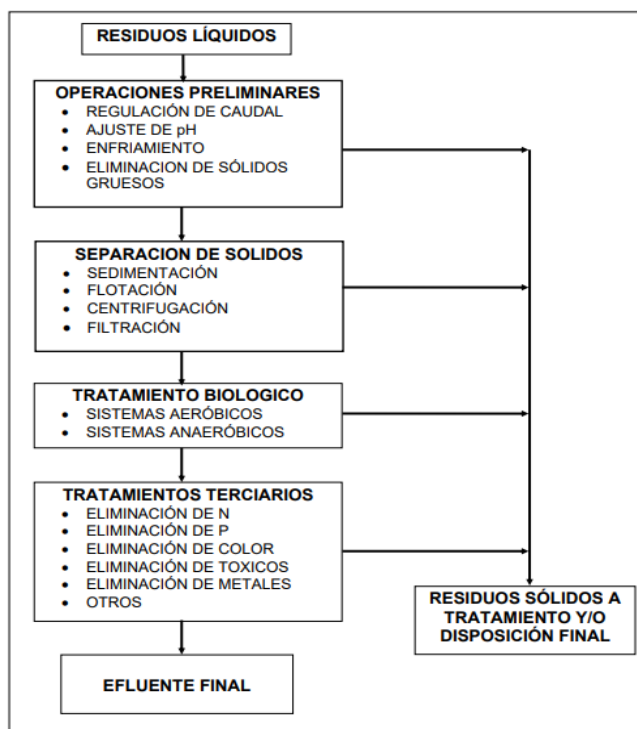


Figura N°9: Sistema típico para tratamiento de residuos líquidos.

Fuente: Zaror,2000.

Tabla N°5: Características típicas del efluente de celulosa Kraft.

Parámetro	Unidad	Valor
Solidos Suspendidos	mg/L	37 - 74
DQO	mg/L	1124 - 1738
Color	Pt/Co	4033 - 4667
AOX	mg/L	12

SS: Solidos Suspendidos, DQO: Demanda química de oxígeno, AOX: Compuestos orgánicos halogenados.

Fuente: Urquejo, 2015.

Tratamientos primarios: Los tratamientos del tipo primario, también llamadas operaciones preliminares, se basan en procesos físicos y fisicoquímicos de separación de contaminantes. El objetivo principal es la reducción de materiales sólidos sedimentables y en suspensión, evidenciándose la reducción de materia orgánica alcanzando eficiencias entre un 80-90%, además regula el pH, regula el caudal del efluente y la temperatura (Terram, 2004). Para la regulación de caudal se usan ecualizadores, que son unos estanques que reciben el efluente contaminado, para luego tener un flujo de salida constante. En el caso del control de pH se usa un sistema de neutralización en el cual, dependiendo del pH del efluente de entrada, se añade sustancia álcali o ácido para llegar a un nivel de pH entre 6,0 – 8,5. En cuanto a la regulación de temperatura es usado mediante un mecanismo de intercambiador de calor, donde el método más utilizado son las torres de enfriamiento. Para el caso de la eliminación de sólidos suspendidos existen técnicas como filtración centrifugación, sedimentación y flotación. Los sólidos gruesos como astillas y corteza se usan un sistema de cribado o tamizado. Para la filtración se usa comúnmente un filtro granular el cual pueda permear, generando un efluente más limpio. Los procesos más utilizados son los de sedimentación y flotación los cuales se basan en la diferencia de densidad entre el agua y las partículas sólidas, si la densidad del sólido es inferior a la del agua esta flotará, mientras que en el caso contrario esta sedimentará. Esto se hace mediante piscinas de sedimentación y flotación en donde se genera un lodo el cual es separado del

efluente clarificado, el cual es llevado a la planta de tratamiento secundario (Zaror, 2020).

Tratamiento secundario: Se trata de sistemas biológicos en donde el material solubilizado o en estado coloidal, es utilizado por parte de microorganismos en el medio transformándolos en subproductos volátiles y en componente celulares (Zaror, 2000). El tratamiento secundario es utilizado principalmente para la eliminación de materia orgánica contenida en el efluente, genera biomasa fácilmente separable del líquido y se obtienen subproductos líquidos, gaseosos y sólidos. Las tecnologías implementadas son de tipo biológica aeróbica y anaeróbica, en los sistemas aeróbicos los reactores biológicos más utilizados son los de lodos activados, mientras que en los sistemas anaeróbicos son los digestores anaeróbicos, las características estándares del efluente secundario se puede ver en la Tabla N°6 (Xavier et al., 2005).

Sistema aeróbico: El sistema de tratamiento biológico aeróbico se caracteriza por requerir oxígeno para que el proceso se desarrolle, con una velocidad más rápida de las bacterias y donde se genera dióxido de carbono y biomasa (lodo). Donde, para que se alimenten de oxígeno se pueden usar sistemas de aireaciones mecánicas o difusores. Entre los reactores más usados están los sistemas de lagunas aireadas, lodos activados y filtros biológicos (Zaror, 2000). Las lagunas de aireación es el método más económico y simple de emplear, es un depósito de gran superficie y entre 2 – 6 m de profundidad, de una sola pasada (no hay recirculación de biomasa) y altos tiempos de residencia de 3 a 7 días. Los sistemas de lodos activados es el método más utilizado en la actualidad funciona como una laguna de aireación; pero este cuenta con sistemas de reciclo de biomasa, donde se recicla el lodo de salida y se vuelve a incorporar a la laguna de lodos, por lo que se mantiene un nivel de lodos constante y baja el tiempo de residencia a 0,2 a 2 días con eficiencias de eliminación de demanda biológica de oxígeno (DBO5) de 65-99%, y eliminación de demanda química de oxígeno (DQO) de hasta el 60% (Hernández, 2015). El tratamiento es seguido de una etapa de sedimentación para separar los

lodos del efluente clarificado, aunque también están los sistemas compactos, donde el sedimentador es parte del biorreactor. Finalmente, dentro de los sistemas de tratamiento aeróbico se encuentran los filtros biológicos los cuales se tratan de microorganismos inmovilizados en matrices inertes, estos se caracterizan por una gran concentración de biomasa, entre estos los más utilizados son los biorreactores de membrana (MBR) el cual se usa con un proceso de membrana para separar el efluente de la biomasa y dentro de los más modernos están los biorreactores de lecho móvil (MBBR), el cual consiste en soportes inertes con una biopelícula adherida, estos están en constante movimiento, poseen una baja pérdida de biomasa por lo que no necesitan una limpieza periódica (Zaror, 2020).

Sistema anaeróbico: El sistema de tratamiento biológico anaeróbico, no requiere oxígeno por lo que se necesita menor cantidad de energía y genera gas metano que se puede usar como biocombustible. En comparación con los sistemas aeróbicos estos son más lentos, sensibles a compuestos inhibidores y se generan contaminantes secundarios como ácido sulfhídrico y mercaptanos. Estos se pueden usar en sistemas de lagunas, digestores de contacto, filtro y reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB). Las lagunas anaeróbicas, están cubiertas con un material plástico para así mantener su condición anóxica, recolecta gas metano en distintos puntos y son ideales para tratar efluentes con alta concentración de sólidos suspendidos como los de las plantas de celulosa. Los procesos anaeróbicos de contacto son un proceso similar al sistema de lodos activados, solo que en condiciones anaeróbicas y al igual que el sistema de lodos activados, parte de la biomasa es reciclada antes de pasar a un sedimentador secundario. En cuanto a los sistemas de flujo ascendente (UASB) las bacterias se encuentran sedimentadas y cubren el fondo del reactor, es alimentado por la parte inferior, éstas tienen una alta retención de sólidos lo que permite tratar aguas con contenido orgánico bajo 0,4 kg DBO/m³ (Zaror, 2000).

Tabla N°6: Caracterización efluente secundario de celulosa Kraft tras tratamiento con sistema de lodos activados.

Parámetro	Unidad	Rango
pH	-	7,2 – 7,4
DBO ₅	mg/L	16,0 – 34,9
DQO	mg/L	202,9 – 213,7
Color	Abs	0,2 – 1,0
Fenoles totales	mg/L	164,0 – 204,2
Nitrógeno total	mg/L	1,7 – 1,9
Fósforo Total	mg/L	0,8 – 0,9

Fuente: Hernández, 2015.

Tratamiento terciario: El objetivo del tratamiento terciario, también llamado tratamiento avanzado de aguas es la eliminación de otros contaminantes tales como metales, nitrógeno, fósforo, virus, bacterias, compuestos coloreados y compuestos no biodegradables obteniendo así, una calidad superior del efluente obtenido en las etapas anteriores, entre estos tipos de tratamiento se encuentran los sistemas biológicos para eliminación de nitrógeno, oxidación avanzada, carbón activado y precipitación química (Ramalho, 1996; Zaror, 2020).

2.7 Industrias de celulosa en la cuenca del río Biobío

Las industrias de celulosa ubicadas en la cuenca del río Biobío corresponden a las plantas pertenecientes a Empresas CMPC (Compañía manufacturera de papeles y cartones), esta empresa fue fundada en 1920 por Juan Luis Sanfuentes tras la fusión de las empresas Ebbinghaus, Haensel y la Comunidad Fábrica de Cartón Maipú, fue la pionera en Chile en la fabricación de celulosa y papel, ubicada en Puente Alto, Región Metropolitana con una producción de 2,2 mil toneladas anuales de papel. Ahora sus operaciones se concentran se en negocios forestales, celulosa, papeles, cartulinas, productos tisú, papel periódico, bolsas industriales, cajas de cartón corrugado, participando en más de 50 países. Esas operaciones están

organizadas en cinco empresas: Forestal Mininco, CMPC Celulosa, CMPC Papeles, CMPC Tissue y CMPC Productos de Papel (Ruiz, 2008).

En el caso de la cuenca del río Biobío, existen tres plantas de celulosa (Figura N°10 y Tabla N°7), la primera planta fue la planta CMPC Planta Laja, fundada en 1959, la cual fue la primera planta de celulosa Kraft en Chile y segunda en Latinoamérica. En 1993 entró en operación la planta CMPC Pacifico una de las plantas de fibra larga más modernas de Latinoamérica. Adicionalmente la planta CMPC Santa Fe línea I comenzó sus operaciones en 1991 fabricando celulosa blanqueada de eucalipto y en el año 2006 entro en funcionamiento la Santa Fe línea II, aumentando su capacidad de producción (CMPC,2019).



Figura N°10: Empresas CMPC en la cuenca del Río Biobío.

Fuente: Elaboración propia por medio del Software Google Earth.

- **CMPC Santa Fe** se ubica en la región del Biobío, en la ciudad de Nacimiento. Comienza a operar en 1991 y es la mayor planta de Celulosa Kraft Blanca de Eucalipto en Chile, con una capacidad de producción de 1.550.000 ADt/año (CMPC, 2019).

- **CMPC Planta Pacífico** es una de las filiales más modernas de empresas CMPC, se ha posicionado como líder en costos en la industria mundial de la celulosa. Tiene una capacidad de producción anual de 500.000 toneladas de Celulosa Kraft Blanca de Fibra Larga (BSKP), la cual produce a partir de madera de pino radiata. Esta se encuentra situada a 600 km de Santiago, en la Región de la Araucanía (Arancibia, 2018).
- **CMPC Laja** fue la primera planta de celulosa Kraft construida en Chile y la segunda de Sudamérica (CMPC,2019). Comenzó a operar en 1959 con una capacidad de producción de 80.000 ADt al año. Tras sucesivos proyectos de modernización, alcanzó una capacidad de producción anual de 460.000 toneladas, de las cuales 360.000 toneladas corresponden a celulosa y 70.000 toneladas a papel. Planta Laja está ubicada a 550 km al sur de Santiago, en la Región del Biobío, en el lugar de confluencia de los Ríos Laja y Biobío (Pereira, 2014).

Tabla N°7: Plantas de celulosa que descargan efluentes en el río Biobío, tipo de proceso y tratamiento.

Planta	Región	Empresa	Tipo de celulosa	Producción (milion/año)	Tratamiento de efluentes	Cuerpo receptor
Santa Fe	Biobio	CMPC	BEKP	1.500	TP:CL;MBBR+LO	Río Biobío
Pacifico	Araucania	CMPC	BSKP	500	TP:CL;TS:LA	Río Biobío
Laja	Biobio	CMPC	BSKP-UKP	330	TP:CL;TS:MBBR+LO	Río Biobío

SB: Sin Blanqueo; ECF: Elementary Chlorine Free; TP: Tratamiento Primario; CL: Clarificador gravitacional; TS: Tratamiento Secundario; LO: Lodos Activados; LA: Lagunas Aireadas; MBBR: Móvil Bed Biofilm Reactor; TT: Tratamiento Terciario; DAF: Flotación por aire disuelto; UKP: Unbleached Kraft Pulp; BSKP: Bleached Softwood Kraft Pulp; BEKP: Bleached Eucalyptus Kraft Pulp.

Fuente: Chiang et al, (2010); CMPC, (2019).

2.8 Normativa y tecnología en la industria de la celulosa

Pocas industrias han sido tan afectadas por movimientos sociales medio ambientales como la industria de la celulosa desde los años 80, los movimientos ambientales respaldados por estudios científicos han hecho a la industria gastar miles de dólares en un profundo cambio en su tecnología y diseño para tener un proceso más amigable con el medio ambiente. Esto se ha visto reflejado en un gradual cambio mundial hacia una producción más limpia (Sonnenfeld, 1999).

En la industria de la celulosa es interesante ver el desarrollo de la normativa y tecnología, teniendo en cuenta el hecho que muchos países a lo largo del mundo se comprometieron al desarrollo de nuevos estándares normativos más estricto, aproximadamente al mismo tiempo. El desencadenante en común fue el anuncio de la Agencia de Protección contra el Medio ambiente en Estados Unidos (US EPA), en el año 1987 sobre las detecciones de dioxinas en productos de papel y en peces atrapados río abajo en distintas plantas de celulosas. Teniendo en cuenta las dioxinas tenían la reputación de “la sustancia más tóxica conocida por la humanidad” el anuncio repercutió a lo largo de todo el mundo, extendiéndose su atención más allá de las dioxinas hacia todas las sustancias cloradas encontradas en los efluentes de celulosa y especialmente en la planta de blanqueo con uso de cloro elemental el cual fue el principal culpable de los altos niveles de compuestos orgánicos absorbibles. Esto llevo al rápido cambio de tecnología a la conocida ECF sin cloro elemental (Harrison, 2005).

El aumento de la preocupación por estos problemas medioambientales, en particular la contaminación del agua y el aire y el cambio climático ha llevado a la introducción de políticas medioambientales nuevas y más estrictas (Bergquist, 2013). Estas políticas, dependiendo del país, pueden tomar distintas formas, entre las que se incluyen reglamentos en formas de normas de rendimiento o estándares de emisión, como también diversos instrumentos basados en incentivos como impuestos/tasas y normas en base a desarrollo tecnológico con un claro

conocimiento de las emisiones esperadas, conocidas como Mejores tecnologías disponibles (MTD). Además de estos, también es importante considerar el papel de los enfoques voluntarios y la autorregulación, que a menudo forma parte de las estrategias corporativas de sostenibilidad (King, 2012). La definición de estos conceptos se describe a continuación:

2.8.1 Mejores tecnologías disponibles (MTD) o BAT (Best available technology)

La Directiva sobre emisiones industriales (2010) de la Unión Europea (UE) define el BAT como "la etapa más eficaz y avanzada en el desarrollo de actividades y sus métodos de funcionamiento, indicando la idoneidad práctica de técnicas particulares para proporcionar la base de los valores límite de emisión y otras condiciones de permiso destinadas a prevenir y, cuando esto no sea posible, reducir las emisiones y el impacto en el medio ambiente en su conjunto". Sin embargo, algunos países también incluyen técnicas innovadoras y de vanguardia entre su BAT. Algunas políticas no se refieren a BAT, sino a otros conceptos similares, tales como técnicas disponibles, mejores técnicas tecno-económicamente disponibles, mejor tecnología de control disponible y mejores opciones prácticas. En aras de la simplicidad, en el contexto de este informe el término BAT se refiere tanto a BAT como a todos los conceptos similares (OECD, 2019).

2.8.2 Valores límite de emisión o estándares de descarga

Los valores límites de emisión o ELV por su sigla en inglés, se definen como valores máximos permitidos para las emisiones de aire, agua o suelo para un determinado contaminante y sector y, constituyen valores guía o jurídicamente vinculantes para las instalaciones industriales. En la mayoría de los países estos valores se establecen en la legislación ambiental y en las condiciones o documentos de orientación para los permisos de emisión. En muchos países, los límites de emisión se conocen como estándares (OECD, 2019).

2.8.3 Certificación de procesos

Las certificaciones de procesos son dadas por un agente externo que garantiza y da testimonio a que el producto o servicio que se ofrece cumple con distintos requisitos específicos, estos varían dependiendo del tipo de certificación (ISO, 2021). Entre las certificaciones más usadas en las industrias esta la ISO 9001:20015 que revisa el desempeño de la organización de la empresa, estableciendo objetivos de calidad de producto, ISO 45001:2018 el cual permite a las empresas una mejora de su desempeño de seguridad y prevención de riesgo ocupacional y también la ISO 14.001:2015 la cual permite la identificación, gestión y control de todos los aspectos e impactos ambientales pertinentes a sus operaciones (q2chile, 2021).

De esta forma la legislación se ha vuelto más estricta, obligando a las empresas a tomar medidas en términos medio ambientales, optimizando sus procesos y aprovechando los recursos naturales de una forma más eficiente. En este ámbito se han acuñado conceptos como ecodiseño, el cual tiene como objetivo el diseño de productos que sean amigables con el medio ambiente y gestión ambiental, el cual se centra en optimizar recursos naturales, técnicos y humanos, así como la implementación de nuevas tecnologías más limpias lo que finalmente se traduce en la minimización de residuos desde el origen y disminuir la carga contaminante recibida en el medio receptor (González, 2004).

2.9 Normativa aplicada a las plantas de celulosa para efluentes líquidos en Chile.

La Ley 19300/1994 sobre bases generales del medio ambiente, es el principal marco regulatorio medioambiental en Chile. Es la primera ley que recoge de forma integral y global los principales temas ambientales para posteriores cuerpos legales, también introduce sistemas de gestión ambiental que antes no existían como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), establece normas de calidad ambiental primarias, secundarias, normas de emisión y establece una unidad de coordinación de las instituciones con competencia ambiental, la Comisión Nacional

del medio ambiente (CONAMA), cuya principal función era la coordinación de procesos de elaboración de normas y la coordinación del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental por medio de Comisiones Regionales de Medio Ambiente(COREMA)(Luraschi, 2007). Esta ley es modificada mediante la Ley 24.417/2010, la que reestructura la institucionalidad ambiental instaurada en la Ley 19.300 creando un conjunto de instituciones que asumen la dirección y coordinación de las políticas ambientales del país como el Ministerio del Medio Ambiente(MMA) , el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), que reemplaza a la CONAMA como medio administrativo de sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) y la Superintendencia del Medio Ambiente, como órgano fiscalizador del correcto cumplimiento de la normativa ambiental(Olivares, 2010).

A continuación, se detallan las regulaciones que pudieran relacionarse con las descargas de riles de celulosa, objetos de estudio de esta habilitación profesional.

a. D.S MOP n.º 609/1998 (Norma de emisión para descargas de Riles a alcantarillado) que regula las descargas industriales a sistemas de alcantarillados públicos operados por empresas sanitarias, esta norma, además, busca mejorar la calidad ambiental de las aguas servidas, las que son tratadas por empresas de servicios sanitarios y luego son descargadas en los cuerpos de agua (BCN, 2020).

b. D.S MINSEGPRES n.º 90/2001(Norma de emisión para descarga de Riles a aguas marinas y continentales superficiales) la cual establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales estableciendo límites de concentración para parámetros fisicoquímicos de las descargas emitidas por una fuente emisora (BCN,2020).

c. D.S MINSEGPRES n.º 46/2002 (Norma de emisión para descargas a aguas subterráneas) que regula las descargas de aguas residuales que se disponen mediante infiltración hacia las aguas subterráneas (BCN, 2020).

d. D.S MMA n.º 9/2015(Establece normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Biobío) la cual establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (BCN, 2020).

En el caso de las plantas de celulosa CMPC ubicadas en la cuenca del río Biobío estas deben respetar los límites máximos para la tabla 1 y 2 del D.S 90 /2001, las cuales estipulan los parámetros límites para cuerpos de agua fluviales sin capacidad y con capacidad de dilución, respectivamente, estos se pueden encontrar en los anexos N°1 y N°2.

Según lo que establece el marco normativo las empresas deben realizar autocontrol que debe ser realizado por laboratorios acreditados. Los organismos encargados de aprobar los programas de monitoreo, procesar la información y fiscalizar son la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), la Dirección Nacional de Territorio Marítimo y Marina Mercante (DIRECTEMAR), las empresas sanitarias y la Superintendencia de Medio Ambiente. Además, la SISS realiza fiscalizaciones e inspecciones a establecimientos que declaran no generar Riles, con el fin de verificar esta condición. La SISS puede sancionar a los que no cumplan con las normas de emisión o instrucciones de la SISS, incluyendo multas de hasta 1,000 UTA y clausura parcial o total en el caso de un establecimiento industrial (Banco Mundial, 2011).

Además, los proyectos de plantas de celulosa deben pasar por un Sistema de Evaluación ambiental (SEIA) en donde mediante una Declaración de impacto ambiental (DIA) o Evaluación ambiental (EIA), el proyecto se evalúa ambientalmente verificando que el proyecto cumple con la normativa vigente y se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos (SEA,2021). La evaluación del

proyecto culmina con un Resolución de Calificación Ambiental (RCA), la que, en caso de ser aprobada puede fijar condiciones o nuevas exigencias ambientales (GRN, 2021).

2.10 Norma Secundaria de Calidad ambiental para la cuenca del río Biobío (NSCA)

Las Normas Secundarias de Calidad Ambiental (NSCA) para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales de la Cuenca del Río Biobío (2015), es un instrumento de gestión implementado en el río Biobío el cual diagnostica de forma permanente la calidad de aguas a lo largo de él, esta norma tiene como objetivo el proteger y preservar los ecosistemas acuáticos junto con sus servicios ecosistémicos a través del control de la calidad de las aguas (SMA,2018).

El D.S. N° 9/2015, del Ministerio del Medio Ambiente establece las normas secundarias de calidad ambiental dividiendo al río en 14 áreas de vigilancia (Figura N°11 y Anexo N°3) en las cuales se define los niveles de agua, respecto a distintos parámetros contaminantes que fueron específicamente elegidos para el río Biobío estos: Oxígeno disuelto; pH; Aluminio total; Amonio; Compuestos orgánicos halogenados (AOX); Cloruro; Coliformes Fecales; Conductividad eléctrica; DBO5; DQO; Fósforo total; Hierro total; Índice de fenol; Nitrato; Nitrito; Nitrógeno total; Ortofosfato; Sólidos Suspendidos totales y Sulfato (SMA,2018).

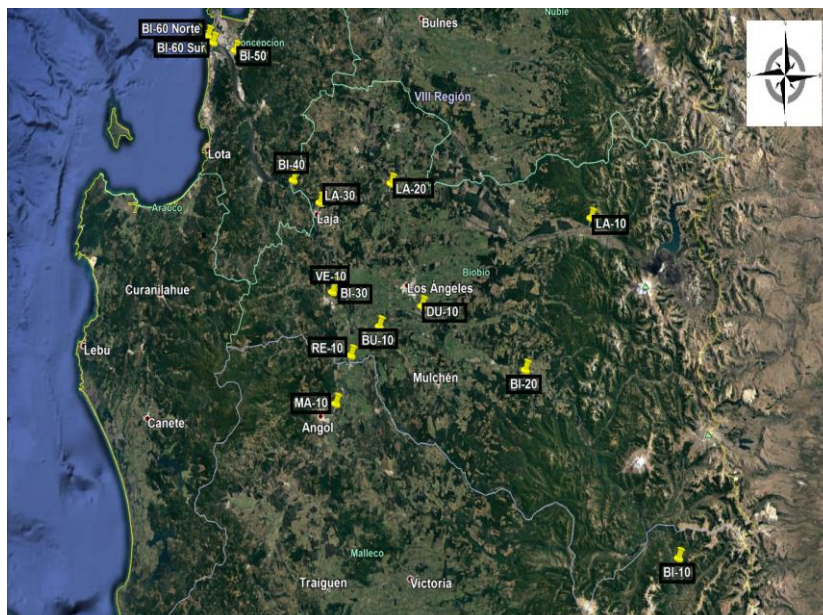


Figura N°11: Estaciones de monitoreo a lo largo del río Biobío.

Fuente: SMA, 2018.

El departamento de Conservación de Ecosistemas Acuáticos del Ministerio del Medio Ambiente, elaboró una tabla de clases de calidad fisicoquímica para las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para la protección de las Aguas Superficiales de la Cuenca del Río Biobío (NSCA) (Tabla N°8), esta consta con 5 clases de calidad de agua, con distintos límites para cada clase. Las clases se representan mediante colores del uno al cinco yendo de menor a mayor, desde calidad muy buena con baja perturbación, hasta calidad muy mala con alta perturbación de los ecosistemas acuáticos (Tabla N°9) (MMA, 2017).

Tabla N°8: Identificación de Clases de Calidad de Agua

Parámetro	Unidad	clase 1	clase 2	clase 3	clase 4	clase 5
		Excelente	Buena	Regular	Mala	Muy Mala
Aluminio Total	mg/l	0,09	0,72	1,17	1,62	> 1,62
Amonio	mg N/l	0,02	0,03	0,06	0,09	>0,09
AOX	mg/l	0,002	0,006	0,03	0,05	>0,05
Cloruro	mg/l	2	7	54	100	> 100
Coliformes Fecales	NMP/100ml	5	50	1000	10.000	>10.000
Conductividad	µS/cm	60	80	150	220	> 220
DBO5	mg/l	1	2	5	8	> 8
DQO	mg/l	3	10	15	20	> 20
Fenoles Totales	mg/l	0,002	0,004	0,007	0,01	>0,01
Fósforo Total	mg/l	0,02	0,03	0,1	0,2	> 0,2
Hierro Total	mg/l	0,15	0,74	1,1	1,47	>1,47
Nitrato	mg N/l	0,02	0,04	0,2	0,4	> 0,4
Nitrito	mg N/l	0,002	0,003	0,01	0,02	>0,02
Nitrógeno Total	mg/l	0,1	0,2	0,6	1	> 1
Ortofosfato	mg P/l	0,01	0,02	0,11	0,2	> 0,2
Oxígeno Disuelto	mg/l	≥ 10	≥ 9	≥ 7	≥ 5	< 5
pH	-	6,5-8	6,5-8,5	6,3-8,7	6-9	< 6, > 9
Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	2	15	35	55	> 55
Sulfato	mg/l	4	6	53	100	> 100

Fuente: MMA, 2017.

Tabla N°9: Características de las clases de calidad de agua, en cuanto Biota/eutrofización y parámetros químicos.

Clase	Perturbación	Biota / Eutrofización	Parámetros químicos
1 Excelente	Escasa perturbación	Estado natural de la cuenca, asegura la preservación de las especies más sensibles, reproducción de peces sensibles	Alta saturación de oxígeno
2 Buena	Moderadamente perturbado	Óptimas para la protección y conservación de ecosistema acuáticos, alta biodiversidad con una gran densidad	Siempre una buena concentración de oxígeno, escasa carga orgánica
3 Regular	Perturbado	Disminución de biodiversidad, tendencia al aumento del estado trófico (mayor abundancia de macrofitas, aumento de turbidez, etc.), gran diversidad de peces, pero no apta para peces sensibles	Oxígeno cambia mucho (algas y cargas orgánicas), pero suficiente para peces resistentes
4 Mala	Altamente perturbado	Condición crítica para el ecosistema acuático, daños en estructura y funciones del ecosistema acuático (mortalidad ≥ 50% ecosistema acuático), muy pocas especies tolerantes con abundancia extrema, especies sensibles desaparecen, mortalidad masiva de peces, eutrofización	Concentraciones ambientalmente inaceptables
5 Muy mala	Muy fuertemente perturbada con grandes cargas de contaminantes	Intoxicaciones por tóxicos, aparición de cianobacterias tóxicas, peces desaparecen, pérdida de biodiversidad	Concentraciones ambientalmente inaceptables, muy poco oxígeno, aumento de toxicidad (industria, pesticidas, entre otros), alta turbidez

Fuente: MMA, 2017.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN Y OBJETIVOS

¿Cuáles son las brechas tecnológicas y normativas de la industria de celulosa en la cuenca del río Biobío con relación a las descargas de efluentes líquidos, en comparación con otros países y la tecnología más avanzada existente?

3.1 Objetivo General

- Analizar las brechas normativas y tecnológicas asociada a la generación de efluentes líquidos de la Industria de Celulosa en la Cuenca Biobío.

3.2 Objetivos específicos

- Sintetizar la información disponible de la Industria de Celulosa en la Cuenca del río Biobío con énfasis en los efluentes líquidos
- Analizar mediante la Norma Secundaria de calidad ambiental para la cuenca del río Biobío la calidad de agua con énfasis en los contaminantes característicos de las descargas de plantas de celulosa.
- Realizar un análisis comparativo de la normativa de descarga de efluentes a los sistemas acuáticos de la Industria de Celulosa
- Describir el estado del arte de las mejores tecnologías disponibles asociadas a la generación de efluentes líquidos en la Industria de Celulosa.

4. ÁREA DE ESTUDIO

4.1 Descripción del área de estudio

La cuenca del río Biobío (Figura N°12) forma parte de la Región de Ñuble (VII), Región del Biobío (VIII) y Región de la Araucanía (IX), y está comprendida entre los paralelos 36°42' – 38°49' Latitud Sur y los meridianos 71° - 73°20' Longitud Oeste. Es una de las cuencas de mayor superficie (24.369 Km²) y caudal del país. El río Biobío es la fuente primordial de agua potable para gran parte de las comunas ribereñas, posee un total de 326 localidades pobladas, de las cuales 17 son ciudades y el resto lo conforman poblados con menor cantidad de habitantes y un número importante de 271 localidades rurales (EULA, 2019).

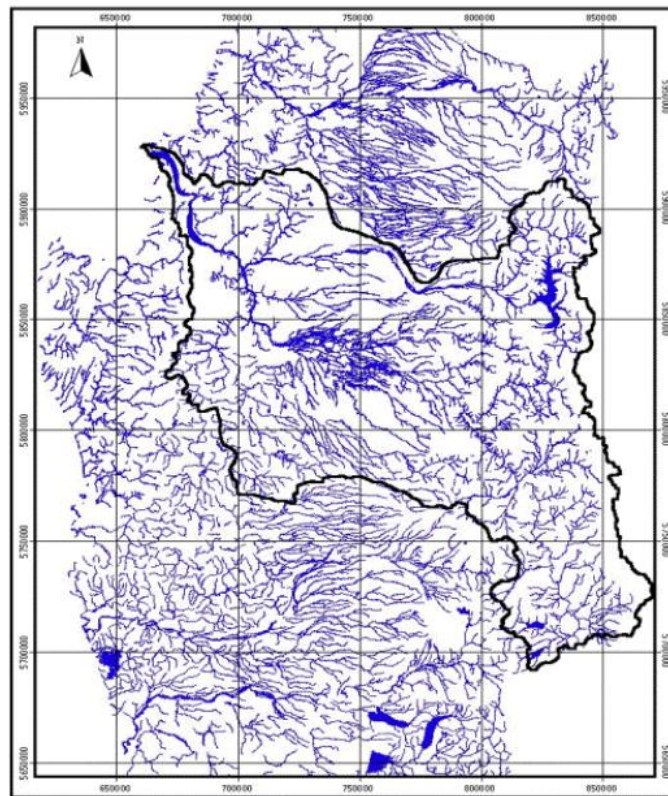


Figura N°12: Cuenca del río Biobío

Fuente: Stehr, 2018.

La cuenca hidrográfica del río Biobío debe su nombre a su cauce principal, el río Biobío, desde su nacimiento en los lagos Galletué e Icalma, recorre un curso de 380 km con una dirección SE-NO, desembocando al mar en el norte del Golfo de Arauco. La hoya del río Biobío, es la tercera más grande del país, después de las de los ríos Loa y Baker (BCN, 2020). La cuenca hidrográfica contiene 15 subcuencas menores, sometidas a la influencia de distintos ambientes y factores geográficos; por lo tanto, la dinámica del sistema es muy variable desde el inicio de su curso hasta su desembocadura. De estas 15 subcuencas, las principales corresponden a las del Alto Biobío y las de los ríos Duqueco, Bureo, Vergara y Laja. El régimen hidrológico de la hoya en el alto Biobío es más bien nival, pero ya en el curso medio, al recibir aportes pluviales, pasa a régimen mixto. Las principales características de la cuenca del río Biobío se resumen a continuación (Parra et al., 2013):

- Ubicación geográfica: 37° y 39° Sur; 71° y 73° Oeste.
- Superficie de la cuenca: 24.369 Km² (71% en VIII Región y 29% en IX Región).
- Morfología del río: Sector de rítrón: 270 Km Sector río de potamón: 110 Km.
- Geomorfología (unidades de relieve): Cordillera Andina Depresión Intermedia Cordillera de la Costa y Llanura litoral.
- Climatología: Muy variable espacial y temporalmente, condicionada por topografía y el océano.
- Fuente de alimentación: Precipitaciones invernales, deshielos primaverales.
- Longitud cauce principal 380 Km.
- Caudal en la desembocadura: Promedio anual de 960 m³/s Promedio de invierno 1.600 m³/s Promedio de verano 200 m³/s.
- Ubicación de desembocadura: Parte norte del Golfo de Arauco.
- Población humana de la cuenca: 1.200.000 habitantes.
- Depresión Intermedia: Plantaciones con especies exóticas, agricultura, ganadería, recreación y turismo.

- Cordillera de la Costa y Llanura Litoral: Plantaciones, recursos pesqueros, Recreación y Turismo. (EULA, 2019).

La cuenca del río Biobío es el sistema hidrológico más importante de Chile (Parra, 2009). La cuenca brinda una gran cantidad de servicios ecosistémicos, término que, en su definición más aceptada, es la dada por la Evaluación de los Ecosistemas del milenio, que los define como “los beneficios que las personas obtienen del ecosistema” el cual promueve los valores instrumentales de la naturaleza (Diaz, 2017). La cuenca del río Biobío al poseer múltiples servicios ecosistémicos se le considera de río de uso múltiple, esto hace que, debido a su naturaleza y variedad de usos, su gestión en un contexto de desarrollo sustentable sea compleja y delicada (Parra y Valdovinos, 2006).

Los servicios ecosistémicos se pueden clasificar en: **servicios de abastecimiento o provisión** que incluyen los beneficios tangibles o materiales como alimentos, agua y materias primas; **servicios culturales**, que son beneficios intangibles o inmateriales como el uso recreativo, la relajación la educación ambiental y el disfrute estético; **servicios de regulación** con la regulación de ciclo de nutrientes, clima, control de plagas e inundaciones y servicios de soporte, que engloban los mecanismos que sostienen los ecosistemas como la provisión de hábitat y formación de suelo (Diaz, 2017). En la siguiente tabla N°10 se muestran los principales servicios ecosistémicos en la cuenca del río Biobío.

Tabla N°10: Clasificación servicios ecosistémicos en la cuenca del río Biobío.

Servicio ecosistémico		Sub categoría
Servicio de abastecimiento o provisión	Alimento	Pesca de captura
		Acuicultura
	Agua dulce	Consumo humano
		Industrial
		Riego
	Materias primas	Grava/Arena

	Energías renovables	Energía hidráulica
	Recursos genéticos	
Servicios de regulación	Regulación del clima	Regulación del clima regional y local
	Regulación del agua	Regulación del agua
	Regulación de calidad de agua	Purificación de agua y tratamiento de desechos urbanos y industriales.
	Regulación de disturbios	-
	Regulación morfosedimentaria	-
Servicios culturales	Paisaje	-
	Identidad cultural	
	Conocimiento científico	
	Valores espirituales y religiosos	
	Recreación y ecoturismo	

Fuente: Díaz, 2017.

A escala nacional, la cuenca del río Biobío, representa un importante centro de desarrollo económico donde existe un gran desarrollo de los Sectores forestales, agricultura, industrial (celulosa y papel, metalúrgico, químico y de refinería) e hidroeléctrico, el cual es la mayor fuente de energía eléctrica en el país con un potencial de 2,430 MW (Parra et al.,2013). La Cuenca del río Biobío suministra agua a alrededor de un millón de personas, donde también recibe efluentes urbanos de 14 centros poblados (Figura N°13), cuenta con una red de canales por los cuales 220 hectáreas son suministradas con agua de riego, se practica pesca deportiva y tiene múltiples áreas de turismo y recreación. Este río también tiene un espectro

excepcional de hábitats y diversidad biológica, sustentado por las características ambientales que brindan todos los ríos que son afluentes de su cauce (Parra, 2012).



Figura N°13: Cuenca hidrográfica del río Biobío y sus principales centros poblados, en celeste el río Biobío y el verde sus principales afluentes

Fuente: Parra y Valdovinos, 2006.

Las características de multiusos de la cuenca del río Biobío, debido a sus distintos servicios ecosistémicos, provoca también que el río sea receptor de contaminantes de distintas fuentes. La fuente principal de contaminación puntual en el río, son los efluentes del sector industrial (Tabla N°11), acuicultura y descargas urbanas que se encuentran a lo largo del río. Las plantaciones forestales y agricultura por otro lado son las principales fuentes de la contaminación difusa del río Biobío, que, si bien la información científica es escasa, estudios han demostrado que un mal manejo de estas fuentes ha influenciado la magnitud de fuentes de contaminación difusa como la erosión (Parra, 2006).

Tabla N°11: Efluentes industriales que descargar al río desde aguas arriba hacia la desembocadura.

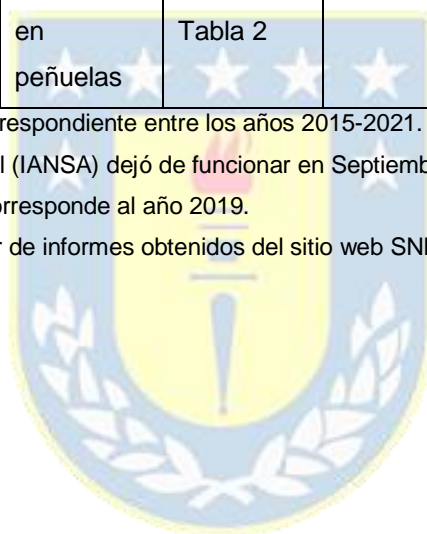
Industria	Volumen descarga(m ³ /s)	Lugar de descarga	Normativa aplicable	Área de vigilancia	Caudal* medio	Caudal* máximo	Caudal* mínimo
-----------	-------------------------------------	-------------------	---------------------	--------------------	---------------	----------------	----------------

				asociada de NSCA	(m3/s)	(m3/s)	(m3/s)
CMPC Pacífico	0,61	Río Biobío en Negrete	D.S.90. Tabla 2	BI-30	424,16	1051,74	103,26
CMPC Santa fe	1,38	Río Biobío en Nacimiento	D.S.90. Tabla 2	BI-30	424,16	1051,74	103,26
IANSA**	0,33	Estero Paillihue	D.S.90. Tabla 1	BI-30	424,16	1051,74	103,26
CMPC Laja	0,81	Río Biobío en Laja	D.S.90. Tabla 2	BI-40	-	-	-
ENAP	1,95	Río Biobío en peñuelas	D.S.90. Tabla 2	BI-60	577,70	1825,80	135,90

*: Caudal de área de descarga correspondiente entre los años 2015-2021.

** : La industria Azucarera Nacional (IANSA) dejó de funcionar en Septiembre del año 2019, por lo que el volumen de descarga calculado corresponde al año 2019.

Fuente: Elaboración propia a partir de informes obtenidos del sitio web SNIFA y DGA.



5. METODOLOGÍA

5.1 Objetivo específico 1: Sintetizar información disponible de las plantas de Celulosa Kraft en la cuenca del río Biobío con énfasis en sus efluentes líquidos.

Para comprender el contexto en que se encuentra la actividad industrial de la celulosa en la cuenca del río Biobío contó con una descripción detallada de los principales actores que se encuentran en esta zona. En este caso son las industrias de celulosa CMPC Laja, CMPC Pacífico y CMPC Santa Fe. Por este motivo se realizó una búsqueda en las páginas web de las empresas CMPC, utilizando publicaciones oficiales como reporte de sostenibilidad, reporte integrado y reportes sobre hechos esenciales. Además, se revisó las resoluciones de calificación ambiental de las plantas de celulosa por medio del sitio web del SEIA y tesis de investigación relacionadas con las empresas en cuestión y de esta forma se consiguió información cualitativa y cuantitativa de las empresas de celulosa, la tecnología que ocupan y detalles de sus procesos productivos que operan en la cuenca del río Biobío y sus efluentes líquidos. En base a esto se sintetizó la información en tablas sobre la tecnología actual de las plantas de celulosa estudiadas y sobre las descargas de efluentes líquidos.

5.2 Objetivo específico 2: Analizar mediante la Norma Secundaria de calidad ambiental para la cuenca del río Biobío la calidad de agua con énfasis en los contaminantes característicos de las descargas de plantas de celulosa.

Para cumplir con este objetivo se procedió a la elección de puntos de vigilancia estratégicos, donde se eligieron los puntos de monitoreo que tenían una mayor cercanía al punto de descarga antes y después de las plantas de celulosa del río Biobío, se utilizó información existente en informes técnicos de cumplimiento de la Norma Secundaria de Calidad de Aguas (NSCA) para el río Biobío hechos por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) en conjunto con los datos de parámetros físico-químicos obtenidos a través de la información Oficial

hidrometeorológica y de calidad de aguas en línea de la Dirección General de Aguas(DGA). Estos datos fueron comparados con la tabla de clases de calidad fisicoquímica que fue elaborada por el de Departamento de Conservación de Ecosistemas Acuáticos del Ministerio del Medio Ambiente (Tabla N°8) para las normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas superficiales de la cuenca del río Biobío (D.S N°9/2015 MMA). Los datos registrados fueron desde el 2015 hasta la fecha, en invierno y en verano, como las áreas de vigilancia de la Norma secundaria de calidad ambiental para el río Biobío se separan por áreas, se escogieron las áreas de vigilancia donde las empresas de celulosa puedan tener un mayor impacto debido a la cercanía del punto de descarga. Las áreas de vigilancia elegidas fueron BI-20 Río Biobío en Rucalhue, BI-30 Río Biobío en Coigüe, BI-40 Río Biobío ante junta Río Gomero y BI-50 en Planta la Mochita (Figura N°14). Además, como no se registraron datos de monitoreo para la NSCA en el año 2020 debido a la pandemia covid-19, para complementar la información de la NSCA se usaron los datos de monitoreo del programa de Monitoreo de la Calidad del Agua del río Biobío (PMBB), los datos de muestreos registrados fueron solo para el invierno del año 2020 en el mes de agosto. Para el análisis de PMBB se usaron las estaciones de monitoreo correspondientes a las elegidas en la NSCA, que son, para la estación BI-20, se eligió la estación BB1, para la estación BI-30 se eligió la estación BB3, para la estación BI-40 se eligió la estación BB7 y para la estación BI-50 se escogió la estación BB11.

Con los datos obtenidos, mediante el software Microsoft Excel, se calculó la mediana y el promedio de los parámetros respectivos para cada estación de monitoreo. Finalmente se procedió a registrar la información recopilada mediante tablas y gráfico con énfasis en los parámetros DQO, DBO, AOX, Fósforo y Nitrógeno y se comparó la calidad de aguas del río Biobío en los distintos puntos de monitoreo elegidos.

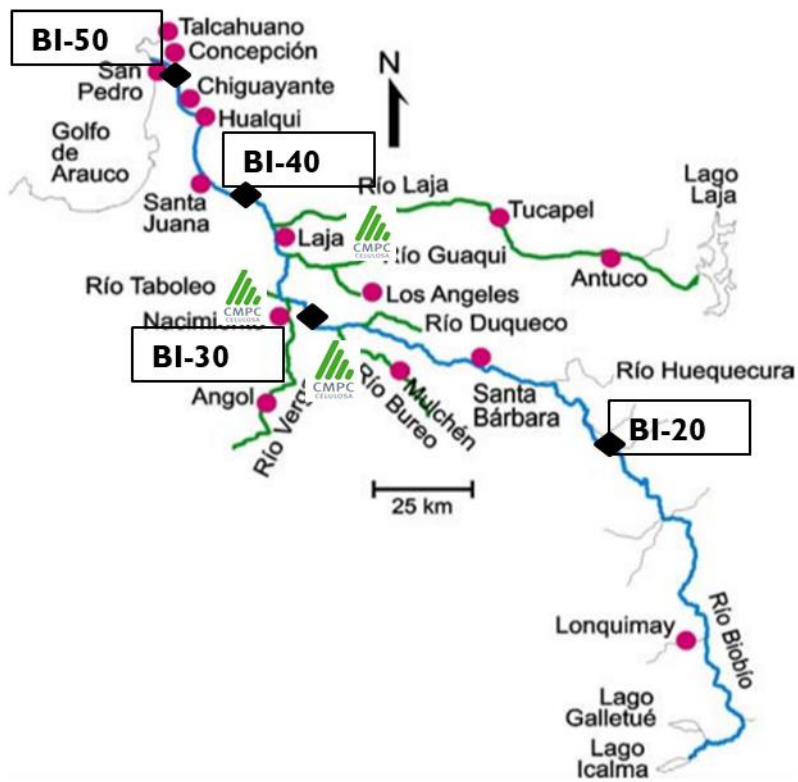


Figura N°14: Estaciones de monitoreo elegidas a lo largo del río Biobío.

Fuente: Elaboración propia.

5.3 Objetivo específico 3: Realizar un análisis comparativo de la normativa de descarga de efluentes a los sistemas acuáticos de la Industria de Celulosa

Se estudió la normativa ambiental vigente que regula a las plantas de celulosa de Chile y se comparó con la normativa aplicada en países desarrollados con alta experiencia en plantas de celulosa y su manejo con el medio ambiente, como Suecia, Canadá y Estados Unidos. Se recopiló información por medio de buscadores web como Google académico, además de las páginas oficiales de legislación para cada país, redactando lo más importante en cuanto a sus instituciones, permisos, formas de control de descarga para plantas de celulosa y límites de descarga. Finalmente, ya teniendo la información recopilada y ordenada se procedió a la

comparación de las instituciones y leyes encargadas de vigilar la descarga de efluentes de plantas de celulosa Kraft, límites permisibles de descarga de efluentes y se sintetizó la información mediante tablas comparativas.

5.4 Objetivo específico 4: Describir el estado del arte de las mejores tecnologías disponibles asociadas a la generación de efluentes líquidos en la Industria de Celulosa.

Se realizó una búsqueda exhaustiva sobre el estado del arte del proceso productivo de celulosa Kraft blanqueada con énfasis en las tecnologías para una disminución de la carga contaminante en el efluente de descarga, esta búsqueda se realizó en bases de datos tales como science direct, web of science, springer link, Google académico y literatura especializada, para esto se utilizaron palabras clave como cellulose, best available technology, environmental innovation, etc. A continuación, en la tabla N°12 se presenta la bibliografía usada principalmente para la investigación del estado del arte de las mejores tecnologías disponibles asociadas a la producción de celulosa y que tienen relevancia en la generación de efluentes líquidos:

Tabla N°12: Bibliografía analizada para el estudio del estado del arte de tecnologías para descarga de efluentes.

N°	Título de publicación	Autor	Unidad de análisis	Año	Revista	Base de datos
1	Technological Transformation in the Global Pulp and Paper Industry 1800–2018, World Forests	Särkkä, T., Gutiérrez-Poch, M & Kuhlberg, M	Libro	2018	World forest	Springer
2	Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry	Bajpai, P	Libro	2015	Springer International Publishing	Springer

3	Environmentally Friendly Production of Pulp and Paper	Bajpai, P	Libro	2010	John Wiley & Sons, Inc	-
4	Best available techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. JRC science and policy reports	Suhr, M	Informe	2015	JRC science and policy reports	-
5	Pulp and Paper Industry – Energy Conservation	Bajpai, P	Libro	2016	Elsevier	Scribd
6	Bleaching of chemithermomechanical pulp (CTMP) using environmentally friendly chemicals	Tutus, A & Usta, M	Artículo Científico	2004	Journal of Environmental Biology	Researchgate

Fuente: Elaboración propia.

En base a la información encontrada se explicó de forma detallada como funciona cada una de estas tecnologías y como éstas ayudan a la disminución de contaminantes en la descarga de efluentes de las plantas de celulosa. Finalmente se procedió a resumir la información mediante tablas explicativas y comparativas entre la tecnología existente en las tres plantas de celulosa estudiadas y la mejor tecnología disponible, en cuanto a la generación de efluentes líquidos en plantas de celulosa.

Con los objetivos específicos 1,2,3 y 4 esto es, la información sintetizada de las plantas de celulosa en la cuenca del río Biobío, el análisis de calidad de agua a lo largo del río Biobío, la normativa aplicada en Chile en cuanto a descarga de efluentes, comparada con la normativa internacional y también el estado del arte de las tecnologías asociadas a la generación de efluentes líquidos, se pudo realizar el análisis de las brechas normativas y tecnológicas el cual es el objetivo general de este estudio. Se procedió a asociar la información obtenida relacionando los puntos fuertes y débiles de la normativa que se aplica en las plantas de celulosa en la cuenca del río Biobío con respecto a sus impactos en el medio ambiente, se

analizaron las distintas normativas estudiadas y la diferencia entre la tecnología aplicada en las empresas de Celulosa CMPC con el estado del arte, de las tecnologías en plantas de celulosa en cuanto a generación de efluentes. De esta forma se obtuvo el estado actual de las empresas de celulosa en cuanto al referente de mejor tecnología disponible (MTD) y se dio una serie de recomendaciones de cómo esta podría mejorar para tener un impacto menor en las descargas de efluentes y calidad de agua del río Biobío.



6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados para el objetivo específico 1: Sintetizar información disponible de las plantas de Celulosa Kraft en la cuenca del río Biobío con énfasis en sus efluentes líquidos.

Dentro de la información importante que se debe tener en cuenta al analizar los efluentes líquidos de las plantas de celulosa esta la evolución de éstas, siguiendo su data histórica y desarrollo tecnológico hasta lo que son actualmente. A continuación, se presenta información general de la empresa CMPC celulosa en la cuenca del río Biobío.

6.1.1 Planta CMPC Laja

Los orígenes de Planta Laja se remontan al año 1951, cuando empresas CMPC decide construir una planta de celulosa en Chile, en ese entonces Laja tenía una población de 2.500 habitantes y una vida de carácter rural (CMPC, 2019). Ya obtenidos los recursos Planta CMPC Laja es inaugurada el 29 de agosto de 1959 por el expresidente Jorge Alessandri Rodríguez. La operación de Planta Laja trajo consigo el desarrollo general de la ciudad con la incorporación de trabajadores y construyendo poblaciones, Laja fue la ciudad con mayor crecimiento demográfico de Latinoamérica en el año 1965 (Latribuna, 2015).

6.1.2 Desarrollo tecnológico en Planta Laja

Desde la implementación de Planta Laja, ha tenido múltiples cambios a las tecnologías utilizadas en su proceso productivo, en sus primeros años de operación, Planta CMPC Laja no contaba con tratamiento secundario de efluentes y el proceso de blanqueado de pulpa era en base a cloro elemental, el cual era obtenido mediante celdas de mercurio (Jara, 2007; SEIA, 2004). Desde comienzos de los años 90, Planta Laja, moderniza las instalaciones de su proceso productivo con tecnología más amigable con el medio ambiente, añade un sistema de tratamiento de efluentes, sistema de deslignificación con oxígeno, aumenta capacidad del digestor continuo y agrega un área de disposición para residuos sólidos. A partir de 1994 con la promulgación de Ley N° 19.300 (Bases generales del medio ambiente)

sumado con la suscripción de empresas CMPC en el acuerdo de producción limpia del país en el año 1999 (Anexo N°4) y exigencias en los mercados internacionales, la industria comienza a implementar nueva tecnología en su proceso productivo con el objetivo de mejorar la eficiencia y minimizar los impactos ambientales aplicando el concepto de sustentabilidad (Ruiz, 2008). Es así como en el año 2003 ingresa al SEIA el proyecto de costo 120 millones de dólares llamado “Optimización planta Laja”- PROFAL IV, el cual la COREMA región del Biobío lo califico como favorable mediante la RCA N°56/2004. Este proyecto consistía en diversas modificaciones al proceso productivo destinadas a incrementar la producción a 439.000 toneladas anuales y mejorar el desempeño ambiental. Para el proyecto PROFAL IV, se implementó una planta de deslignificación con oxígeno y se mejoró el sistema de tratamientos de efluentes agregando un reactor biológico de lecho móvil (MBBR), una torre de enfriamiento, clarificador (DAF), prensa de lodos y laguna de regulación (RCA N°056, 2004). Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto surgieron nuevas exigencias ambientales de distintas entidades y presiones internacionales por lo que, en el año 2009 el proyecto debió ser modificado por el megaproyecto de 400 millones de dólares llamado, “Modernización planta Laja” mediante la RCA 203/2009, el que se basó en la mejora en la gestión ambiental de Planta Laja bajo mecanismos de desarrollo limpio del protocolo kyoto (Anexo N°5), con el objetivo de convertir a Planta Laja en una planta con estándares modernos del punto de vista ambiental (SEIA, 2004). En este proyecto se implementó un nuevo sistema de descortezado en seco, un nuevo sistema de clasificación de astillas, cierre de digestores Batch y aumento de capacidad de digestor continuo, sistema de reprocesamiento de nudos, sistema de recuperador derrames, aumento de capacidad en planta de evaporadores para así evaporar derrames recuperados, nueva planta de blanqueo con mayor capacidad, nueva caldera recuperadora con baja emisión de olor y precipitador electrostático de alta eficiencia y se modificó la planta de tratamientos secundario agregando un estanque de aireación con lodos

activados y un clarificador secundario (RCA N°203, 2009). Planta Laja también ha adquirido las certificaciones ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001 (CMPC, 2021).

6.1.3 Análisis de evolución de concentraciones en efluente de descarga Planta Laja

La renovación de las tecnologías del proceso productivo de planta Laja han sido muy beneficiosas en cuanto a el potencial efecto hacia los ecosistemas por contaminantes de efluentes de descarga, sin embargo, no ha sido un proceso relativamente rápido, teniendo en cuenta que Planta Laja pasó 30 años sin tener un sistema de tratamiento secundario siendo recién implementado a principios de los años 90. Antes de la implementación del proyecto Modernización planta Laja en 2009, existían múltiples equipos que estaban ahí desde su implementación, como evaporadores, digestores, bombas, los cuales debido a su tecnología debían ser detenidos y revisados constantemente por el peligro de producir derrames, no existía sistema para control de derrames, además de una mala segregación de condensados lo cual afectaba al efluente (RCA N°203, 2009). Se ha demostrado que Planta CMPC Laja mediante la mejora tecnológica de sus procesos y una implementación de un sistema de gestión ambiental han podido disminuir notablemente las concentraciones de contaminantes en el efluente como se ve en la Tabla N°13 donde a medida que se implementan los nuevos sistemas las concentraciones han disminuido notablemente, como después de PROFAL IV y después de Modernización Planta Laja en los cuales se aprecia una notable disminución en la concentración de parámetros desde los inicios de la planta hasta la planta actual.

Tabla N°13: Comparación de concentraciones promedio de parámetros en el efluente de descarga en Planta Laja

Parámetro	Unidad	Antes de PROFAL IV (Año 2004)	Antes de Modernización Planta Laja (Año 2007)	Actual (Promedio año 2020)	Limite D.S.90/2001
AOX	mg/l	9,5	4,7	-	-
Color Aparente	Pt-Co	1.436	800	-	-
DBO5	mg O2/l	192	47	22,8	300

DQO	mg O ₂ /l	898	510	-	-
Fósforo Total	mg/l	0,52-2,8	1,5	1,08	15
Nitrógeno Total	mg/l	0,4 – 7,8	5	3,47	75
pH		6,71	6,0-8,5	7,0	6,0-8,5
Fenoles	mg/l	1,0	-	0,01	1
Pentaclorofenol	mg/l	0,008	-	<0,00006	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	80	50	32,5	300
Temperatura	°C	40,03	40	35,6	<40
Caudal	m ³ /día	92.000	72.000	69.984	-

Fuente: Elaboración propia por datos obtenidos por página web de SMA y SEIA.

En la siguiente tabla (Tabla N°14) se muestra la comparación de cargas contaminante emitida al río Biobío, para la realización de esta tabla se usó el caudal respectivo y se asumió una producción de celulosa anual de máxima capacidad para cada proyecto por 350 días al año.

Tabla N°14: Comparación de carga contaminante emitida al río Biobío en Planta Laja.

Parámetro	Unidad	Antes de PROFAL IV (Año 2004)	Antes de Modernización Planta Laja (Año 2007)	Actual (Promedio año 2020)
AOX	Kg/ADt	0,87	0,51	-
DBO5	Kg/ADt	17,7	2,71	1,11
DQO	Kg/ADt	82,6	29,26	-
Fósforo Total	Kg/ADt	0,05 – 0,35	0,15	0,048
Nitrógeno Total	Kg/ADt	0,04 – 0,72	0,12	0,16
Fenoles	Kg/ADt	0,09	0,048	0,0005
Pentaclorofenol	Kg/ADt	0,0007	0,00039	0,000003
Sólidos Suspendidos Totales	Kg/ADt	7,4	2,87	1,58
Caudal	m ³ /día	92.000	72.000	69.984
Producción promedio diaria	ADt/día	1.000	1.254	1.429

Fuente: Elaboración propia por datos obtenidos por página web de SNIFA y SEA.

6.1.4 Normativa aplicable a CMPC Planta Laja

La normativa aplicable para la planta CMPC Laja para la generación de riles es:

- Norma de emisión Tabla 2 del D.S 90/2001: Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

- RCA 056/2004: Proyecto de optimización Planta Laja - PROFAL IV.
- RCA 203/2009: Modernización de Planta Laja.

6.1.5 Planta CMPC Santa Fe

La Planta Santa Fe, propiedad de CMPC Celulosa S. A., ubicada en la comuna de Nacimiento, Provincia de Biobío, en la VIII Región, a unos 105 km al sureste de Concepción, es una fábrica que produce celulosa blanqueada de madera de eucalipto ECF Kraft (BEKP) cuya materia prima principal es eucalipto de las variedades glóbulus y nitens (Henríquez, 2013). La planta Santa Fe fue construida entre los años 1989 - 1991 e inició sus operaciones el 23 de mayo de 1991. En el año 1997 fue adquirida por CMPC Celulosa S.A. Con la Línea 1 llegó a producir hasta 360 ton/año de celulosa y en el año 2006 se sumó la línea 2, cuya capacidad de producción es de 1.150.000 ton/año, alcanzando una producción total de 1.550.000 ton/año (SEIA, 2009).

6.1.6 Desarrollo tecnológico CMPC Santa fe en cuanto a descarga de efluentes

Desde los inicios de Planta CMPC Santa fe, la planta contaba con tecnología de blanqueo sin cloro elemental, sin embargo, la planta de blanqueo ECF era usada para el 50% de la producción total de este tiempo que era de 360.000 ton/año, mientras que el otro 50% era producido por tecnología de blanqueo estándar la cual utiliza dióxido de cloro y cloro elemental (70% cloro y 30% dióxido de cloro) y la generación de Compuestos Organoclorados Halogenados (AOX) al medio ambiente era de 311 ton/año (RCA N°066, 2004). Además, la planta solo contaba con sistema de tratamiento primario, el cual consistía en los procesos de neutralización y clarificación, antes de descargar el efluente en el río por lo que como se puede ver en la tabla N°14, las concentraciones en el efluente podían generar un gran impacto en el ecosistema. En el año 2004 con la aprobación del estudio de impacto ambiental del proyecto “Ampliación Planta Santa fe” mediante la RCA 066/2004, la Planta Santa Fe tuvo una enorme mejora en términos de tecnologías de proceso y

gestión ambiental. Este proyecto construye una nueva línea de fibras (Santa Fe 2), y mejora la tecnología empleada en la planta existente (Santa Fe 1), añadiendo tecnología orientada a la disminución de emisiones como: cocción extendida y deslignificación con oxígeno, las cuales reducen la cantidad de lignina residual en la pulpa (Número Kappa) y así se produce un menor uso de reagentes en la planta de blanqueo, además de adquirir tecnología de blanqueo ECF para el 100% de la producción de pulpa, lo que significa una menor cantidad de químicos de blanqueo y una menor generación de productos organoclorados. Este proyecto cuenta con un sistema de tratamiento secundario por lodos activados, sumado al sistema primario existente, de esta forma Planta Fe logra bajar la concentración de sus contaminantes en más de un 50% para los parámetros AOX, DQO y DBO, cumpliendo con los límites de descarga de la norma exigidos por la norma D.S 90/2001 (SEIA, 2004). Luego para el año 2009 CMPC Santa Fe en busca de una mejor eficiencia energética implementa el proyecto “Eficiencia Energética con Incremento de Generación Eléctrica en Planta Santa Fe” aprobado mediante una Declaración de Impacto Ambiental mediante la RCA 285/2009 donde se instala una nueva caldera de biomasa con capacidad de vapor y un nuevo turbogenerador teniendo una capacidad de 1020 ton/h de vapor y 220MW de potencia (SEIA, 2009). Para el año siguiente en el 2010 CMPC Santa Fe con el proyecto “Optimización Operacional de Planta Santa Fe” aprobado mediante la RCA 39/2010, modifica las tecnologías existentes aumenta la capacidad de producción de Santa Fe línea 2 a 1.150.000 toneladas produciendo un total de 1.550.000 toneladas de celulosa al año (RCA N°039, 2010). Esta planta cuenta con las certificaciones ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001 (CMPC, 2021).

6.1.7 Análisis de evolución de concentraciones en efluente de descarga Planta Santa Fe

Las innovaciones en el ámbito tecnológico de la planta CMPC Santa Fe son notorias, al comparar las concentraciones de los efluentes en los primeros años de operación a los últimos años en la Tabla N°15 se ve una disminución constante de

la concentración de los contaminantes. En los años previos al proyecto Ampliación Santa Fe en donde aún se utilizaba cloro elemental como método de blanqueo sumado con que no hay registros de un tratamiento secundario, se puede apreciar notoriamente la diferencia de concentración del parámetro AOX entre las tecnologías en de blanqueo STD y ECF. Con el proyecto Ampliación Santa Fe y la nueva tecnología incorporada como el sistema de tratamiento secundario con tecnología de lodos activados se puede ver como los parámetros de carga orgánica DQO y DBO disminuyen notablemente, mientras que en el efluente luego de haber pasado por proyectos de aumento de producción se observa un pequeño aumento en los niveles de carga orgánica, pero sin mayores variaciones. Es importante señalar que incluso en los primeros años de operación de la planta sin contar con tecnología avanzada para el control de contaminantes en el efluente de descarga, estos parámetros en promedio no superaban los límites establecidos por el D.S. 90/2001.

Además, CMPC Santa Fe por medio de las RCA 066/2004, RCA 285/2009 y RCA 039/2010, se le exige un plan de cumplimiento de seguimiento ambiental para el monitoreo de parámetros de sólidos suspendidos totales, DBO5, caudal, pH, y temperatura (Anexo N°6).

Tabla N°15: Comparación de concentraciones promedios de parámetros en el efluente de descarga en planta Santa Fe.

Parámetro	Unidad	Antes de "Ampliación Santa Fe" (2003)		Después de proyecto "Ampliación Santa Fe"	Actual	Limite D.S.90/2001
		Modo STD	Modo ECF			
AOX	mg/l	25,8	4,5	4,5	3,6	-
Color Aparente	Pt-Co	1.321	1.395	725	580	-
DBO5	mg O2/l	204	207	14	25	300
DQO	mg O2/l	554	571	275	350	-
Fósforo Total	mg/l	4,1	3,15	2	3	15
Nitrógeno Total	mg/l	2,44	2,32	6	6	75
pH		6,9	7,2	6,0 – 8,5	6,0 – 8,5	6,0-8,5
Fenoles	mg/l	0,206	0,188	< 0,5	< 0,5	1

Pentaclorofenol	mg/l	0,00068	0,00002	< 0,00005	< 0,00005	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	98	96	50	40	300
Temperatura	°C	35	32,5	< 40	<40	<40
Caudal	m ³ /día	63.000	63.000	120.000	139.524	-

Fuente: Elaboración propia por datos obtenidos por página web de SMA y SEIA.

En la siguiente tabla (Tabla N°16) se muestra la comparación de cargas contaminante de Planta Santa Fe emitida al río Biobío. Para la realización de esta tabla se usó el caudal respectivo de cada periodo y se asumió una producción de celulosa anual de máxima capacidad para cada proyecto por 350 días al año.

Tabla N°16: Comparación de carga contaminante emitida al río Biobío en Planta Santa Fe.

Parámetro	Unidad	Antes de "Ampliación Santa Fe" (2003)		Después de proyecto "Ampliación Santa Fe"	Actual
		Modo STD	Modo ECF		
AOX	Kg/ADt	1,57	0,27	0,16	0,117
DBO5	Kg/ADt	12,5	12,68	0,51	0,81
DQO	Kg/ADt	33,9	34,99	10,13	11,40
Fósforo Total	Kg/ADt	0,24	0,18	0,073	0,095
Nitrógeno Total	Kg/ADt	0,15	0,14	0,22	0,19
Fenoles	Kg/ADt	0,012	0,012	<0,018	0,032
Pentaclorofenol	Kg/ADt	0,000042	0,00003	<0,000002	0,00032
Sólidos Suspendidos Totales	Kg/ADt	6,00	5,88	1,84	1,3
Caudal	m ³ /día	63.000	63.000	120.000	139.524
Producción promedio diaria	ADt/día	1.028	1.028	3.257	4.285

Fuente: Elaboración propia por datos obtenidos por página web de SNIFA y SEA.

6.1.8 Normativa aplicable a Planta CMPC Santa Fe

La normativa aplicable para la planta de celulosa CMPC Santa Fe para la generación de riles es:

- Norma de emisión D.S 90/2001: Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

- RCA 2719/2005: Optimización operacional de Planta Pacifico Mininco.
- RCA 1576/2008: PROAMP.
- RCA 92/2001: Optimización Planta Pacifico PROPAC.

6.1.9 Planta CMPC Pacífico

La Planta Pacífico de celulosa Kraft se encuentra equipada para producir pulpa de fibra larga blanqueada. Esta Planta Industrial está ubicada a 600 km sur de Santiago en la IX Región, en la Comuna de Angol. Inició sus operaciones en el año 1992, produce celulosa Kraft blanca, tanto de fibra larga, de pino radiata, como de fibra corta, de eucalipto. Ambas son elaboradas, exclusivamente, a partir de madera proveniente de bosques cultivados, lo cual garantiza una pulpa con propiedades físicas y mecánicas consistentes y estables (Arancibia, 2018). Su capacidad de producción es de 500 mil toneladas de Celulosa Kraft Blanqueada de Fibra Larga (BSKP), emplea un total de 261 trabajadores. Esa planta tiene las certificaciones ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001 (CMPC, 2021).

6.1.10 Desarrollo tecnológico Planta Pacífico en cuanto descarga de efluentes

Planta Pacífico, inicia sus operaciones en el año 1992, teniendo una tecnología más avanzada que las otras dos plantas. Esta ya contaba con sistema primario y secundario para tratamiento de efluentes, lagunas de emergencia para derrames y una planta de blanqueo, donde solo parte de la celulosa producida en estos años (371 ADt/año) correspondía a celulosa blanqueada con tecnología ECF mientras que el resto era producido con tecnología en base a cloro elemental y dióxido de cloro (70% cloro elemental y 30% dióxido de cloro) STD (SEIA, 2001). En el año 2001 Planta Pacífico lleva a cabo su primer proyecto de desarrollo tecnológico con el proyecto “Optimización Planta Pacífico PROPAC”, aprobado por un estudio de impacto ambiental mediante la RCA N°92/2001 en donde se lleva a cabo una gran renovación de equipos, se construye un vertedero industrial controlado y se modifica el impregnador y digestor para una mayor producción de celulosa produciendo a

470.000 ADt/año, además, se le agrega un nuevo reactor al sistema de deslignificación con oxígeno y disminuye la producción de celulosa estándar a un 23% con 108.100 ADt/año (RCA N°092, 2001). En el año 2005 Planta Pacífico lleva a cabo el proyecto “Optimización operacional de Planta Pacífico, Mininco” aprobada por la RCA 2719/2005 en el cual aumenta su capacidad de producción en 520.000 ADt/año, lo que provoca que la capacidad de la planta de tratamiento disminuya aproximadamente en un 10%, aumentando la concentración de materia orgánica en el efluente final. Sin embargo, esto es remediado en el año 2010 con el Proyecto “PROAMP” el cual por una declaración de impacto ambiental es aprobado mediante la RCA N° 1576/2008, la que modifica el sistema de tratamiento secundario existente desde los inicios de la planta (1992), el cual contaba con una laguna de aireación seguido con una zona de decantación (RCA N°2719, 2005). Este sistema es reemplazado por un nuevo sistema de tratamiento por biofilm, seguido por lodos activados con clarificador secundario, se modifica el sistema de aguas lluvia, agregando una laguna de aguas lluvia y una laguna de regulación, de esta forma planta Pacífico por medio de la implementación de tecnologías más moderna, logra responder a las necesidades medioambientales, estabilizando planta de tratamiento de aguas y reduciendo las variaciones de concentraciones de los distintos parámetros en el efluente (RCA N°1576, 2008).

6.1.11 Análisis de evolución de concentraciones en efluente de descarga Planta Pacífico

Tras analizar la tabla N°17 se observa que Planta CMPC Pacífico ha logrado un gran avance en lo que respecta en temas ambientales, desde sus inicios mostraba una preocupación por la contaminación de descarga de efluentes, contando con un tratamiento secundario de lagunas aireadas, para su primer proyecto de modernización en el año 2001, si bien adquiere tecnología que debido a sus características disminuye las concentraciones de AOX en el efluente, además de disminuir la producción de celulosa estándar STD(70% cloro elemental y 30% dióxido de cloro) a un 33%, el proyecto se enfoca en un aumento de producción de

casi 100.000 ADt/año por lo que las concentraciones en el efluente de descarga aumentan. En los años siguientes la concentración de contaminantes en el efluente no tuvo mayor disminución, al someter a la planta a solo proyectos de eficiencia energética y aumento de producción, el cual debido a esto la concentración de carga orgánica en el efluente también tiene un aumento. En año 2008 cuando Planta CMPC Pacífico moderniza la tecnología en tratamiento de aguas donde, en general, se ve una disminución de concentración de todos los parámetros de forma general. Si bien, se han hecho variadas modificaciones al proceso productivo con tal de una mejora en el tema medio ambiental es importante señalar que incluso desde su implementación Planta Pacífico no superaba los límites exigidos por la norma de emisión D.S 90/2001.

Otro aspecto importante sobre los efluentes de Planta Pacífico es que para la aprobación de los proyectos se les ha exigido cumplir un Plan de Seguimiento Ambiental, para los cuales esta planta debe cumplir con las exigencias establecidas en la RCA 092/2001, la RCA 2719/2005 y en la R.E 0741/2013. El Plan de Seguimiento Ambiental consiste en un seguimiento de indicadores físicos, químicos y bacteriológicos de las aguas residuales generadas por la planta (Anexo N°7) (RCA N°1576, 2008).

Tabla N°17: Caracterización de parámetros de efluente de descarga en Planta Pacífico.

Parámetro	Unidad	Antes de proyecto PROPAC (Año 2000)	Antes de proyecto "PROAMP" (Año 2008)	Efluente actual (Año 2020)	Limite D.S.90
AOX	mg/L	7,44	8,5	4,3	-
Color Aparente	Pt-Co	-	942	948,67	-
DBO5	mg O2/l	28	45	15,1	300
DQO	mg O2/l	-	676	541,5	-
Fósforo Total	mg/l	-	2,71	1,33	15
Nitrógeno Total	mg/l	-	8	2,5	75
pH		7-8	7,5-8,5	7,35	6,0-8,5
Fenoles	mg/l	-	<0,15	<0,006	1
Pentaclorofenol	mg/l	-	<0,005	<0,00006	0,01

Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	80	140	16	300
Temperatura	°C	26	25	33,2	<40
Caudal	m³/día	50.526	47.808	52.704	-

Fuente: Elaboración propia por datos obtenidos por página web de SMA y SEIA.

En la siguiente tabla (Tabla N°18) se muestra la comparación de cargas contaminante de Planta Pacífico emitida al río Biobío, para la realización de esta tabla se usó el caudal respectivo de cada periodo y se asumió una producción de celulosa anual de máxima capacidad para cada proyecto por 350 días al año.

Tabla N°18: Comparación de carga contaminante emitida al río Biobío en Planta Pacífico.

Parámetro	Unidad	Antes de proyecto PROPAC (Año 2000)	Antes de proyecto "PROAMP" (Año 2008)	Efluente actual (Año 2020)
AOX	Kg/ADt	0,34	0,3	0,15
DBO5	Kg/ADt	1,33	1,60	0,53
DQO	Kg/ADt	-	24,08	19,21
Fósforo Total	Kg/ADt	-	0,096	0,047
Nitrógeno Total	Kg/ADt	-	0,28	0,088
Fenoles	Kg/ADt	0,33 – 0,37	<0,018	0,000213
Pentaclorofenol	Kg/ADt	-	<0,00017	0,000002
Sólidos Suspendidos Totales	Kg/ADt	3,81	4,98	0,56
Caudal	m³/día	50.526	47.808	52.704
Producción promedio diaria	ADt/día	1.060	1.342	1.485

Fuente: Elaboración propia por datos obtenidos por página web de SMA y SEIA.

6.1.12 Normativa aplicable a Planta CMPC Pacífico

La normativa aplicable para la planta de celulosa CMPC Pacífico es:

- **Norma de emisión D.S 90/2001:** Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.
- **RCA 2719/2005:** Optimización operacional de planta Pacífico Mininco.
- **RCA 1576/2008:** PROAMP.

- **RCA 92/2001:** Optimización Planta Pacífico PROPAC.

A continuación, en la tabla N°19, se presenta una tabla con la tecnología actual de las tres plantas CMPC en la cuenca del río Biobío y en la tabla N°20 se presenta una comparación de carga contaminante de descarga de las plantas.

Tabla N°19: Tecnologías empresas CMPC en la cuenca del río Biobío desde río arriba hacia abajo.

Fase	CMPC Pacífico	CMPC Santa Fe línea 1	CMPC Santa Fe línea 2	CMPC Laja
Preparación de la madera	-Línea de descortezado y astillado	-Línea de descortezado y astillado	-Dos líneas de descortezado paralelas E. globulus y para E. nitens -Dos líneas de astillado	-Línea de descortezado en seco y astillado
Cocción y deslignificación	-Digestor Continuo con cocción extendida -Deslignificación con oxígeno con doble reactor.	-Digestor continuo con cocción extendida (400.000 ADt/año). -Sistema de lavado y clasificación de pasta cruda. - Deslignificación con oxígeno de doble reactor y con etapa de lavado en filtro presurizado.	-Digestor continuo con cocción extendida (1.150.000 ADt/año) -Lavado y clasificación de pasta cruda con tabor de desplazamiento de multi etapa. -Estanques de almacenamiento. -Planta de deslignificación con oxígeno de doble reactor	-Digestor continuo (1.550 ton/día). Sistema de lavado y clasificación de fibra. Deslignificación con oxígeno con reactor doble Sistema reprocesamiento de nudos.
Blanqueo	-Blanqueo ECF -4 Torres de blanqueo -Etapa de dióxido de cloro(D0) -Etapa de extracción alcalina reforzada con peróxido de hidrogeno y oxigeno (EOP). -Etapa de dióxido de cloro(D1) -Etapa de dióxido de cloro(D2)	-Blanqueo ECF -4 Torres de blanqueo -Etapa de dióxido de cloro(D0) -Etapa de extracción alcalina reforzada con peróxido de hidrogeno y oxigeno (EOP). -Etapa de dióxido de cloro(D1) -Etapa de dióxido de cloro(D2)	-Blanqueo ECF -4 torres de blanqueo con filtro de lavado. -Etapa de dióxido de cloro(D0) -Etapa alcalina reforzada con peróxido de hidrogeno y oxigeno (EOP). -Dióxido de cloro (D1) -Dióxido de cloro (D2)	-Blanqueo ECF -4 torres de blanqueo para cada etapa -Dióxido de cloro(D0) -Extracción alcalina reforzada con peróxido de hidrogeno y oxigeno (EOP) Dióxido de Cloro(D1) Dióxido de Cloro(D2)

Circuito de recuperación	-Planta de evaporación y sistema de recuperación de concentrados. -Estanque de licor negro. -Sistema de contención y reprocesamiento de derrames.	-Planta de evaporación -Sistema de contención y reprocesamiento de derrames. -Lavado de condensados, recuperación e incineración de gases no condensables concentrados.	-Planta de evaporación con sistema de tratamiento y recuperación de concentrados. - Sistema de contención de derrames	- Planta de evaporadores con capacidad adicional por recolección de derrames. - Sistema de tratamiento y recuperación de condensados y metanol. - Sistema contención de derrames.
Tratamiento de efluentes*	-Cámara de equalización -Estanque de neutralización -Torre de enfriamiento -Sistema de biofilm de lecho móvil (MBBR) -Lodos activados -Clarificador secundario -Laguna de regulación y de aguas lluvias	- Clarificador primario -Estanque de neutralización. -Torres de enfriamiento (neutralización y clarificación. -Laguna de regulación. -Tratamiento secundario de lodos activados. -Clarificador secundario. -Conducción y difusor de descarga en el río.	- Clarificador primario -Estanque de neutralización. -Torres de enfriamiento (neutralización y clarificación. -Laguna de regulación. -Tratamiento secundario de lodos activados. -Clarificador secundario. -Conducción y difusor de descarga en el río.	- Harnero de barras y clarificador. -Estanque de neutralización -Torre de enfriamiento con reutilización de efluentes. -Reactor biológico de lecho móvil (MBBR) y sistemas y sistema de lodos activados -Clarificador secundario -Clarificador de flotación por aire disuelto (DAF)

*: Para la planta CMPC Santa Fe el sistema de tratamiento de efluentes es común para ambas líneas de producción.

Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida por la página web SEIA y CMPC.

Tabla N°20: Tabla comparación Plantas de celulosa CMPC e en función a la carga contaminante emitida al río Biobío.

Parámetro	Unidad	Año 2004				Año 2008			Año 2020		
		Planta Laja	Planta Santa Fe		Planta** Pacífico	Planta Laja	Planta Santa Fe	Planta Pacífico	Planta Laja	Planta Santa Fe	Planta Pacífico
AOX	Kg/ADt	0,87	1,57	0,27*	0,34	0,51	0,16	0,3	-	0,117	0,15
DBO5	Kg/ADt	17,7	12,5	12,68*	1,33	2,71	0,51	1,60	1,11	0,81	0,025
DQO	Kg/ADt	82,6	33,9	34,99*	-	29,26	10,13	24,08	-	11,40	19,21
Fósforo Total	Kg/ADt	0,05 – 0,35	0,24	0,18*	-	0,15	0,073	0,096	0,048	0,095	0,047
Nitrógeno Total	Kg/ADt	0,04 – 0,72	0,15	0,14*	-	0,12	0,22	0,28	0,16	0,19	0,088

Fenoles	Kg/ADt	0,09	0,012	0,012*	0,33 – 0,37	0,048	0,018	<0,018	0,0005	<0,016	0,000213
Pentaclorofenol	Kg/ADt	0,0007	0,000042	0,00003*	-	0,00039	<0,00002	<0,00017	0,000003	<0,000002	0,000002
Sólidos Suspendidos Totales	Kg/ADt	7,4	6,00	5,88*	3,81	2,87	1,84	4,98	1,58	1,3	0,56
Caudal	m ³ /día	92.000	63.000		50.526	72.000	120.000	47.808	69.984	139.524	52.704
Producción promedio diaria	ADt/día	1.000	1.028		1.060	1.254	3.257	1.342	1.429	4.285	1.485

*: Corresponde a la carga contaminante empleando la tecnología de blanqueo ECF (libre de cloro elemental).

**.: En el caso de Planta Pacífico corresponde a la carga calculada en el año 2000.

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de página web SEIA y SMA.

6.1.13 Análisis evolución de la tecnología en plantas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío y de la carga contaminante.

De forma general las plantas de celulosa CMPC han tenido un gran desarrollo tecnológico a lo largo del tiempo, en sus primeros años de operación, Planta Laja, al igual que planta Santa Fe y Planta Pacífico, usaban tecnología de blanqueo estándar, la cual utilizaba cloro elemental y dióxido de cloro para el blanqueo de la pulpa, lo que pudo haber generado una mayor carga de compuestos organoclorados como se puede apreciar en la tabla N°20 bajo el parámetro de Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX). En el año 2004 planta Pacífico y planta Laja contaban con sistema de blanqueo ECF(sin cloro elemental) mientras que planta Santa Fe contaba con el 50% de la producción en base a esta tecnología y el otro 50% por el método estándar, viéndose reflejado en la diferencia de carga de AOX emitidas: 0,87 kg/ADt para planta Laja, 1,57 kg/ADt para Planta Santa Fe con método STD, 0,27 kg/ADt para Planta Santa Fe con método ECF y 0,34 kg/ADt en Planta Pacífico, lo que demuestra una importante diferencia de carga contaminantes entre los dos métodos de blanqueo que se podría traducir en una posible disminución de sustancias tóxicas. Además, se puede apreciar una diferencia importante entre las plantas de celulosa para la materia orgánica donde planta Laja y Santa Fe generaban una carga de 17,7 y 12, 5 kg/ADt de DBO respectivamente, mientras que planta Pacífico generaba 1,33 kg/ADt, esto se puede explicar con qué

Planta Pacífico para esta fecha ya contaba con un tratamiento secundario de efluentes. Para el año 2008 ya habían sido implementados grandes proyectos de mejora tecnológica, donde las plantas aumentan su producción, así también como implementaron nueva tecnología como digestión extendida, deslignificación con oxígeno, blanqueo ECF para el 100% de la producción y tratamiento secundario de efluentes, lo que se ve reflejado en la disminución de la carga contaminante emitida al río en parámetros como DBO5, AOX, DQO y Sólidos Suspendidos Totales por sobre un 50%. En la actualidad como se observa en la tabla N°19, todas las plantas de celulosa cuentan con moderna tecnología en las distintas etapas del proceso productivo, sumado a las tecnologías mencionadas anteriormente, se implementa un tratamiento secundario moderno con un reactor biológico de lecho móvil (MBBR) sumado con un sistema de lodos activados en las tres plantas, se adquiere un sistema de recuperación de derrames y un sistema de recuperación de condensados. Al comparar la carga contaminante de las tres plantas en el año 2020, se observa que planta Pacífico es la que genera una menor carga contaminante de nutrientes con 0,088 kg/ADt de Nitrógeno Total y 0,047 kg/ADt de Fósforo Total, para los demás parámetros las cargas contaminantes no tienen mayor diferencia donde, en el parámetro DQO planta Pacífico genera la mayor carga con 19,21 kg/ADt, planta Santa Fe 11,40 kg/ADt y planta Laja no registra monitoreo de este parámetro, para la carga contaminante de la DBO se mantiene en un rango de 0,025 kg/ADt para planta Pacífico la cual es el más bajo y 1,11 kg/ADt para planta Laja siendo el más alto. Así de forma general al comparar la carga contaminante antes de la implementación de cada gran proyecto y la carga actual, se puede apreciar la importante disminución de carga contaminante que se ha producido a lo largo del tiempo principalmente, por implementación de nueva tecnológica y la mejora en la gestión de los procesos.

6.2 Resultado para objetivo específico N°2: Analizar mediante la Norma Secundaria de calidad ambiental para la cuenca del río Biobío la calidad de agua con énfasis en los contaminantes característicos de las descargas de plantas de celulosa

Empresas CMPC posee tres plantas de celulosa ubicadas en la cuenca del río Biobío (Tabla N°21), de las cuales descargas sus efluentes tratados en el río en distintas partes a lo largo del río. Para el análisis de la calidad de agua del río Biobío se analizó la calidad de aguas en las áreas BI-10, BI-30, BI-40 Y BI-50. En la figura N°15 y Tabla N°22 se puede identificar las áreas de vigilancia utilizadas y su posición en cuanto a las plantas de celulosa.

Tabla N°21: Información general de empresas CMPC celulosa en la cuenca del Río Biobío.

Empresa	Superficie (ha)	Provincia	Comuna	Caudal efluente de descarga	Norma/Tabla a cumplir	Punto de descarga
CMPC Laja	92	Biobío	Laja	70.000 m ³ /día	DS.90/00-Tabla 2	Río Biobío
CMPC Santa Fe	130	Biobío	Nacimiento	120.000 m ³ /día	DS.90/00-Tabla 2	Río Biobío
CMPC Pacífico	218.1	Malleco	Collipulli	52.894 m ³ /día	DS.90/00-Tabla 2	Río Biobío

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de SEA.

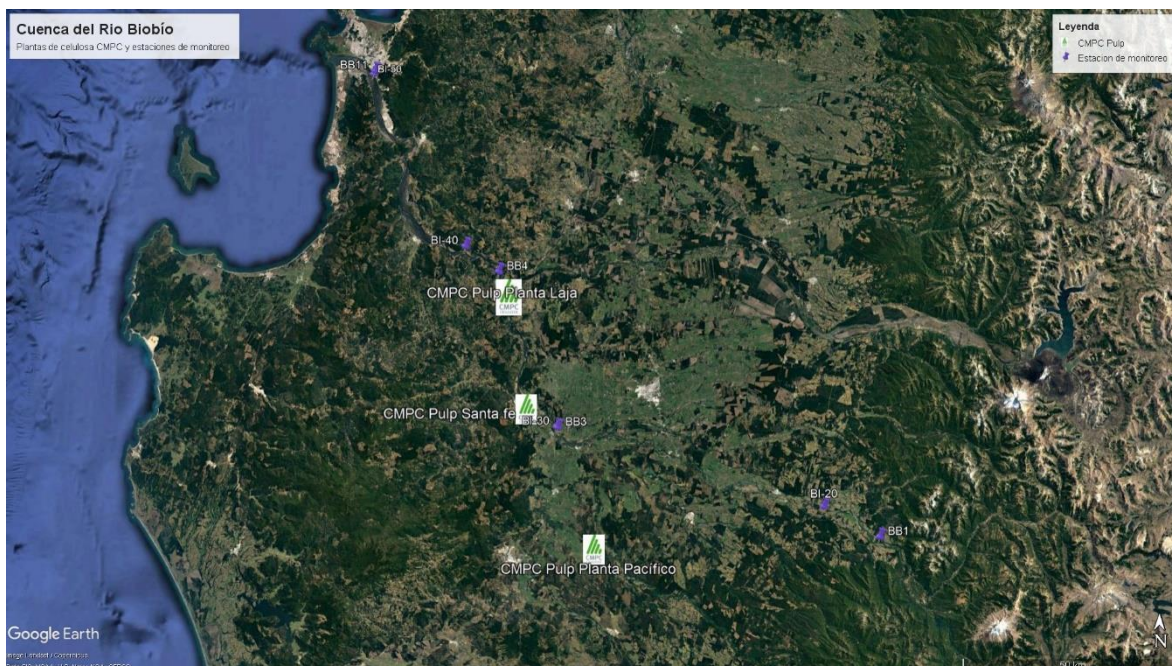


Figura N°15: Cuenca del río Biobío, con las plantas de celulosa CMPC y los puntos de monitoreo utilizados.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

Tabla N°22: Ubicación de los puntos de medición, expresados en sistemas de coordenadas UTM, datum WGS84, huso correspondiente y código BNA asociado.

Áreas de vigilancia asociada	Estaciones	Coordenadas wgs84, Huso 19H		Código BNA	Caudal medio (m3/s)	Caudal máximo (m3/s)	Caudal mínimo (m3/s)
		Norte	Este				
BI-20	Río Biobío en Rucalhue	5769032	29898494	08307001-3	298,02	688,06	74,41
BI-30	Río Biobío en Coigüe	5840275	713347	08334001-8	424,16	1031,74	103,26
BI-40	Río Biobío ante junta río Gomero	5880483	693295	08390000-8	-	-	-
BI-50	Río Biobío en Planta la Mochita	5920372	673340	083394005-0	577,70	1825,80	135,90

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de D.S N°9/2015 y MMA.

Los datos obtenidos corresponden a las mediciones en las estaciones de invierno donde el río tiene su pick de caudal y en verano donde el caudal del río se ve

disminuido, los parámetros de la NSCA analizados se pueden ver en la Tabla N°23 y en la Tabla N°24 se pueden ver los parámetros que por distintos motivos no fueron medidos para cada estación y año.

Tabla N°23: Parámetros medidos para el cumplimiento de DS N°9/2015

Parámetros	
1. Fisicoquímicos	Conductividad específica, pH, Oxígeno disuelto
2. Nutrientes	N-NO3, N-NO2, P-PO4, Fósforo total, Nitrógeno total y N-NH4
3. Macroelementos	Cloruro, Sulfato
4. Metales	Aluminio total, Hierro total
5. Parámetros biológicos	DQO, DBO5, Coliformes fecales
6. Otros parámetros	Índice de fenol (compuestos fenólicos), sólidos suspendidos totales

Fuente: elaboración propia a partir de D.S N°9/2015, MMA.

Tabla N°24: Estaciones sin monitoreo por parámetros.

Estación	Parámetro	Invierno 2016	Verano 2017	Invierno 2017	Verano 2018	Invierno 2018	Verano 2019	Invierno 2019	Invierno 2020
BI-20	pH	x	x						
	Conductividad	x	x						
	Oxígeno disuelto	x	x						
	Compuestos orgánicos halogenados	x	x	x	x	x	x	x	x
	Cloruro						x		
	Fósforo total						x		
	Ortofosfato						x		
	Sulfato						x		
BI-30	pH	x							
	Conductividad	x							
	Oxígeno Disuelto	x							
	Compuestos orgánicos halogenados	x	x	x	x	x	x	x	x
BI-40	Compuestos orgánicos halogenados	x	x	x	x	x	x	x	x
BI-50	Compuestos orgánicos halogenados	x	x	x	x	x	x	x	x

Las x señalan los parámetros que no fueron medidos en la estación del año.

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de SMA.

De acuerdo con lo observado en la tabla N°24, correspondiente a las frecuencias de los muestreos realizados en las 14 áreas de vigilancia de la cuenca del Río Biobío, se logra inferir lo siguiente:

- El periodo de análisis del presente informe considera como inicio de muestreo el periodo estacional de otoño 2016 y su término en invierno del 2020, debido a la pandemia, los laboratorios se encontraban cerrados y no se recopilaban datos para el verano del 2020.
- Se observa cumplimiento, a lo menos en 1 muestreo por periodo estacional, en los parámetros Coliformes Fecales, DBO₅, DQO, Aluminio total, Cloruro, Hierro Total, Índice de Fenol, Amonio, Nitrato, Nitrito, Nitrógeno Total, Fósforo Total, Ortofosfato, Sólidos Suspendidos Totales y Sulfatos.
- Respecto a los compuestos orgánicos halogenados (AOX), en los datos recopilados la concentración no superó al límite de detección señalado en la norma (<0,01mg/ L) por lo que no se mostraban muestreos asociados.

A continuación, en las tablas 25, 26,27,28 y 29 se muestran los resultados obtenidos a partir de la información recopilada para las distintas estaciones de muestreo que se encuentran en los anexos N°2,3 ,4 Y 5.

Tabla N°25: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-20.

Parámetro	Unidad	Promedio Invierno	Mediana Invierno	Promedio Verano	Mediana Verano	Limite Norma	Percentil 85-15
pH	Unidad	7,85	7,6	8,23	8,3	6,5-8,5	8,4
Conductividad	uS/cm	61,8	61	87	87	90	87
Oxígeno Disuelto	mg/L	12,34	13	8,36	9	10	6,08
Coliformes Fecales	NMP/100ml	7,12	7,8	575,66	110	50	110
DBO5	mg/L	3,2	3,2	-	-	2,0	3,2
DQO	mg/L	4,2	3	2,66	3	5,0	11
Aluminio total	mg/L	0,034	0,011	0,014	0,035	0,4	0,115
Cloruro	mg/L	2,28	2	4,5	4,5	7,0	4
Hierro Total	mg/L	0,1042	0,1	0,16	0,1	0,3	0,15
Índice de fenol	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,001
Nitrito	mg/L	0,002	0,002	-	-	0,002	0,002

Nitrato	mg/L	0,164	0,06	0,03	0,02	0,030	0,08
Amonio	mg/L	0,018	0,018	-	-	0,020	0,016
Nitrógeno Total	mg/L	0,21	0,07	0,1	0,1	0,200	0,2
Fósforo Total	mg/L	0,013	0,01	0,01	0,01	0,020	0,01
Ortofosfato	mg/L	0,0067	0,005	0	0	0,010	0,01
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	21	2,5	2	2	4,0	3
Sulfato	mg/L	6,64	4,9	9,5	9,5	6,0	10
AOX	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	-

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de página web de SMA.

Tabla N°26: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-30.

Parámetro	Unidad	Promedio Invierno	Mediana Invierno	Promedio Verano	Mediana Verano	Limite Norma	Percentil 85-15
pH	Unidad	7,75	7,75	8,8	8,3	6,5-8,5	7,2-9,1
Conductividad	uS/cm	65,57	61	121,66	121	150	121
Oxígeno Disuelto	mg/L	12,005	12,9	10,38	10,38	9	9,5
Coliformes Fecales	NMP/100ml	7,12	7,8	73,66	79	500	91
DBO5	mg/L	1,5	1,5	-	-	2	1,5
DQO	mg/L	3,1	3	5	5	8	5
Aluminio total	mg/L	0,062	0,04	0,048	0,05	0,40	0,052
Cloruro	mg/L	2,47	2,2	5,06	5	7	4,2
Hierro Total	mg/L	0,102	0,1	0,14	0,11	0,30	0,13
Índice de fenol	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,001
Nitrito	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002
Nitrato	mg/L	0,15	0,2	0,26	0,25	0,15	0,25
Amonio	mg/L	0,016	0,016	-	-	0,020	0,016
Nitrógeno Total	mg/L	0,304	0,3	0,36	0,3	0,2	0,6
Fósforo Total	mg/L	0,05	0,01	0,023	0,02	0,04	0,03
Ortofosfato	mg/L	0,0078	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	3,38	3	17	5	7	5
Sulfato	mg/L	3,98	6	13,9	13,7	6	13,7
AOX	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	-

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de página web de SMA.

Tabla N°27: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-40.

Parámetro	Unidad	Promedio Invierno	Mediana Invierno	Promedio Verano	Mediana Verano	Limite Norma	Percentil 85-15
pH	Unidad	7,19	7,46	7,92	7,9	6,5-8,5	7,9

Conductividad	uS/cm	84,56	87	156,66	163	150	163
Oxígeno Disuelto	mg/L	10,12	11	7,58	8	9	11
Coliformes Fecales	NMP/100ml	66,54	24	52,33	26	500	110
DBO5	mg/L	2,4	2,4	-	-	2	2,4
DQO	mg/L	5,4	4	4,33	4	8	7
Aluminio total	mg/L	0,145	0,1	0,08	0,1	0,5	0,127
Cloruro	mg/L	2,48	3	6,26	6	8	6
Hierro Total	mg/L	0,37	0,4	0,2	0,2	0,5	0,43
Índice de fenol	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0,001
Nitrito	mg/L	0,003	0,001	-	-	0	0,001
Nitrato	mg/L	0,244	0,26	0,31	0,21	0,15	0,32
Amonio	mg/L	0,018	0,018	-	-	0,02	0,016
Nitrógeno Total	mg/L	0,37	0,35	0,23	0,2	0,3	0,4
Fosforo Total	mg/L	0,045	0,04	0,045	0,044	0,05	0,05
Ortofosfato	mg/L	0,017	0,02	0,024	0,022	0,02	0,03
Sólidos Suspendidos totales	mg/L	5,6	5	3,66	3	8	6
Sulfato	mg/L	6,76	7	17,6	17,8	14	18,6
AOX	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03	-

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de página web SMA.

Tabla N°28: Análisis de datos estadísticos para la estación de monitoreo BI-50.

Parámetro	Unidad	Promedio Invierno	Mediana Invierno	Promedio Verano	Mediana Verano	Limite Norma	Percentil 85-15
pH	Unidad	7,4	7,2	8,12	8,16	6,5-8,5	8,16
Conductividad	uS/cm	100,3	100	149	148	150	149
Oxígeno Disuelto	mg/L	10,35	10,9	7,9	9	8,7	5,7
Coliformes Fecales	NMP/100ml	596,4	350	318	32	1000	920
DBO5	mg/L	2,2	2,2	-	-	2	2,2
DQO	mg/L	4	4	3,66	3	5	6
Aluminio total	mg/L	0,18	0,2	0,136	0,108	0,7	0,231
Cloruro	mg/L	3,13	3	5,9	4,8	8	6
Hierro Total	mg/L	0,415	0,3	0,2	0,2	0,7	0,67
Índice de fenol	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0,001
Nitrito	mg/L	0,006	0,006	-	-	0	0,006
Nitrato	mg/L	0,27	0,287	0,12	0,12	0,15	0,35
Amonio	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,016	0,03	0,02
Nitrógeno Total	mg/L	0,378	0,4	0,73	0,5	0,3	1,5
Fósforo Total	mg/L	0,12	0,063	0,041	0,044	0,05	0,4
Ortofosfato	mg/L	0,096	0,022	0,032	0,033	0,02	0,4

Sólidos Suspendidos totales	mg/L	8,32	6,6	4,6	6	9	11
Sulfato	mg/L	5,85	6,3	15,36	15,1	14	11
AOX	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	-

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de página web SMA.

Tabla N°29: Análisis clases de calidad de agua para el promedio de los parámetros estudiados en las estaciones BI-20, BI-30, BI-40 Y BI-50 durante 2016-2020.

Parámetro	Unidad	BI-20 invierno	BI-20 Verano	BI-30 invierno	BI-30 verano	BI-40 invierno	BI-40 verano	BI-50 invierno	BI-50 verano
pH	Unidad	7,85	8,23	7,75	8,8	7,19	7,92	7,4	8,12
Conductividad	uS/cm	61,8	87	65,57	121,66	84,56	156,66	100,3	149
Oxígeno disuelto	mg/L	12,34	8,36	12,005	10,38	10,12	7,58	10,35	7,9
Coliformes fecales	NMP/100ml	7,12	575,667	7,12	73,66	66,54	52,33	596,4	318
DBO5	mg/L	3,2	-	1,5	-	2,4	-	2,2	-
DQO	mg/L	4,2	2,66	3,1	5	5,4	4,33	4	5,93
Aluminio total	mg/L	0,034	0,014	0,062	0,048	0,145	0,08	0,18	0,136
Cloruro	mg/L	2,28	4,5	2,47	5,06	2,48	6,26	3,13	5,9
Hierro total	mg/L	0,1042	0,16	0,102	0,14	0,37	0,2	0,415	0,2
Índice de fenol	mg/L	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Nitrito	mg/L	0,002	-	0,002	0,002	0,003	-	0,006	-
Nitrato	mg/L	0,164	0,03	0,15	0,26	0,244	0,31	0,27	0,12
Amonio	mg/L	0,018	-	0,016	-	0,018	-	0,02	0,02
Nitrógeno total	mg/L	0,21	0,1	0,304	0,36	0,375	0,23	0,378	0,73
Fósforo total	mg/L	0,013	0,01	0,05	0,023	0,045	0,045	0,12	0,041
Ortofosfato	mg/L	0,0067	0,0	0,0078	0,02	0,017	0,024	0,096	0,032
Sólidos suspendidos totales	mg/L	21	2	3,38	17	5,6	3,66	8,32	4,6
Sulfato	mg/L	6,64	9,5	3,98	13,9	6,76	17,6	5,85	15,36
AOX	mg/L	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Fuente: Elaboración propia.

Categorías:

Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Excelente	Buena	Regular	Mala	Muy mala

6.2.1 Análisis de tabla de promedios en estación de invierno y verano

Tras analizar la tabla anterior sobre las concentraciones promedio en invierno y verano en las estaciones de monitoreo BI-20, BI-30, BI-40 y BI- 50, siguiendo las

estaciones río abajo, se observa un aumento sostenible de la concentración en los parámetros de conductividad, nitrógeno total, fósforo total y en el caso del oxígeno disuelto una disminución, viéndose una tendencia a la disminución de la calidad de aguas en los parámetros recién mencionados llegando desde “excelente” en la estación BI-20 río arriba antes de las descargas industriales de celulosa, hasta “buena” y en algunos casos llegando hasta el nivel de calidad de aguas “regular”, especialmente con nutrientes como fósforo, compuestos nitrogenados y conductividad. Esto se ve especialmente en la estación BI-30 en Coigüe lo cual se puede explicar con que se encuentra a 6 km aproximadamente del punto de descarga de la planta CMPC Pacífico. En la estación del área de vigilancia BI-40, antes de la confluencia con el río Gómer, se ve un leve aumento de los parámetros en general, para este punto el río ya ha recibido la carga contaminante de las tres plantas de celulosa; pero la poca variación de concentración con la estación de monitoreo anterior en Coigüe se puede explicar con la dilución de los contaminantes por la confluencia del río Laja, esto se ve más claramente en verano en donde algunos parámetros disminuyen su concentración. Finalmente, en la estación BI-50 se observa un aumento de concentración de parámetros en general, teniendo la peor calidad de aguas de todas las estaciones estudiadas, llegando a tener tres parámetros con calidad de agua “regular” en verano, especialmente con los nutrientes fósforo y nitrógeno total lo que podría llevar a cierto grado de eutrofización, lo que es importante destacar, teniendo en cuenta que la estación BI-50, se ubica antes de la planta de tratamientos de agua potable “La Mochita”, la cual es la fuente primordial de agua potable para gran parte de las comunas riberañas, como son, por ejemplo, de mayor a menor población: Concepción, Hualpén, Talcahuano, San Pedro de la Paz, Chiguayante, Santa Juana, Hualqui y otras.

También se pudo observar la característica estacional de la calidad de aguas del río Biobío, la cual se relaciona con el sistema hidrológico. Así durante el verano, cuando el caudal del río es bajo y tiene una mínima capacidad de dilución, tiende a haber

una mayor concentración de contaminantes en general, mientras que, en invierno, donde hay una alta capacidad de dilución, la concentración no llega a ser tan alta.

6.2.2 Análisis por contaminante

A continuación, se presenta una breve descripción de los parámetros monitoreados por la NSCA, con un respectivo gráfico (algunas de las estaciones de monitoreo no poseían datos para la estación estudiada, por lo tanto, no hay grafico para esas estaciones)

AOX (mg/L): Se denomina compuestos orgánicos halogenados adsorbibles (AOX), a la suma de los compuestos que incluyen sustancias resultantes de la reacción del grupo halógeno (Cloro, Bromo, Yodo y Fluor), con moléculas orgánicas, principalmente producidas por actividades antropogénicas. Son producidos como residuos de actividades industriales, como lavado químico de ropa, desengrasado de metales, blanqueamiento de fibras de celulosa y tratamiento de agua con compuestos de cloro. Durante el proceso de celulosa Kraft estos compuestos son generados, tras la reacción de lignina residual de fibras de madera con compuestos clorados durante la etapa de blanqueo. Muchos de estos son de gran persistencia, toxicidad como los PCB (bifenilos policlorados) y las dioxinas y furanos. El parámetro AOX se ha convertido en una medida aceptada para medir el material orgánico clorado y es usado para monitorear y regular las plantas de celulosa Kraft, y controlar las dioxinas y furanos (Savant, 2006).

Para el caso de las estaciones de monitoreo analizadas no se encontró concentración de compuestos AOX, debido a la imposibilidad de llegar al límite de detección de la norma, sin embargo, teniendo en cuenta la tabla de identificación de clases, si bien esta concentración no alcanza para considerarse clase 3 “regular”, si puede variar entre clase 2 “buena” y clase 1 “excelente”.

Amoniac (mg/L): Amonio es una de las múltiples formas que toma el nitrógeno en los ambientes acuáticos, a diferencia de las otras formas del nitrógeno que con un exceso de nutrientes pueden causar eutrofización, el amonio tiene un efecto tóxico

directo en la vida acuática (EPA, 2021). “El amoníaco puede ser tóxico para los peces a pH alto y niveles bajos de oxígeno disuelto, reduce la capacidad de los peces para llevar oxígeno a la sangre y puede sofocarlos. Niveles de amoníaco bajos, de hasta 0,06 mg/L dañan las agallas, reducen la alimentación y entorpecen los procesos naturales de los peces” (bernardolabs, 2017). En las estaciones de monitoreo estudiadas se observa un nivel promedio de amonio en invierno bajo, con una calidad de agua excelente que se mantiene a lo largo del río, mientras que en verano solo la estación BI-50 contiene datos, donde se observa una concentración promedio de 0,002 mg/L (ver figura N°16), lo que significa una calidad de agua excelente.

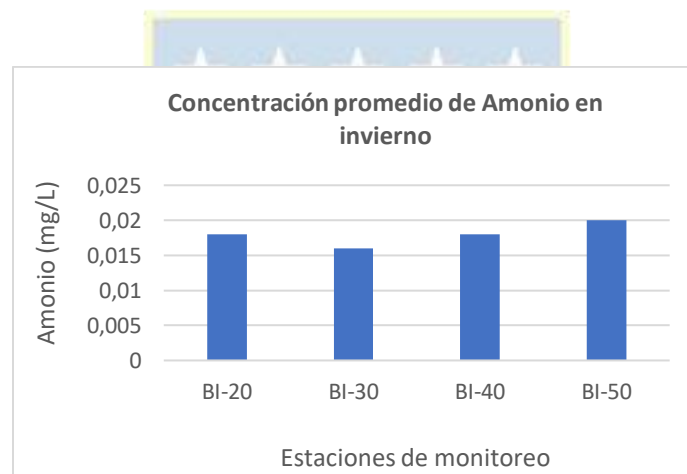


Figura N°16: Concentraciones promedio de amonio en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

Nitrito (mg/L): La presencia de nitritos en el agua es indicativo de contaminación de carácter fecal reciente. En aguas superficiales, bien oxigenadas, el nivel del nitrito no suele superar 0,1 mg/L. Asimismo, cabe resaltar que el nitrito se halla en un estado de oxidación intermedio entre el amoníaco y el nitrato. Los nitritos en concentraciones elevadas reaccionan dentro del organismo con aminas y amidas secundarias y terciarias formando nitrosaminas de alto poder cancerígeno y tóxico (Metcalf y Eddy, 1995). “En general, la concentración de nitritos en el agua

superficial es muy baja; pero puede aparecer ocasionalmente en concentraciones inesperadamente altas debido a la contaminación industrial y de aguas residual domésticas” (Romero, 2009).

Tras analizar los datos obtenidos en invierno se observa una concentración gradual de Nitrito a medida que baja el río, desde una calidad excelente a buena, esto se puede explicar por la contaminación industrial de la zona del río Biobío como las plantas de celulosa y también por las múltiples plantas de tratamiento de aguas servidas que existen para las distintas comunidades en la Cuenca. En verano solo se obtuvieron valores para una estación de monitoreo BI-30 la cual tiene el valor de 0,002 mg/L (ver figura N°17) el cual es el mínimo de detección y su calidad de agua es excelente.

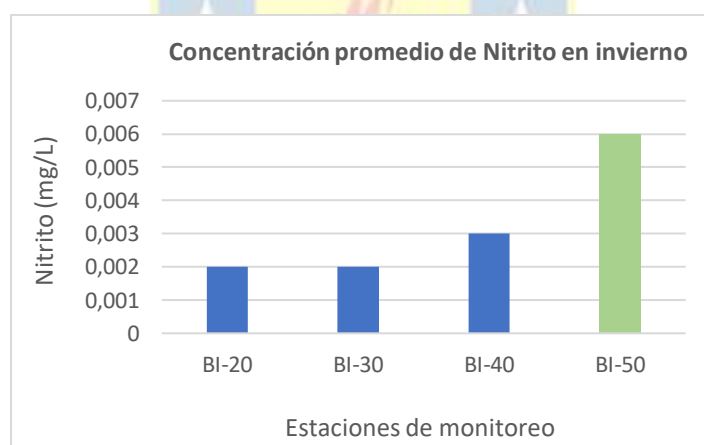


Figura N°17: Concentraciones promedio de amonio en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

Nitrato (mg/L): El nitrato es la forma más oxidada del nitrógeno (Microlabindustrial, 2017). Recientes estudios en la unión europea indican que el aumento del nitrato en el medio acuático, han demostrado distintas consecuencias como son un peligroso incremento de la degradación del agua de abastecimiento y un aumento de la eutrofización. Existen dos principales fuentes de contaminación por nitrato las

fuentes puntuales ligadas a la actividad industrial y efluentes urbanos y por otra, la contaminación difusa por fuentes agrícolas (Larios, 2009).

Para las estaciones de monitoreo analizadas (ver figura N°18 Y 19) en invierno se observa una calidad de agua regular desde la primera estación de monitoreo incluso antes de las descargas de industria de celulosa, luego se ve una leve disminución en la estación BI-30, para después Río abajo apreciar un aumento considerable de la concentración de Nitrato para las estaciones BI-40 y BI-50 lo que se podría relacionar a la actividad de las plantas de celulosa sumado con otras actividades industriales, contaminación difusa por agricultura y las plantas de tratamiento de aguas de efluentes urbanos. En los meses de verano comienza con una calidad excelente en BI-20, aumenta en las estaciones BI-30 Y BI-40 con una calidad regular y finalmente para la estación BI-50 la concentración disminuye nuevamente llegando a 0,12 mg/L con un nivel de calidad bueno.

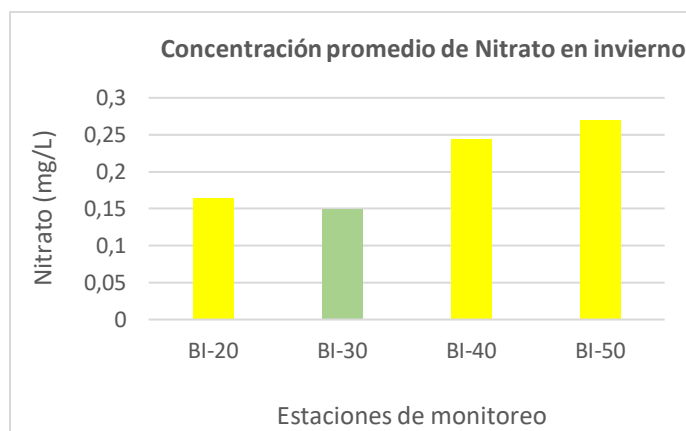


Figura N°18: Concentraciones promedio de Nitrato en las distintas áreas de vigilancia para la NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

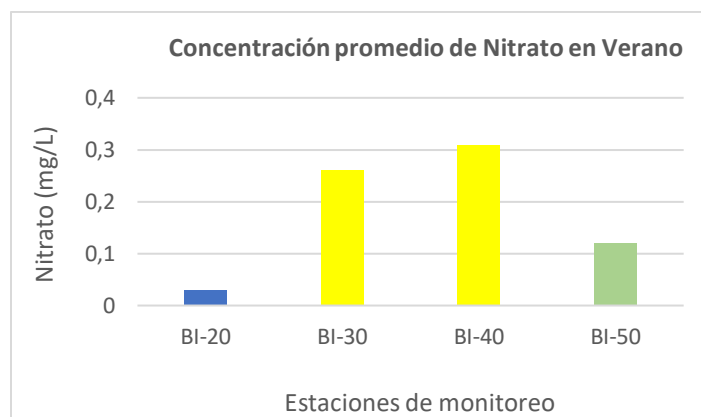


Figura N°19: Concentraciones promedio de Nitrato en verano en las distintas áreas de vigilancia para la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

Nitrógeno total (mg/L): El nitrógeno es fundamental para un correcto funcionamiento del tratamiento biológico, ya que es un nutriente esencial para plantas y animales. Existen tres formas en las que el nitrógeno es comúnmente medido en los cuerpos de agua, nitrógeno amoniacal (NH_4^+), nitratos y nitritos (NO_2^- y NO_3^-). El nitrógeno total es la suma del nitrógeno total Kjeldahl (amonio, orgánico y nitrógeno reducido) y nitrato - nitrito. Un exceso en el nivel de nitrógeno en las aguas puede llevar a bajos niveles de oxígeno disuelto y afectar negativamente el ecosistema, estos vienen principalmente de tratamiento secundario del efluente (Gapes et al., 1999).

En las estaciones de monitoreo analizadas (ver figura N°20 y 21) se observa un aumento de la concentración del nitrógeno total gradual en invierno lo que se le podría atribuir entre otros factores, a las empresas de celulosa, sin embargo, los niveles de calidad de agua no dejan de estar en una categoría "buena". En verano se observa una variación en la estación BI-40 donde, si bien sigue siendo una calidad de agua buena, esta tiene una importante disminución en su concentración lo que podría explicarse con la confluencia con el río Laja lo que produce una

dilución de este parámetro, finalmente para la estación BI-50 aumenta considerablemente llegando a una calidad de agua regular.

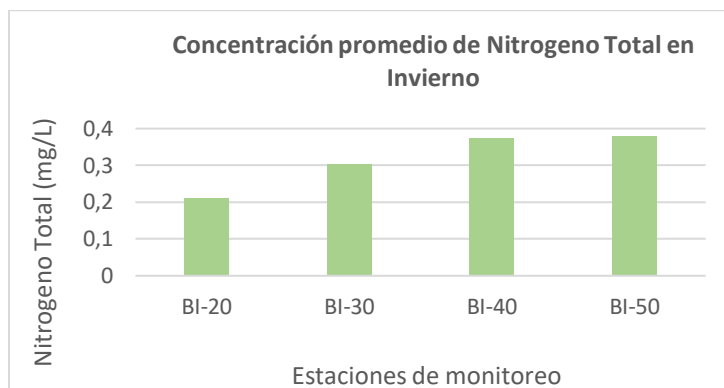


Figura N°20: Concentraciones promedio de Nitrógeno en las distintas áreas de vigilancia de NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

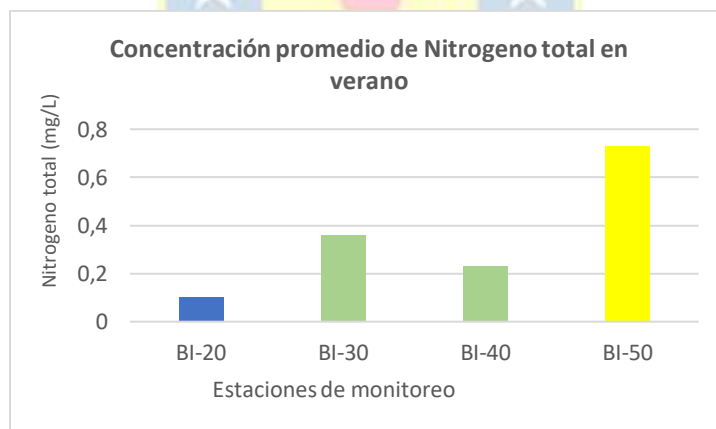


Figura N°21: Concentraciones promedio de Nitrógeno en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

Fósforo (mg/L): El fósforo es esencial en el crecimiento de plantas y animales, el exceso de fósforo en el ambiente puede provocar crecimiento descontrolado de plantas. Es considerado como detonante de los procesos de eutrofización en los cuerpos de aguas, por ello, existe gran interés en controlar la cantidad de fósforo

que es vertido a las aguas residuales. Las formas más frecuentes en que se encuentra el fósforo son; ortofosfato, polifosfato y fosfatos orgánicos. Los ortofosfatos son los que se encuentran disponibles para el metabolismo biológico (Metcalf y Eddy, 1995). En el proceso de celulosa las mayores concentraciones de fósforo a la salida del sistema se generan en el proceso de recuperación de reactivos de la planta química o proceso de caustificación. Otra área de mayores concentraciones de fósforo proviene de los lodos del tratamiento de los efluentes primarios y secundarios y una menor concentración de fósforo en el efluente de descarga (Lillo, 2013).

Como se puede apreciar en los gráficos (ver figura N°22 y 23) para la estación BI-20 los niveles de fósforo son bajos teniendo una calidad excelente en verano y buena en invierno; pero al llegar a la estación BI-30 se ve que en invierno y verano tiene un aumento considerable de aproximadamente el doble, esto, se podría explicar entre otros factores, por la descarga de la planta CMPC Pacífico que se encuentre entre estos dos puntos de monitoreo. En BI-40 se ve que aumenta la concentración en verano y disminuye en invierno lo que se puede deber a la dilución del río con el río Laja en invierno teniendo gran caudal. Mientras que en la zona BI-50 antes de Planta la Mochita, tiende a aumentar estando en niveles de regular y buena; pero cerca de regular lo que se podría explicar con que en este punto se suman las descargas de los efluentes de CMPC Laja y CMPC Santa Fe.

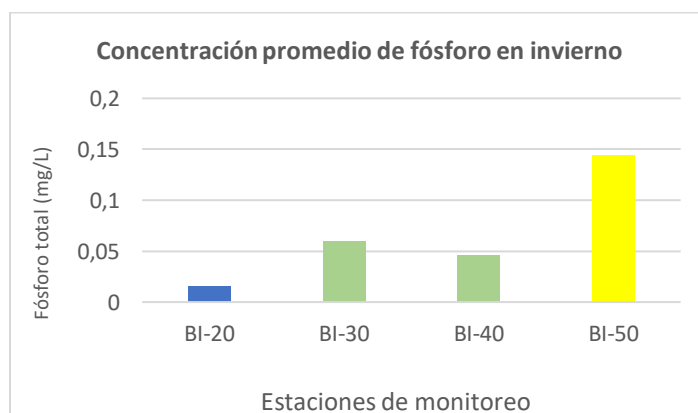


Figura N°22: Concentración promedio de fósforo en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

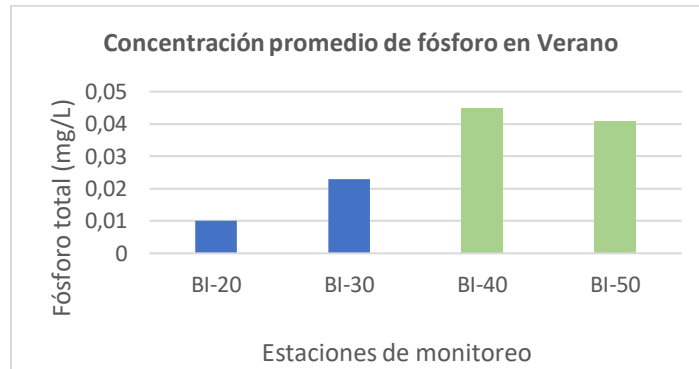


Figura N°23: Concentración promedio de fósforo en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

Sólidos Suspendidos Totales (SST)(mg/L): Analíticamente, se define como la materia que se obtiene de un volumen de muestra filtrada, después de ser secado a 103 - 105 °C. La fracción filtrable de los sólidos corresponde a sólidos coloidales y disueltos, que en total corresponden a partículas de materia de tamaños entre 0,001 y 1 micrómetro y moléculas orgánicas e inorgánicas, iones en disolución. Debido a que no es posible eliminar la fracción coloidal por sedimentación, normalmente para eliminar la fracción coloidal es necesaria la oxidación biológica o la coagulación complementadas con la sedimentación. En la producción de celulosa los sólidos suspendidos totales tienen su origen en la corteza, trozos de fibra y agentes de relleno y recubrimiento. Consume oxígeno cuando se descompone y puede ser portador de sustancias tóxicas (Romero, 2009).

La concentración de sólidos suspendidos totales a lo largo de las estaciones de monitoreo es de calidad buena y excelente (ver figura N°24 y 25), no tiene mayores

variaciones, solo en verano en la estación BI-30 lo que se podría explicar en parte por la descarga de efluente de CMPC Pacífico.

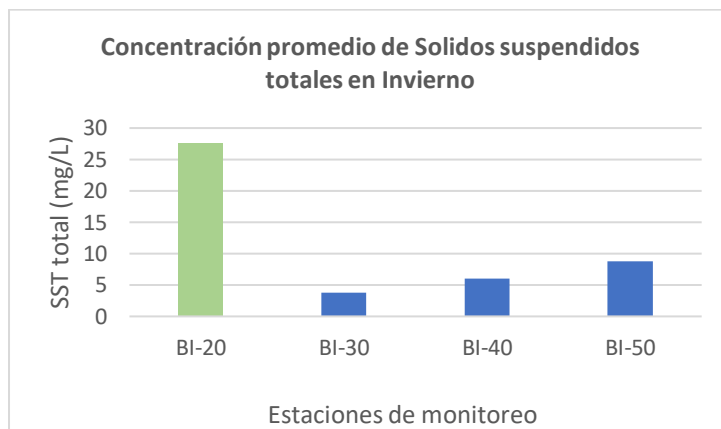


Figura N°24: Concentración promedio de Sólidos suspendidos totales en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

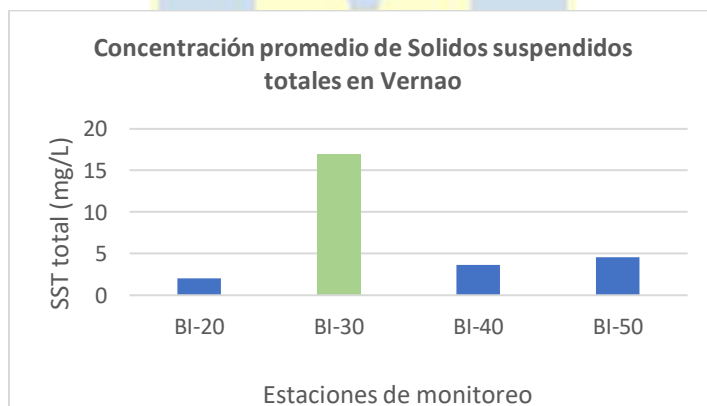


Figura N°25: Concentración promedio de Sólidos suspendidos totales en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

Conductividad uS/cm): La variación de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de la materia orgánica, e igualmente contribuye a la detección de fuentes de contaminación, la evaluación de la actitud del agua para riego y la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno

(Metcalf y Eddy, 1995). Se observa un aumento en la conductividad en el agua a medida que baja el río desde las estaciones de monitoreo donde desde BI-30 a BI-40 tiende a aumentar (ver figura N° 26 y 27), lo que puede ser explicado entre otros factores con que entre las estaciones BI-30 Y BI-40 se encuentran los puntos de descarga de la planta CMPC Laja y CMPC Santa Fe, luego este aumento se mantiene para el punto BI-50, teniendo en verano una calidad de agua regular. Este aumento de la conductividad se puede asociar probablemente al aumento del sodio y sales del efluente producido por la degradación de productos de la madera.

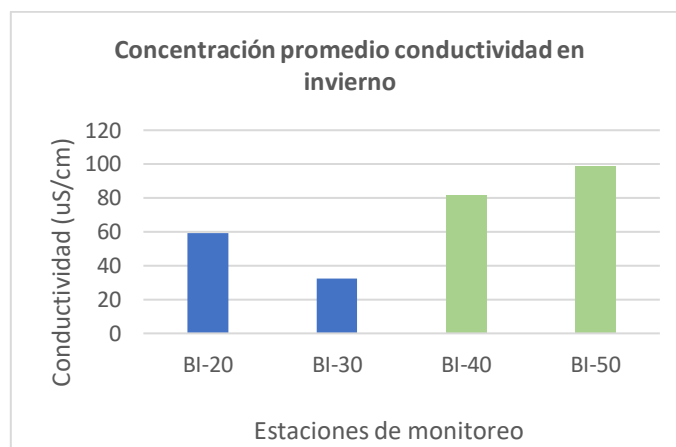


Figura N°26: Concentración promedio de Conductividad en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.
Fuente: Elaboración propia.

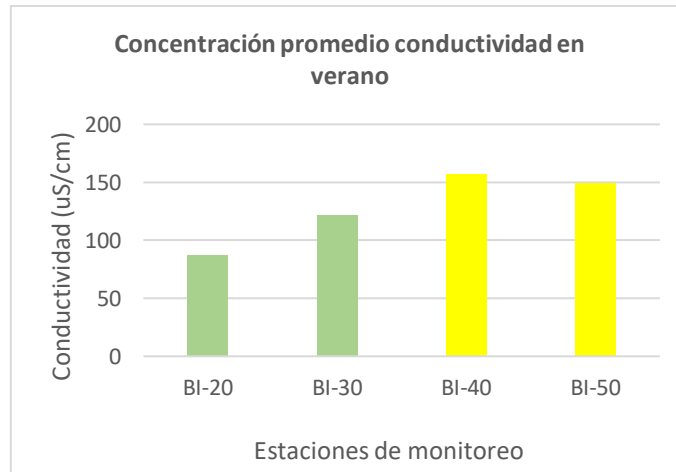


Figura N°27: Concentración promedio de Conductividad en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) (mg/L): Uno de los valores más importantes al medir impacto contaminante de las descargas de celulosa es la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), esta es la cantidad de oxígeno que los microorganismos (hongos, bacterias y plancton) consumen al momento de degradar las sustancias orgánicas contenidas en la muestra y generalmente la prueba requiere de cinco días. Este parámetro, se usa para medir el grado de contaminación a partir de materia orgánica (Raud, 2012).

Para el caso de la concentración de DBO5(Tabla N°28) solo se tienen registro de este parámetro para el invierno del año 2020. En estos datos se aprecia una calidad de agua que varía levemente entre buena y excelente para el caso de la estación BI-30 y no tiene un aumento a medida que el río baja.

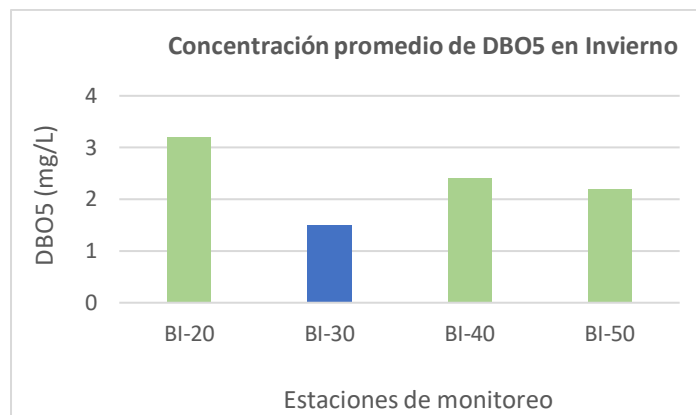


Figura N°28: Concentración promedio para DBO5 en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L): “El ensayo de la DQO también es usado para medir el contenido de materia orgánica; pero a diferencia de la DBO5, se emplea un agente químico fuertemente oxidante como dicromato de potasio, en medio ácido para determinar la equivalencia con el oxígeno, de la materia que puede oxidarse” (Metcalf y Eddy, 1995). La DQO siempre es mayor que la DBO ya que incluye sustancias químicas en las aguas residuales que no son biodegradables por microorganismos. “El aumento de la DQO contribuye a la disminución de la capacidad de depuración de las fuentes hídricas, disminución del oxígeno disuelto, salinización de los suelos, y pérdida de la biodiversidad acuática y calidad del uso” (Beltrán, 1999).

El DQO encontrado en todas las estaciones de monitoreo, si bien tiene ciertas variaciones mínimas es de calidad excelente (ver figura N° 29 y 30).

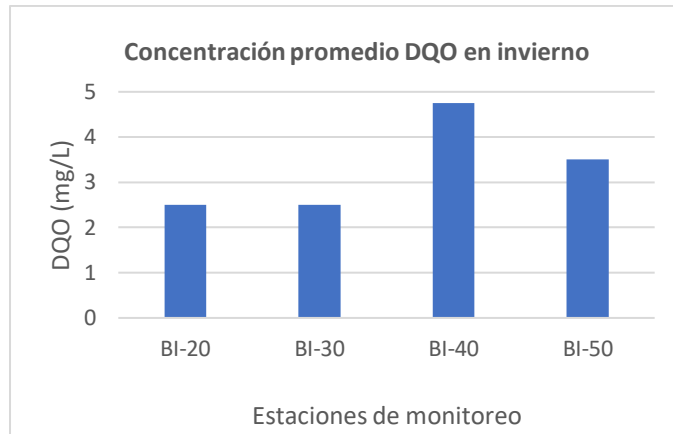


Figura N°29: Concentración promedio de DQO en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

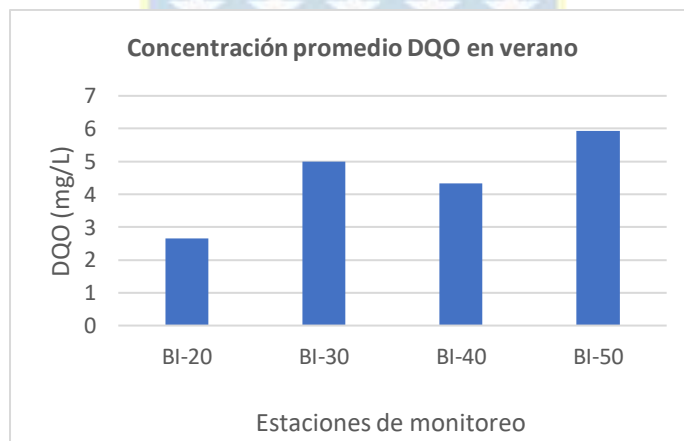


Figura N°30: Concentración promedio de DQO en las distintas áreas de vigilancia de la NSCA.

Fuente: Elaboración propia.

Índice de Fenol: Una de las características de los efluentes de plantas de celulosa son los compuestos fenólicos, estos compuestos formados en la etapa de blanqueo se han demostrado ser contaminantes dañinos y contribuyen significativamente en la toxicidad de los efluentes entre los compuestos fenólicos encontrados están los fenoles clorados como catecoles, guayacoles y vainillinas (Anku, 2017).

Para todas las estaciones de monitoreo analizadas la concentración de índice de fenol fue el mínimo registrado por las técnicas de monitoreo, por lo tanto, se considera de calidad excelente.



6.3 Resultados objetivo específico 3: Realizar un análisis comparativo de la normativa de descarga de efluentes a los sistemas acuáticos de la Industria de Celulosa

La protección del medio ambiente es un tema que ha adquirido mucho interés en los últimos años por parte de la sociedad y de los estados. Esta preocupación se ha traducido en la creación de distintos marcos legales internos en los cuales se ha reflejado la demanda de movimientos sociales, organizaciones políticas e instituciones que han demandado un mayor control por parte del estado en la regulación y control de zonas impactadas por el desarrollo Industrial (Harrison, 2005). La industria de celulosa Kraft, tanto en Chile como en el resto del mundo, consume agua para la realización de sus procesos productivos y, a su vez genera efluentes en las distintas etapas en las que la madera es sometida para la obtención final de pulpa blanqueada. Los efluentes descargados hacia el medio ambiente provocan diversos impactos en los sistemas acuáticos receptores, por lo que deben ser sometidos a un proceso de regulación ambiental (Särkkä, 2018).

En Chile existen normas de emisión orientadas a proteger el recurso hídrico. Así, los efluentes generados en los procesos productivos, incluyendo los mineros, cuando son descargados a algún cuerpo receptor, sea éste aguas continentales superficiales, aguas marítimas o acuíferos subterráneos, deben cumplir con límites máximos de emisión para diversos parámetros, el cual es dado por la norma de emisión D.S. MINSEGPRES n.º 90/2001 (BCN, 2020).

La industria de la celulosa y papel se lleva a cabo prácticamente a lo largo de todo el mundo, en donde cada país tiene sus propias legislaciones ambientales y, por lo tanto, su propia forma de regular los impactos de las descargas de los efluentes. En este estudio se eligieron los países Suecia, Estados Unidos y Canadá por su avanzada tecnología, alto nivel de producción a nivel global, además de ser los primeros países en investigar, analizar y tomar acciones en lo que respecta a la contaminación de descargas de efluentes de celulosa causada por Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX) (Harrison, 2005).

6.3.1 Celulosa en Suecia

La industria forestal en su conjunto desempeña un papel importante en la economía sueca. También está muy orientado a la exportación y contribuye de manera significativa a la balanza comercial de Suecia. Suecia es el segundo exportador mundial de celulosa, papel y productos de madera aserrada combinados. De la producción de celulosa y papel, cerca del 90 por ciento se exporta. En cuanto a la producción de celulosa, alrededor de una cuarta parte del consumo total de celulosa dentro de la UE se fabrica en Suecia (ForestSweden, 2021).

6.3.2 Legislación ambiental sueca para descargas industriales de Plantas de celulosa

En la década de 1960, Suecia, junto con muchas otras sociedades occidentales, vieron el inicio de una acción gubernamental seria para controlar la contaminación industrial en paralelo a una creciente conciencia ambiental en la sociedad. A diferencia de los Estados Unidos, la conciencia ambiental en Suecia creció principalmente entre los expertos y no entre el público en las décadas de 1960 y 1970. A menudo se supone que las industrias contaminantes pesadas no se centraron seriamente en mitigar sus impactos ambientales antes de este despertar ambiental (Lönnroth 2010).

El Código ambiental (SFS 1998: 808) es la principal legislación ambiental sueca, la cual entro en vigor el 1 de enero de 1999. El Código Ambiental fusiona 15 leyes ambientales centrales existentes. El objetivo del código ambiental es promover el desarrollo sostenible. El código ambiental se elabora y especifica además en forma de ordenanzas y reglamentos emitidos por las autoridades y las decisiones adoptadas en casos individuales (ICLG, 2020). En lo que respecta a las políticas ambientales, el Parlamento sueco ha adoptado los objetivos nacionales de calidad ambiental. Al ser miembro de la Unión Europea (UE), la política ambiental de la UE forma parte en muchos aspectos del derecho ambiental sueco. Los organismos/organismos que aplican el derecho ambiental están formados por los organismos nacionales de medio ambiente, como la Agencia Sueca de Protección

Ambiental (EPA sueca) para la gestión marina y del agua, así como las autoridades regionales, como las juntas administrativas de los países y las autoridades municipales locales (Söderholm, 2017).

En Suecia, los tribunales que tramitan el derecho ambiental están compuestos por cinco Tribunales Territoriales y ambientales, el Tribunal Superior Ambiental y la corte Suprema. En lo que respecta al procedimiento de autorización, la mayoría de los permisos son, dependiendo del tipo de operación que se trate de los permisos, emitidos por las juntas administrativas del país y las autoridades municipales son las principales autoridades (ICLG, 2020). Suecia no ha constatado necesario emitir reglamentos que impongan límites mínimos de rendimiento ambiental que las fábricas de pulpa y papel deben alcanzar. En su lugar, los requisitos ambientales se establecen caso por caso en las decisiones de permisos individuales. Las autoridades de supervisión tienen un papel central en garantizar que se cumplan los permisos, decisiones y leyes ambientales. Tienen el mandato de emitir órdenes, prohibiciones y, en cierta medida, sanciones o una multa. Las autoridades de control están obligadas a denunciar las infracciones de las disposiciones de las normas del código ambiental decretado en cumplimiento de la ley o a las autoridades del Ministerio Público cuando existan motivos para sospechar que se ha cometido un delito (TSEC, 2015).

Los permisos emitidos por las cortes ambientales consideran las opiniones de varias partes interesadas, incluyendo la Junta del Condado, la industria, los grupos ambientales, la comunidad local y el público. La corte considera y equilibra las opiniones de todas las partes a la hora de tomar una decisión. Los permisos concedidos a plantas de celulosa especifican límites de emisión y, a veces, otras condiciones, como la instalación de tecnologías específicas. Al tomar sus decisiones, la corte podrá decidir sobre los límites menos estrictos basados en la tecnología MTD que se utilizará (Bergquist, 2013).

Otra legislación importante que se aplica en las plantas de celulosa en Suecia es la Directiva de prevención y control integrado de la contaminación europea también conocida como IPPC, un instrumento clave en la legislación del medio ambiente de la Unión Europea, su propósito es lograr una prevención integrada de la contaminación. Además, las plantas de Suecia al igual que el resto de Europa, han implementado sistemas de gestión ambiental como la ISO 14001 y la versión europea EMAS (Reglamento Comunitario de Ecogestión y Ecoauditoría) (Särkkä, 2018).

En la siguiente tabla N°30 se muestra un ejemplo de regularización de plantas de celulosa en Suecia siguiendo el modelo de estudio caso a caso junto con límites MTD.

Tabla N°30: Parámetros y límites para plantas de celulosa Kraft MTD en Suecia.

Parámetros	Unidad	Rango y límites de medida		
		Limite diario	Limite mensual	Limites en largos periodos de tiempo
DQO	kg/ADt	10 - 15	37-87	49-67
Fósforo Total	g/ADt	10-20	-	-
AOX	kg/ADt	0,1-0,2	-	0,3 - 1,3(AOX) 0,7 - 1,5(TOCl) ⁽¹⁾
Fosforo total	g/ADt	100-200	-	-
Sólidos Suspendidos totales	kg/ADt	-	1,0-3,8	0,5-4,8
DBO ₅	kg/ADt	-	-	9,3-12,6(promedio anual)

1. Suecia usa límites para compuestos orgánicos totales (TOCl). Recientemente, límites de AOX han sido impuestos para otras plantas. Los límites se ponen para un promedio anual. El rango de límite de TOCl expresado como AOX es aproximadamente 0,9-2,0 kg/ADt basado en un factor de conversión de 1.3.

Fuente: Swedish Environmental Protection Agency, 1992, Simons Consulting Group, 1994.

6.3.3 Celulosa en Canadá

Al igual que en Suecia, la industria de la pulpa y el papel es también uno de los principales sectores de fabricación de Canadá. Fundada hace 200 años, se ha vuelto un componente importante de la economía canadiense y al igual que en Chile

está fuertemente integrada con los otros sectores forestales y productos de madera. La industria de productos forestales aporta el 3 por ciento del producto interno bruto de Canadá (CIPEC, 2018).

La industria opera en comunidades de todo Canadá, proporcionando empleo directo a 360.000 canadienses. Aunque la fracción del empleo manufacturero proporcionado por el sector ha caído de aproximadamente un 4% a un 3%, sigue siendo una poderosa influencia política, sobre todo debido a las numerosas “ciudades industriales” que dependen de ese empleo. La pulpa y el papel es también el sector de exportación más grande de Canadá, con exportaciones de más de \$ 35 mil millones en el año 2000. Hay unas 150 plantas de celulosa y papel ubicadas en 9 provincias, incluidas 47 plantas de Kraft, que representan aproximadamente la mitad de la producción total de celulosa en Canadá (Karey, 2002).

6.3.4 Legislación ambiental canadiense para descargas industriales de Plantas de celulosa

En Canadá, el Gobierno Federal y los Gobiernos Provinciales y Territoriales comparten la autoridad legislativa y normativa sobre la reglamentación del agua, protección ambiental y salud pública. La división de poderes remarcada en la Ley Constitucional de 1867 bajo la cual se fundó el país no menciona el “medio ambiente”. En consecuencia, la jurisdicción se basa en la asignación de poderes a las distintas áreas, en las cuales se prestan para el uso de recursos y manejo del medio ambiente (OECD, 1999).

En cada instancia, el Gobierno aprueba sus propias leyes y redacta sus regulaciones, incluyendo la fiscalización. Con relación al recurso hídrico, el Gobierno Federal es responsable de los temas de agua que afecten de manera considerable a la economía nacional, tales como la navegación, pesquería, aguas fronterizas y transfronterizas. Se consideran también los recursos hídricos en tierras de propiedad federal (parques nacionales) y los territorios o reservas indígenas. Entre las leyes federales importantes que administran el recurso hídrico está la Ley sobre los Recursos Hídricos de Canadá (Canada Water Act de 1985), Ley

Canadiense de Protección del Medio Ambiente (Canadian Environmental Protection Act de 1999) y la Ley de Pesca (Fisheries Act de 1985) (Karey, 2002).

La Ley Canadiense de Protección del Medio Ambiente (EPA canadiense), se enfoca en prevenir la contaminación y a proteger el medio ambiente y la salud humana con el fin de contribuir al desarrollo sostenible. Es así como contiene numerosas disposiciones en materia de contaminación del agua y de cumplimiento ambiental, tales como: la reducción al mínimo de los niveles perjudiciales de nutrientes vertidos a masas de agua para brindar protección a las aguas superficiales, en base al manejo de riesgos. Se aplica a aquellas sustancias tipificadas como tóxicas por la legislación, es decir, como sustancias que pueden causar daño a la salud humana y al medio ambiente (BCN, 2018).

La Ley de Pesca es la principal normativa a nivel federal para los programas de control de contaminantes en el agua, la cual protege las aguas superficiales con disposiciones relativas a la contaminación de las aguas y regula el depósito de sustancias nocivas en aquellas aguas que son hábitats de peces. En lo que respecta al recurso hídrico a nivel de la Provincias, éstas poseen normativas específicas generadas de acuerdo con los requerimientos particulares de cada región. Las provincias tienen poderes legislativos en las siguientes áreas: regulación de caudales, habilitación para la explotación de aguas, abastecimiento de aguas y lucha contra la contaminación. Todas las provincias y territorios han instaurado su propia legislación para proteger la calidad de las aguas. Además, los municipios están facultados por las autoridades provinciales para controlar la calidad del agua (BCN, 2018).

6.3.5 Marco ambiental federal

Con respecto al control ambiental de las plantas de celulosa y papel, el papel del gobierno federal abarca principalmente el control de las liberaciones de efluentes al agua en virtud de la Ley de Pesca y los contaminantes que han sido declarados tóxicos bajo la Ley canadiense de protección ambiental (CEPA) (OECD, 1997)

En 1992, el gobierno federal aprobó un marco nacional de regulación para la industria canadiense de la pulpa y el papel. Esto incluía reglamentos revisados en virtud de la Ley de Pesca; que imponía límites de descarga para la demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, equivalentes a los niveles alcanzados tras la instalación de plantas de tratamiento biológico secundarias bien diseñadas y operadas. Además, estaba prohibida la liberación de cualquier efluente que fuera agudamente letal para los peces. El Reglamento de 1992 actualizaba los reglamentos anteriores publicados en virtud de la Ley de Pesca de 1971. La normativa de 1971 sólo se aplicaba a las fábricas construidas después de 1971. Las regulaciones de 1992 se aplican a todas las plantas (Simons Consulting Group, 1994). El nuevo marco incluía dos reglamentos en virtud de la Ley canadiense de protección del medio ambiente. Uno, el Reglamento sobre dioxinas cloradas y furanos en las plantas de celulosa y papel, el cual requiere que las fábricas implementen medidas para prevenir la formación de dioxinas y furanos. El otro, el Reglamento sobre antiespumante y astillado de madera de pulpa y papel, impone requisitos de calidad para los antiespumantes utilizados en los procesos de blanqueamiento de cloro y prohíbe la fabricación de pulpa a partir de astillas de madera que han sido tratadas con fenoles policlorados. Anteriormente se utilizaban como agente anti-mancha en la industria maderera. La formación de dioxinas se produjo cuando en el proceso de fabricación de pasta se utilizaron astillas de madera derivadas de los extremos recortados de dicha madera tratada. Estos agentes anti-manchas han sido reemplazadas por otros productos químicos (OECD, 1999).

El desarrollo de las regulaciones federales involucró consultas con los ministerios ambientales provinciales a fin de asegurar que las regulaciones fueran compatibles con los planes provinciales. Un grupo de trabajo conjunto de las provincias federales se estableció bajo el Consejo Canadiense de ministros de Medio Ambiente (CCME) para desarrollar límites de control recomendados. Estos fueron luego sujetos a una consulta pública más amplia, bajo los requisitos de desarrollo regulatorio federal,

antes de su promulgación en 1992. Las regulaciones federales sirven como un estándar de referencia nacional. Las provincias pueden promulgar requisitos más estrictos según sea necesario para adaptarse a los requisitos locales (Simons Consulting Group, 1994).

A continuación, se presenta una tabla que muestra los límites de descarga para las ciudades de Quebec y Ontario en Canadá:

Tabla N°31: Parámetros medidas para los efluentes de plantas de celulosa en Quebec y Ontario, Canadá para proceso de celulosa Kraft.

Parámetro	Unidad	Quebec				Ontario	
		A1992 ⁽¹⁾		D1992 ⁽²⁾		Diario	Mensual
		Diario	Mensual	Diario	Mensual		
pH	-	6,0-9,5	6,0-9,5	6,0-9,5	6,0-9,5	-	-
Temperatura	°C	65	65	65	65	-	-
Hidrocarburos C10-C50	mg/L	2	2	2	2	-	-
2,3,7,8-tetraclorodibenzodioxina	pg/L	15	-	15	-	60ppq	
Bifenilos Policlorados PCB	µg/L	3	-	3	-	-	-
AOX	kg/ADt	0,7	1,5	0,3	0,25	1,03	0,8
SST	kg/ADt	16,0	8,0	5,3	3,0	13,4	7,8
DBO ₅	kg/ADt	7,1	5,0	3,6	2,5	10,0	5,0
Aluminio	mg/L	-	10	-	10	-	-
Cromo	mg/L	-	1	-	1	-	-
Hierro	mg/L	-	10	-	10	-	-
Mercurio	mg/L	-	0,05	-	0,05	-	-
Plomo	mg/L	-	0,3	-	0,3	-	-
Zinc	mg/L	-	1	-	1	-	-
Sulfuros totales	mg/L	-	1	-	1	-	-
Fenoles	µg/L	50	50	50	50	0,413g/ADt	0,413g/ADt
Ácidos grasos y resinicos	µg/L	300	300	300	300	-	-
Cloroformo	g/ADt	-	-	-	-	3,72	1,88
Fósforo total	Kg/ADt	-	-	-	-	0,28	0,17
Tolueno	g/ADt	-	-	-	-	0,215	0,215
Toxicidad -Rainbow Trout	-	LC 50 ≥100% ⁽³⁾	-	LC 50 ≥100%		LC 50 ≥100%	LC 50 ≥100%
Toxicidad- Daphnia magna	-	--		-	-	LC 50 ≥100%	LC 50 ≥100%

1. Tasa de producción referente a una planta de celulosa blanqueada con productos de cloro antes del 21 de octubre de 1992.

2. Tasa de producción referente a una planta de celulosa blanqueada con productos de cloro después de 21 de octubre de 1992, o que forma parte de un complejo ya existente.

3. La prueba LC 50, una muestra del organismo es testeado en 100% del efluente por un periodo

de 4 días. Para pasar la prueba, al menos la mitad de la muestra de los organismos debe sobrevivir.

Fuente: Elaboración propia en base a información recopilada de Environmental Quality Act, 2020.

6.3.6 Celulosa en Estados Unidos

Estados Unidos es el mayor productor de celulosa en el mundo. La producción nacional de papel y cartón fue de 83 millones de toneladas métricas en 2011 (Stuart, 2013). En 2014, la producción total de papel en el mundo fue de 406 millones de toneladas métricas y el consumo fue de 408 millones de toneladas métricas. La producción de papel es un proceso de uso intensivo de energía, que representa el 11% del uso total de energía industrial de EE. UU. en 2010 (Skogs Industrierna, 2016).

6.3.7 Normas en Estados Unidos de América

La Ley de Agua Limpia (CWA) es la principal ley federal que establece la estructura básica para regular los vertidos de contaminantes a las aguas de los Estados Unidos. El objetivo principal de la Ley Federal de Control de la Contaminación del Agua, comúnmente conocida como la CWA, es restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de las aguas superficiales de la nación. Los contaminantes regulados en el marco de la CWA, como se ve en la Tabla N°32, incluyen contaminantes "prioritarios", incluidos varios contaminantes tóxicos; Contaminantes "convencionales", como la demanda bioquímica de oxígeno (BOD), sólidos suspendidos totales (TSS), coliformes fecales, aceite y grasa y pH; y contaminantes "no convencionales", incluido cualquier contaminante no identificado como convencional o prioritario (OECD, 1999).

La ley de agua limpia establece a la Agencia de protección Ambiental (EPA) como el organismo que se encarga de aprobar los permisos de descarga y fija límites para el control de contaminantes esta se divide en diez regiones a lo largo del país. El contenido de los permisos se define en base a límites tecnológicos y requerimientos de calidad ambiental (OECD, 1999).

El Sistema Nacional para Eliminación de Descarga de Contaminantes (NPDES) es el programa que controla descargas de fuentes puntuales como de alcantarillado y fuentes industriales, estos permisos son emitidos por la agencia EPA o una autoridad estatal (OECD, 1999).

Para las descargas industriales, la Regulación 40, Partes 401 a 471, del Código de Regulaciones Federales (CFR) del NPDES, promulgó las Guías y Normas de Descarga de Efluentes (Effluent Guidelines and Standards) para 56 tipos de industrias. En el caso de las plantas de celulosa esta regulación específica los niveles máximos y mínimos de descarga basándose distintos conceptos como: mejor tecnología disponible MTD o BAT la cual incluye monitoreo de compuestos tóxicos y no convencionales, como se ve en el Anexo N°8, mejores prácticas de manejo (BMP) que incluye los límites para parámetros convencionales que se pueden ver en el Anexo N°9 y los estándares para nuevas fuentes(NSPS) que son usados para nuevas plantas basados en la mejor tecnología, los cuales varían, dependiendo del tipo de pulpa que se produce y la tecnología utilizada en el proceso (Tabla N°33) (EPA, 2021).

Tabla N°32: Parámetros regulados por la US EPA para las plantas de celulosa.

Categoría	Contaminante
Contaminantes convencionales	DBO5 Solidos Suspendidos Totales pH
Contaminantes prioritarios	2,4,6-triclorofenol Pentaclorofenol 2,3,7,8-tetraclorodibenzeno-p-dioxin (TCDD)
Contaminantes no convencionales	Compuestos orgánicos adsorbibles(AOX) Cloroformo Triclorosiringol 2,4,5-triclorofenol 3,4,5-triclorocatecol 3,4,5-tricloroguaiacol 3,4,6-triclorocatecol 3,4,6-tricloroguaiacol 4,5,6-tetracloroguaiacol 2,3,4,6-tetraclorofenol Tetraclorocatecol Tetracloroguaiacol 2,3,4,6-tetraclorofenol

Fuente: EPA, 2000.

Tabla N°33: Límites para efluentes de descarga de nuevas plantas de celulosa con mejor tecnología existente (NSPS)(BAT).

Contaminante	Unidad	Límite Máximo en 1 día	Promedio mensual	Punto de cumplimiento
DBO	Kg/ADt	15,45	8,05	Efluente final
SST	Kg/ADt	30,4	16,4	Efluente final
pH	-	5,0 – 9,0	5,0 – 9,0	Efluente final
2,4,6 - triclorofenol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
Pentaclorofenol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,3,7,8-tetraclorodibenzeno-p-dioxin (TCDD)	ug/L	10	NE	Efluente de planta de blanqueo
Compuestos orgánicos adsorbibles(AOX)	kg/ADT	0,476	0,272	Efluente final
Cloroformo	g/ADT	6,92	4,14	Efluente de planta de blanqueo
Triclorosiringol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,4,5- triclorofenol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,5- triclorocatecol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,5-tricloroguaiacol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,6-triclorocatecol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo Efluente de planta de blanqueo
3,4,6-tricloroguaiacol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
4,5,6-tetracloroguaiacol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
Tetraclorocatecol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
Tetracloroguaiacol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,3,4,6-tetraclorofenol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,3,7,8-tetraclorodibenzofuran (TCDF)	pg/L	10	NE	Efluente de planta de blanqueo

NE: No especifica

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de ECFR, 2021.

En las tablas siguiente (Tabla N°34,35 y 36) se compara la estructura de la legislación para descargas de efluentes, parámetros y límites de descarga para Chile, Canadá, Estados Unidos y Suecia.

Tabla N°34: Resumen de las practicas permitidas para los efluentes.

País	Regulación de efluentes	Autoridad administrativa	Proceso de toma de decisiones
Chile	Nacional	Ministerio de Medio Ambiente Super Intendencia de Medio ambiente SEA	Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental caso a caso y limites normativos.
Suecia	Nacional	EPA Sueca Tribunales ambientales	Caso a caso en base a MTD.
Canadá	Federal y Provincial	Gobierno Federal/Provincial	Regulaciones entregan valores máximos permisibles según la provincia, pero se pueden requerir limites más estrictos basado en objetivos de calidad ambiental.
Estados Unidos	Federal	Gobernación estatal como delegado y Oficinas Regionales de EPA.	Regulaciones entregan valores máximos basados en mejor tecnología disponible (MTD) y tipo de proceso, pero puede ser más estrictas dependiendo de los objetivos de calidad ambiental.

Fuente: Elaboración propia en base a OCDE, 1999, BCN, 2020.

Tabla N°35: Parámetros que son controlados en los diferentes países estudiados

País	DBO ₅	DQO	SST	AOX	D&F	N	P	pH	Temp	Color	Toxicidad
Chile	✓	-	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	-
Canadá	✓	-	✓	✓	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	✓	✓	✓	✓
EE. UU.	✓	-	✓	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-
Suecia	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-

(1): Dependiendo de la provincia se fijan límites.

✓: parámetro incluido en los límites de descarga.

-: Límites no fijados para estos parámetros.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N°36: Cuadro comparativo límites de descarga de efluente diario para principales contaminantes de plantas de celulosa.

Contaminante	Chile	Estados Unidos	Canadá	Suecia
DBO₅	D.S. N°90: Ríos SCD: 35 mg/L Ríos CCD: 300 mg/L	PKPM ⁽¹⁾ :15,45 kg/ADt PKCT ⁽²⁾ : 13,65 kg/ADt PKPF ⁽³⁾ : 13,7 kg/ADt	Quebec: A1992: 5,0 kg/ADt D1992: 2,5 kg/ADt Ontario: 5,0 kg/ADt	9,3 – 12,6 kg/ADt(promedio anual)
Sólidos Suspendidos totales	D.S. N°90: Ríos SCD: 80 mg/L Ríos CCD: 300 mg/L	PKPM ⁽¹⁾ :30,4 kg/ADt PKCT ⁽²⁾ : 24 kg/ADt PKPF ⁽³⁾ : 24,5 kg/ADt	Quebec: A1992: 8,0 kg/ADt D1992: 3,0 kg/ADt Ontario: 7,8 kg/ADt	1,0 – 3,8 kg/ADt
pH	6.0 – 8,5	5,0 – 9,0	6,0 – 9,5	-
DQO	-	-	-	37-87 kg/ADt
Compuestos orgánicos absorbibles (AOX)	-	0,951 kg/ADt	Quebec: 0,25 kg/ADt Ontario: 1,03 kg/ADt	0,1-0,2 kg/ADt
Ácidos resínicos	-	-	Quebec: A1992: 300 µg/L D1992: 300 µg/L	-
Fenoles	D.S. N°90: Ríos SCD: 0,5 mg/L Ríos CCD: 1 mg/L	-	Quebec: A1992: 50 µg/L D1992: 50 µg/L Ontario: 0,413 g/ADt	-
Fósforo Total	D.S. N°90: Ríos SCD: 10 mg/L Ríos CCD: 15 mg/L		Ontario: 0,17 kg/ADt	100-200g/ADt

(1): Planta Kraft para pulpa blanqueada para mercado.

(2): Planta Kraft para cartón, papel grueso y papel tisú.

(3): Planta Kraft para pulpa y papel fino.

Fuente: Elaboración propia en base a ECFR, 2021, Environmental Quality Act, 2020, Swedish Environmental Protection Agency, 1992 y BCN, 2020.

6.3.8 Análisis derecho comparado descarga de efluentes en plantas de celulosa Kraft entre los países de Chile, Suecia, Canadá y Estados Unidos.

A partir de la legislación previamente estudiada y el análisis de las tablas comparativas, se puede observar que cada país tiene sus propias instituciones y formas de regular las descargas de plantas de celulosa. En el caso de Chile que se caracteriza por tener una norma de emisión para el control de descarga de efluentes que funciona para todo tipo de industria y dentro de todo país, mientras que otros países como Canadá regulan sus descargas con normativas que dependen de un gobierno federal propio para cada ciudad, así es, como en el caso de las ciudades de Quebec y Ontario, si bien ambas ciudades son de Canadá, cada una cuenta con sus propios límites de descargas para cada parámetro y en el caso de la ciudad de Quebec haciendo una distinción entre las plantas construidas antes del año 1992 y después de 1992. Si bien, los países estudiados tienen una guía en cuanto límite de efluentes, para cualquier situación es necesario hacer un estudio caso a caso dependiendo de la situación geográfica de la planta y las características del lugar de implementación, así, hay casos en que las agencias regulatorias EPA en estados unidos reducen los niveles de descargas permitidos para DBO en meses de verano, debido a que en esta época el agua es más cálida que en otros meses disminuyendo el oxígeno disuelto y también por que usualmente en verano la cantidad de agua disminuye significativamente. Junto a esto también se debe tener en cuenta los objetivos de calidad de aguas del cuerpo receptor, que en el caso de la cuenca del río Biobío sería la norma secundaria de calidad ambiental estudiada en el capítulo anterior.

En la mayor parte de los países estudiados los límites de descargas se fijan en unidad de carga de contaminación, lo que es la cantidad de masa descargada permitida por toneladas de pulpa seca producida al aire. En el caso de Chile los límites establecidos en D.S.90/2001 se encuentran en unidad de concentración, lo que hace una difícil comparación al no tener un caudal y una producción diaria específica para hacer la conversión requerida.

Otro de los hechos más importantes al comparar las distintas normativas, es en el caso de la normativa chilena la falta de parámetros de suma importancia en las plantas de celulosa como son los compuestos orgánicos halogenados (AOX). Los cuales internacionalmente, debido a su toxicidad, han sido un importante objeto de atención. Incluso la norma de estados unidos hace una regulación específica para el efluente de la planta de blanqueo de estos como se ve en la tabla N°33. Al comparar los límites establecidos para AOX se observa que Suecia es el país con los límites de descarga más estrictos.

Si bien, la normativa para descarga de efluentes D.S. 90/2001 tiene sus diferencias en cuanto a la de los demás países, esto se ve compensado con el sistema de evaluación de impacto ambiental el cual mediante una resolución de calificación ambiental (RCA) con estudio de impacto ambiental o declaración de impacto ambiental, pueden exigir mediciones de parámetros que no están en el D.S 90/2001 como son los AOX y el color. Esto se ve reflejado en los Anexos N°6 y N°7 en los cuales muestra tras la aprobación de la resolución de calificación ambiental, las empresas CMPC se comprometen a un seguimiento de distintos parámetros ambientales que no aparecen en el D.S. 90/2001.

Es importante señalar que el D.S 90/2001 se encuentra en revisión ya que durante los años de vigencia de esta norma de emisión se ha generado un diagnóstico sobre la necesidad de efectuar modificaciones para su adecuada interpretación, implementación y control, además de la necesidad de incorporar nuevas herramientas dirigidas al mejor cumplimiento de su objetivo. El análisis general de impacto económico y social (AGIES) del anteproyecto estimó que los beneficios de reducir las emisiones y mejorar la calidad de agua está directamente vinculado con la mantención de los servicios ecosistémicos que ofrecen bienestar y confort al ser humano y animales. Por lo que se espera que en unos años la norma sea más estricta e incluya nuevos parámetros.

6.4 Resultados Objetivo específico 4: Describir el estado del arte de las mejores tecnologías disponibles asociadas a la generación de efluentes líquidos en la Industria de Celulosa

Desde la década de 1950, el proceso Kraft se ha convertido en el método de producción dominante en la producción de celulosa en el mundo. En general, el concepto fundamental detrás de la generación de pulpa Kraft se ha mantenido igual, a saber, eliminación de lignina de la materia prima con liberación simultánea de fibras por medio de productos químicos. Sin embargo, durante su evolución ha experimentado algunos avances significativos, dando lugar a importantes modificaciones en su proceso productivo. Teniendo en cuenta la preocupación por la degradación del medio ambiente por la sociedad en la década de 1960, alteró en gran medida las condiciones de la industria del mundo occidental y la industria de celulosa y papel se ha encontrado con problemas más serios que la mayoría de las otras industrias (Alén, 2000). La razón es que la producción de pulpa y papel, especialmente la fabricación de pulpa blanqueada es extremadamente perjudicial para el medio ambiente. Por lo tanto, las fábricas de pulpa causan, entre otras cosas, emisiones de gases olorosos y compuestos de azufre en el aire y de productos químicos orgánicos e inorgánicos, incluidos compuestos clorados y otras sustancias en vías fluviales. Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos, la situación medioambiental ha mejorado considerablemente durante las últimas cinco décadas con una reducción de las emisiones; en muchos casos la reducción ha sido superior al 90% (Särkkä, 2018).

6.4.1 Mejor tecnología disponible asociada a generación de efluentes líquidos

El proceso productivo de la celulosa Kraft es bastante complicado e integra muchas áreas de proceso entre las que incluye preparación de madera, pulpaje o cocción, lavado, blanqueamiento y creación de papel para convertir la madera en el producto final. Las opciones del proceso y el tipo de madera que se procesara son usualmente determinados por el producto final (Bajpai, 2015).

Antes de 1985, generalmente solo existían límites preestablecidos de descarga para parámetros convencionales como demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO) y Sólidos suspendidos totales (SST). Así como también, las investigaciones y el desarrollo tecnológico eran enfocados principalmente a la tecnología para el tratamiento de agua. A medida que se hacían más investigaciones, los científicos se percataron que al disminuir el número kappa dentro del proceso de celulosa antes de la etapa de blanqueamiento, producirá una importante reducción de los químicos requeridos en la planta de blanqueamiento y por ende, una importante reducción en los contaminantes de los efluentes de las plantas de celulosa. Debido a esto las tecnologías desarrolladas con el fin de disminuir la carga contaminante de los efluentes apunta hacia la integridad del proceso productivo y no solo al tratamiento del efluente final (Särkkä, 2018).

6.4.2 Descortezado en seco

El descortezado de los troncos suele ser la primera etapa de proceso en fábricas de pulpa y papel. Se requiere el descortezado para separar la corteza de la madera, debido a muchos efectos adversos en las siguientes etapas del proceso (Niiranen, 1985).

La corteza del árbol comprende aproximadamente el 10 % del peso del tronco del árbol. La corteza es resistente a la pulpa, contiene un alto porcentaje de extractivos y retiene la suciedad. Por lo tanto, no produce un buen material de fabricación de papel. En la mayoría de los procesos de pulpa, la corteza se elimina de los troncos antes de que se sometan a astillamiento. El descortezado en tambor es lo que se ocupa más comúnmente, lo que elimina la corteza al golpear los troncos entre sí en un cilindro grande. Las ranuras en el exterior del tambor permiten que la corteza removida caiga a través de este. La corteza recogida de estas operaciones generalmente se alimenta a la caldera de combustible acaparado para generar calor de proceso o vapor. Los descortezadores húmedos giran troncos en una piscina de agua y eliminan la corteza golpeando el tronco contra el lado de un tambor mediante el uso de grandes volúmenes de agua. El agua utilizada en este proceso se recicla;

pero una cierta cantidad se pierde como desbordamiento para llevar la corteza removida (Nordic Council of Ministers, 1993).

El efluente del proceso de descortezado es tóxico para la vida acuática. Los compuestos orgánicos como ácidos de resina, ácidos grasos y materiales de gran color se lixivian fuera de la corteza y entran en esta corriente de aguas residuales. Esta corriente de efluentes se recoge y se enruta al sistema de tratamiento de aguas residuales, donde los contaminantes normalmente se eliminan de manera bastante eficaz mediante el uso de los procesos biológicos que tienen lugar allí (Nordic Council of Ministers, 1993).

Para el caso de los métodos de descortezado en seco, como los descortezadores de tambor seco, eliminan la corriente de agua y los contaminantes asociados a ella. El descortezado seco se ha apoderado gradualmente de la tecnología de descortezado. En el descortezado seco, el consumo de agua y, por lo tanto, las emisiones de sustancias orgánicas son mucho menores (Bajpai, 2015).

Con el descortezado en seco, el volumen de aguas residuales de manipulación de madera suele estar en el rango de 0,5–2,5 m³/ADt. La disminución en el monto de las aguas residuales se obtiene mediante el aumento de la circulación interna de agua. Al cambiar de descortezado húmedo a descortezado en seco, la cantidad de aguas residuales disminuiría a menudo en 5-10 m³ /ADt. Con el descortezado en seco, la carga total de DQO puede reducirse hasta un 10 %, además de reducir la DBO, SST, ácidos de resina y ácidos grasos que salen de la corteza (Salo, 1999). La mayor sequedad de la corteza en la alimentación de la caldera mejora la eficiencia energética. El consumo de energía en el descortezado puede aumentar debido al funcionamiento del tambor de descortezado en modo de descortezado seco. Por otro lado, se puede obtener una cantidad sustancial de energía, si la corteza se utiliza como combustible auxiliar con menor contenido de agua (Bajpai, 2015). En la siguiente tabla N°37 se comparan la carga contaminante para las distintas técnicas de descortezado.

Tabla N°37: Carga contaminante de efluentes de descortezado húmedo y descortezado en seco antes de planta de tratamiento.

Técnica de descortezado	Flujo efluente (m ³ /ADt pasta)	de de	DBO5 (Kg/ADt pasta)	de de	DQO (kg/ADt pasta)	de de	Tot-P (g/ADt)
Descortezado húmedo y prensa de corteza	3-10		5-15		20-30		25-35
Descortezado seco y prensa de corteza	0,5-2,5		0,5-2,5		1-10		10-20

Fuente: European Commission, 2013.

6.4.3 Cocción extendida o modificada

Como se sabe la disminución de la lignina antes de la planta de blanqueo es clave para la mejora medio ambiental en términos de descarga de efluentes, ya que, a menor cantidad de lignina residual en la pulpa, se usará una menor cantidad de productos químicos blanqueadores, la lignina residual usualmente es medida con el número Kappa mediante métodos estandarizados. En el caso del proceso de digestión convencional existen limitaciones en cuanto puede disminuir el número kappa sin perjudicar la calidad de la pulpa. En el método de cocción convencional el número Kappa es alrededor de 30 – 32 para maderas blandas y 18-20 para maderas duras. Por otro lado, usando métodos distintos métodos para modificar la digestión se puede llegar hasta 18 – 22 para maderas blandas y 14 – 16 para maderas duras (Bajpai, 2015).

La cocción modificada se refiere a una variedad de técnicas que se han desarrollado en las últimas dos décadas para modificar las condiciones en los digestores Kraft para que el número Kappa se pueda reducir minimizando la pérdida de propiedades y rendimiento de resistencia. La deslignificación extendida a través de la cocción modificada utiliza el principio de perfilado de concentración alcalina. La concentración alcalina se mantiene más baja al principio de la cocción (en impregnación) y se incrementa hacia el final de la cocción. Esto permite que la cocción reduzca el contenido residual de lignina sin degradación indebida de los

carbohidratos o pérdida excesiva de resistencia de la pulpa, reduciendo así la demanda de químicos en la planta de blanqueo y su carga ambiental. La Tabla N°38 muestra los principios de cocción modificados. Estos principios se aplican de diferentes maneras y en varios grados en caso de cocción continúa modificada (MCC) y cocción por lotes modificada (MBC) (Bajpai, 2015).

Tabla N°38: Principios generales de cocción modificada o extendida

Principio	Descripción
Concentración álcali baja y uniforme(perfilado)	En las fases iniciales de la cocción se evita una alta concentración de álcali, previniendo así una excesiva disolución de carbohidratos. Y a medida que avanza el proceso de cocción esta debe ir aumentando para asegurar la deslignificación.
Concentración de sulfato alta en etapa Bulk	La concentración de sulfato tiene una gran relevancia en la etapa Bulk de la cocción, ya que aumenta la tasa de deslignificación.
Baja concentración de lignina disuelta	-
Baja temperatura de cocción	Esto es principalmente importante en la etapa inicial y residual de la cocción.
Mayor tiempo de cocción	El aumento en el tiempo de cocción induce una mayor selectividad de cocción.

Fuente: Elaboración propia mediante información recopilada de Suhr, 2015.

6.4.4 Digestores Batch

En los sistemas de cocción Batch, los procesos se basan en técnicas de desplazamiento de licor de cocción. Estos sistemas incluyen una etapa de impregnación de licor negro con el fin de disminuir el consumo de calor y la concentración inicial de sulfuro al mismo tiempo y para disminuir la carga efectiva de álcali. Estos sistemas por lotes han evolucionado para combinar las tecnologías actuales en un solo método de cocción (Baipaj, 2010).

DualC y Continuous Batch Cooking (CBC) son las últimas tecnologías de cocción Batch. El concepto básico de estas tecnologías radica en la preparación de todos los licores relacionados con el proceso en recipientes separados. Durante la circulación, las condiciones requeridas, como las concentraciones alcalinas y la temperatura, se ajustan mediante la adición continua de productos químicos de cocción y vapor. El digestor está lleno de licor negro y luego está impregnado de

presión con perfiles alcalinos. Después de la impregnación, se implementa el desplazamiento de licor caliente con perfil de álcali y a temperatura de cocción para el calentamiento y la cocción del digestor. Luego de terminada la cocción, el digestor es desplazado y enfriado con el filtrado de lavado y descargada (Suhr, 2015).

6.4.5 Digestores continuos

Los digestores continuos son lo que más se utilizan en la pulpa Kraft moderna a nivel global. La cocción Kraft continua fue el estándar hasta la década de 1980, pero a mediados de la década de 1980, se produjo el avance de la cocción Kraft continúa modificada y la tecnología se ha desarrollado aún más (Johansson, 1984).

Las técnicas de cocción continua de última generación (por ejemplo, Lo-Solids y Compact Cooking) incluyen algunos de los principios antes mencionados. El método de cocción compacta se basa en la mejora de la selectividad de la deslignificación manteniendo las concentraciones de los iones de hidróxido y sulfuro de hidrógeno tanto en las fases iniciales como en la fase Bulk, lo más altas posible. En consecuencia, la reacción de la fase residual avanza más lentamente con la lignina residual y por lo tanto se puede esperar un mayor rendimiento de pulpa. A través de la impregnación de licor negro, el proceso de cocción compacta mejora la flexibilidad de cocción. La impregnación de licor negro se logra reciclando el licor de cocción final, que contiene una concentración adecuada de álcalis y sulfuros. Las ventajas ambientales potenciales de este método de cocción son una mayor tasa de deslignificación, preservación del rendimiento, menor contenido de rechazo, mayor blanqueamiento de la pulpa, menor temperatura del digestor, menor consumo químico de cocción y blanqueo (Suhr, 2015).

Con el método Lo-Solids, la cantidad y concentración de sólidos de madera disueltos en las fases Bulk y residuales se mantienen al mínimo, manteniendo una distribución radial uniforme de la temperatura y los productos químicos para el pulpaje, un perfil alcalino uniforme a lo largo de la altura del recipiente de cocción, concentraciones mínimas de lignina disuelta al final del proceso de cocción y

temperaturas mínimas de cocción. Esto se logra mediante la extracción de licor de cocción de múltiples puntos del digestor, mientras se repone con licor fresco con el fin de mantener el perfil alcalino necesario y satisfacer los parámetros hidráulicos requeridos. Las ventajas ambientales potenciales de este método de cocción son un aumento marginal de la tasa de deslignificación, menor temperatura en el digestor y un menor uso de químicos en la etapa de blanqueo (Gustavsson, 2006).

6.4.6 Lavado mejorado de pulpa y depuración de pasta cruda en ciclo cerrado

Aproximadamente la mitad de la madera se disuelve en el digestor. La pulpa procedente del digestor contiene fibras y licor de cocción utilizado (licor negro). El licor negro contiene productos químicos inorgánicos y una gran cantidad de compuestos orgánicos que contribuyen a la DBO, DQO, color y conductividad en el efluente. El licor negro de la pulpa se retira en las etapas de lavado posteriores y se alimenta al sistema de recuperación química, donde se recuperan los productos químicos de cocción y la energía. Los compuestos orgánicos disueltos junto con los productos químicos de cocción gastados se separan de las fibras de celulosa en las etapas de lavado de la pulpa cruda (Bajpai, 2010). Los principales objetivos en el lavado de la pulpa cruda son lograr:

- La pulpa más limpia mientras se utiliza la cantidad mínima de agua.
- Una alta concentración de sólidos en el licor negro débil alimentado a los evaporadores.

En la pulpa química, la razón principal para el lavado de la pulpa es eliminar las impurezas solubles utilizando una cantidad mínima de agua (ya que esta agua debe evaporarse más adelante). La pulpa también se lava para recuperar valiosos productos químicos de cocción y productos químicos orgánicos, que se recuperan por su valor de calentamiento. El lavado eficiente mejora la recuperación de los productos químicos gastados, reduce el consumo de reactivos en el blanqueamiento posterior y limita la carga de efluentes de la planta (Tervola, 2007).

La etapa de lavado consiste en una combinación de dilución sucesiva y engrosamiento o desplazamiento. En la práctica, cada combinación de equipos de lavado hace uso de estos métodos en diferentes proporciones. Hay una variedad de equipos de lavado de pulpa disponibles, los más típicos son filtros de vacío o tambor presurizado, arandelas tipo Fourdrinier, arandelas difusores atmosféricas y presurizadas y prensas de lavado. De ellos, las prensas de lavado y tambores presurizados o arandelas difusas representan el mejor rendimiento. La pérdida del lavado tradicional o prensa es de 10 kg DQO/Adt para una operación satisfactoria de las próximas etapas. En el caso de los sistemas de lavado eficiente aumenta la consistencia de la pulpa en un 25-35% y una disminución de la demanda de agua desde 9 m³/Adt a aproximadamente 4 m³/Adt (Tervola, 2007).

El sistema de agua en la depuración de la pasta sin blanquear puede ser completamente cerrado, lo que es una realidad para la mayoría de las fábricas europeas. Con la manipulación y cocción de madera moderna, menos del 0,5 % de nudos, se dejan en la pulpa después de la cocción. El cierre contribuye a la reducción de compuestos orgánicos en los efluentes y luego se recuperan e incineran en la caldera de recuperación. La idea es llevar la contracorriente de agua limpia a través de la línea de fibra, lo que aumenta gradualmente el contenido de sólidos secos del licor (Kapanen y Kuusisto, 2002).

6.4.7 Deslignificación con oxígeno

La deslignificación del oxígeno implica una extensión de la deslignificación iniciada en el proceso de cocción y proporciona a la planta blanqueadora una pulpa con un número Kappa reducido. La deslignificación del oxígeno mejora significativamente la eficiencia del proceso de blanqueamiento y puede acortar una secuencia de blanqueo siempre que se utilice un lavado eficaz después de la etapa de oxígeno. Debido a que menos lignina entra en la planta de blanqueamiento, hay una disminución significativa en el consumo de productos químicos blanqueadores y una reducción en el costo porque el oxígeno es menos costoso que el dióxido de cloro y el peróxido de hidrógeno (Genco et al, 2012). La deslignificación de oxígeno, se

realiza como la primera etapa de blanqueamiento después de la cocción Kraft para reducir el número de kappa en un 45-65 %. El efluente de la etapa de oxígeno se puede recuperar y llevar a la caldera de recuperación mediante la integración de la etapa de oxígeno en el sistema de lavado de pulpa cruda. La etapa de deslignificación de oxígeno es una forma más selectiva de deslignificar la pulpa que de extender la cocción a números bajos de Kappa (McDonough, 1996).

Un ejemplo de deslignificador con oxígeno moderno de dos etapas, es el sistema "OXITRAC". El diseño OXYTRAC utiliza dos etapas del reactor (ver Fig N°31). El primero funciona a alta carga química y presión (8-10 Bar) pero a temperatura relativamente baja (85 °C) y con una retención corta (20-30 min). La alta presión se utiliza para mantener alta la concentración de oxígeno disperso. El segundo reactor funciona a menor concentración química y presión, pero con mayor temperatura (100 °C) y una retención más larga (60 min). Sólo se añade vapor directo para calentar la mezcla entre los reactores (Alejandro y Saldivia, 2003).

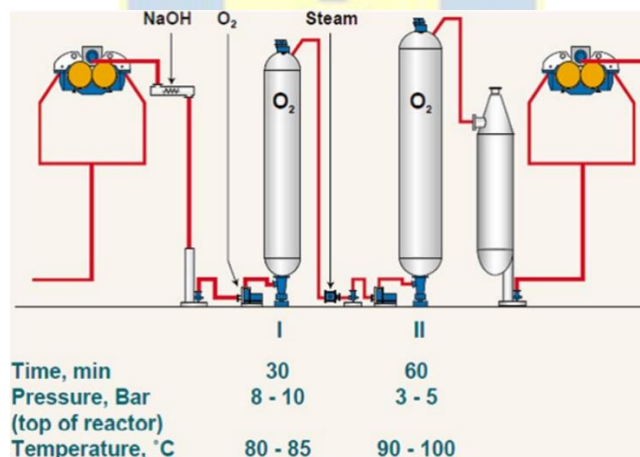


Figura N°31: Sistema típico OXYTRAC de dos etapas.
Fuentes: Alejandro y Saldivia 2003.

Los químicos aplicados a la pulpa y los compuestos removidos de la pulpa son compatibles con el sistema de recuperación del proceso Kraft. Esto permite que el efluente de la etapa de deslignificación con oxígeno sea reciclado por medio de los lavados de alta eficiencia, disminuyendo notablemente el potencial impacto

ambiental de la planta de blanqueo. La disminución es proporcional a la cantidad de deslignificación lograda en la etapa de oxígeno. Esto no solo aplica para productos organoclorados, sino que también para otros parámetros ambientales asociados a la planta de blanqueo como DBO, DQO y color (Johnson, 2008).

Las plantas de celulosa modernas suelen ser diseñadas con una combinación de tecnologías de cocción modificada con deslignificación con oxígeno donde ambas técnicas se suelen implementar juntas (Bajpai, 2015). En la siguiente tabla N°39 presenta los números kappa actualmente alcanzados con diferentes tecnologías de deslignificación y ofrece una comparación aproximada de las cargas de efluentes que se esperan con y sin delignificación extendida.

Tabla N°39: Efectos de las diferentes tecnologías de deslignificación en el número kappa y el efluente de DQO.

Tecnología de deslignificación	Cocción convencional	Cocción convencional + deslignificación con oxígeno	Cocción modificada o extendida	Cocción convencional + deslignificación con oxígeno
Numero Kappa (madera blanda)	14-22	13-15	14-16	8-10
Numero Kappa (madera dura)	30-35	18-20	18-22	8-12
Carga DQO (kg/Adt) Madera dura	28-44	26-30	28-32	16-20
Carga DQO (kg/Adt) Madera blanda	60-70	36-40	36-44	16-24

Fuente: Bajpai, 2015.

6.4.8 Blanqueamiento ECF moderno

El objetivo del blanqueamiento es llegar a un nivel alto y estable de brillo. El blanqueamiento ECF (sin cloro elemental) es una secuencia blanqueadora sin el uso de cloro elemental, es decir, gas cloro (Cl₂). En el blanqueamiento de ECF, el dióxido de cloro (ClO₂) suele ser el principal agente blanqueador. La eliminación de lignina mediante blanqueamiento se lleva a cabo en varias etapas, las dos primeras etapas liberando y extrayendo principalmente lignina y las etapas posteriores eliminando los residuos de lignina y terminando el producto. Una planta

de blanqueamiento consiste en una secuencia de etapas de blanqueamiento separadas con diferentes productos químicos o una combinación de productos químicos añadidos (Suhr, 2015).

En la Tabla N°40 se muestran ejemplos de secuencias de blanqueamiento ECF modernas típicas. Las secuencias, incluidas sólo las etapas D y E, se denominan "ECF recto", mientras que las que incluyen D en combinación con P y (PO) se denominan "ECF light" y "superlight ECF" (Bergnor-Gidnert, 2006).

Las etapas de blanqueamiento alternativas utilizadas para minimizar el consumo de dióxido de cloro en el blanqueamiento moderno del ECF incluyen una o una combinación de las siguientes etapas de blanqueamiento: oxígeno, etapa de hidrólisis de ácido caliente (Ahot), etapas de ozono (Z) en consistencia media y alta, etapas con peróxido de hidrógeno atmosférico (P) y peróxido de hidrógeno presurizado (PO) o el uso de una etapa de dióxido de cloro caliente (Dhot). El concepto de diseño final de una planta de blanqueo depende de las prioridades con respecto al costo de los productos químicos, los costos operativos, los rendimientos del proceso de blanqueo, la flexibilidad operativa y las restricciones específicas del proceso (Wennerström, 2002). La inclusión de etapas como la hidrólisis ácida, el peróxido presurizado, el ácido peracético y/o el ozono en las secuencias de blanqueo tienen como objetivo reducir el impacto ambiental (baja carga de ClO₂, bajo volumen de efluentes, baja carga de emisiones de DQO de la planta de blanqueo) y permitir el cierre parcial del circuito de aguas residuales de la planta de blanqueo). Estas secuencias de blanqueo satisfacen las demandas de calidad de la pulpa y la economía de la planta de blanqueo y dan lugar a que el proceso de blanqueamiento tenga un bajo impacto ambiental (Suhr, 2015).

El blanqueamiento de ECF es diferente para la madera blanda y la madera dura. Generalmente, para alcanzar un cierto objetivo de brillo, la madera dura requiere menos productos químicos que la madera blanda, lo que generalmente significa que el número de etapas de blanqueamiento puede ser menor (Wennerström, 2002).

Tabla N°40: Secuencias de blanqueamiento usadas en plantas de celulosa modernas.

Secuencias de blanqueamiento moderno	
OA = lavado ácido para remover elementos de la pasta D = Dióxido de cloro E= Extracción alcalina. EO = Extracción alcalina reforzada con oxígeno EP = Extracción alcalina reforzada con peróxido de hidrógeno EOP = Extracción alcalina reforzada con oxígeno y peróxido de hidrógeno. mP = Peróxido modificado O = Oxígeno P = Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) Paa = Acido peracético Q = agente quelante X = Xilanasa Z = Ozono ZD = Ozono y dióxido de cloro en la misma etapa.	O/OEDDP
	O/ODEP
	O/OADPZP
	O/OADED
	O/OADED
	O/OZEDD
	O/OADPZP
	O/OZDP
	O(OPDQ)(PO)
	OQ(PO)(DQ)(PO)
	OQXOP/ODEPDPaa
	O/O(Q)OPDPO
	OmPZPZP
O/O(Q)OP(Paa/Q)PO	

Fuente: Finnish Enviroment Institute, 2007.

Más recientemente, se ha aplicado una etapa de dióxido de cloro con una temperatura alta (típicamente por encima de 90 °C) y un largo tiempo de retención (Dhot), lo que resulta en reacciones de deslignificación más rápidas para el dióxido de cloro. En esta etapa, el dióxido de cloro reacciona primero y rápido con lignina pulpa y luego la pulpa queda sometida a las condiciones ácidas de hidrólisis que promueven la eliminación de HexA, aproximadamente 2 horas a temperatura por encima de 90 °C y pH bajo (Pikka, 2007).

El peróxido se puede aplicar en varias posiciones tanto en ECF como en TCF y secuencias de blanqueo. La optimización del proceso de blanqueo se lleva a cabo para ofrecer el mejor rendimiento tanto en términos de calidad de pulpa como de blanqueo (Pikka, 2007).

El ozono ocupa una posición única en toda la química involucrada en la fabricación de pulpa y papel. Como gas, producido sólo a partir de oxígeno, y volviendo al oxígeno como subproducto final, el ozono es un "super oxidante" ecoeficiente que necesita ser utilizado inmediatamente después de la generación. El ozono puede reaccionar en segundos a minutos en muchas de las sustancias que se encuentran en la pulpa y la fabricación de papel (Bajpai, 2015). El ozono es un potente agente oxidante para material ligno-celulósico. Para lograr un brillo comparativo con las etapas de cloro y extracción, se debe utilizar pulpa con bajo nivel de lignina después de pasar por una cocción extendida o deslignificación con oxígeno (Wennerström, 2002).

La adición de oxígeno a la pulpa en la extracción alcalina incrementa el efecto de blanqueo disminuyendo el consumo de químicos de cloro y, por lo tanto la carga contaminante. Cuando se añade peróxido se le designa etapa EOP. El uso de peróxido de hidrogeno, además reduce notablemente el color y también reduce parámetros como DQO, DBO y AOX. El blanqueo ECF es capaz de reducir 2,3,7,8-TCDD y 2,3,7,8-TCDF a niveles indetectables, sin embargo, la eliminación completa de las dioxinas en los efluentes blanqueados por ECF es una cuestión de número Kappa y pureza del ClO₂. Con un alto número de Kappa e impuro ClO₂ (es decir, alta concentración de Cl₂) aumenta la probabilidad de formar dioxinas. El blanqueamiento moderno de ECF también es capaz de prevenir los clorofenoles y la formación de cloroformos y reduce la formación de compuestos orgánicos clorados (AOX) (Pikka, 2007).

En las tablas N°41 y N°42 se muestra una comparación de las distintas secuencias de blanqueo y las correspondientes sustancias organocloradas, también se incluye una comparación con las demás técnicas estudiadas en los puntos anteriores, cocción modificada y deslignificación con oxígeno.

Tabla N°41: Ejemplo de secuencia de blanqueo para Pinus radiata.

Técnica de cocción	Secuencia de blanqueo	N. Kappa *	ClO ₂ (kg/t)	AOX (kg/t)
Cocción convencional	D(Eop)DED	30	95	2
Cocción convencional + deslignificación oxígeno	D(Eop)DED	16	60	0,8
Cocción modificada + deslignificación oxígeno	D(Eop)D(Ep)D	10	30	0,3
Cocción convencional + deslignificación oxígeno	ZD	-	10	0,1
Cocción modificada + deslignificación oxígeno	ZP	-	0	0

Fuente: RIADICYP, 2008.

Tabla N°42: Ejemplo de secuencia de blanqueo para Eucaliptus globulus

Técnica de cocción	Secuencia de blanqueo	N. Kappa *	ClO ₂ (kg/t)	AOX (kg/t)
Cocción convencional + deslignificación oxígeno	D(Eo)DED	13	40	0,5
Cocción modificada + deslignificación oxígeno	D(Eop)DED	10	30	0,3
Cocción convencional + deslignificación oxígeno	ZD	-	5	0,1
Cocción modificada + deslignificación oxígeno	ZP	-	0	0

Fuente: RIADICYP, 2008.

6.4.9 Blanqueamiento TCF

El blanqueamiento totalmente libre de cloro (TCF) es un proceso de blanqueamiento llevado a cabo sin ningún producto químico que contenga cloro, evitando así la generación de productos clorados en la pulpa y la corriente de aguas residuales. El blanqueo de TCF comenzó a practicarse a escala comercial en la industria del papel a partir de finales de la década de 1980. Sin embargo, los desarrollos previos a las diversas tecnologías TCF comenzaron mucho antes del siglo XX. En el blanqueamiento de TCF, se utilizan etapas de peróxido no presurizados (P) y presurizados (PO), la etapa de ácido peracético ligeramente ácido (Paa) y las etapas de ozono (Z). Los metales de transición contenidos en la pulpa se eliminan primero en una etapa quelante (Q). Alternativamente, la hidrólisis ácida puede eliminar metales sin el agente quelante convencional y en una amplia gama de pH.

La deslignificación del oxígeno (a menudo multietapa) siempre precede al blanqueamiento TCF (European Commission, 2013).

La curva de dosis-respuesta para el brillo frente al consumo de peróxido es bastante superficial en el brillo superior, lo que significa que incluso pequeñas perturbaciones en el número de Kappa entrante pueden resultar en costos de blanqueamiento bastante altos y la degradación de la pulpa debido a un bajo brillo (Suhr, 2015). Una posible opción de reducir el consumo de peróxido de hidrógeno es introducir una etapa de ozono en la secuencia en una posición antes de la etapa de peróxido (ZQP). El blanqueamiento de ozono también se utiliza para el blanqueo de ECF. El propósito principal del uso del ozono es proporcionar más poder de deslignificación. El ozono activa las fibras hacia el peróxido y esto se traduce en un mayor brillo y menor consumo de peróxido. El ozono es muy eficiente para reducir la cantidad de peróxido necesaria para obtener incluso niveles de brillo muy altos. Un inconveniente con el ozono es que, en cargas más grandes, tiene una tendencia a atacar las cadenas de celulosa (Hostachy, 2010).

Los perácidos están disponibles comercialmente en forma de, por ejemplo, ácido peracético (Paa). Este químico blanqueador es un valioso complemento en una etapa anterior a la de peróxido de hidrógeno donde puede reemplazar el ozono. El brillo completo se puede lograr incluso cuando la pulpa sin blanquear tiene un número de Kappa ligeramente más alto. El inconveniente con el ácido peracético es que su costo es bastante alto (Bajpai, 2015).

En el blanqueamiento TCF la formación de AOX no es detectable. En las plantas con tecnología TCF, el uso de ozono y otros productos químicos de blanqueo libres de cloro, hace que sea menos complicado cerrar las corrientes filtradas de las etapas de lavado, además de prevenir los flujos de aguas residuales perjudiciales para el medio ambiente donde se aplica la última tecnología, esta técnica también permite a las plantas con tecnología TCF reducir la demanda de agua dulce de aproximadamente 25 a 50 m³/ADt a 10 – 20 m³/ADt (Panchepakeshan y Hickman,

1997). Al eliminar el cloro del proceso de blanqueamiento, el blanqueamiento de TCF también elimina el riesgo ambiental inherente al almacenamiento de cloro y la preparación de dióxido de cloro (Bright, 2003).

En cuanto a la superioridad de esta tecnología, no logró diferenciarse de la ECF, por cuanto existe evidencia científica contundente que demuestra que los efluentes debidamente tratados de ambos métodos de blanqueo prácticamente están libres de contaminantes. Si bien el blanqueo TCF reduce la presión sobre las plantas de tratamiento del efluente, involucra inversiones mayores que el blanqueo ECF, debido a lo específico de los equipos requeridos (Tutus y Usta, 2004). El método TCF aún tiene algunos inconvenientes técnicos tales como mayor consumo de madera por tonelada producida de celulosa y también para lograrse la blancura estándar se sacrifica un porcentaje significativo de sus parámetros de resistencia (Bajpai,2015). Cabe destacar también que tanto la Comisión Europea como la EPA (Environmental Protection Agency) de Estados Unidos, han incluido la tecnología ECF; pero con sus debidos tratamientos de efluentes dentro de las denominadas mejores tecnologías disponibles (MTD) en la industria de la celulosa y el papel (Ruiz, 2008).

Hostachy, (2010), señala que, desde un punto de vista medioambiental, el enfoque debería centrarse menos en la técnica de blanqueo ECF o TCF y más en la combinación y eficiencia de un conjunto de técnicas como la cocción optimizada, los procesos de blanqueo y lavado, un tratamiento eficiente de las aguas residuales y el impacto general de la planta de celulosa (materias primas, consumo de energía y agua, impacto del efluente líquido).

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre los efectos de las tecnologías ECF y TCF:

Tabla N°43: Diferencias entre proceso de blanqueado ECF y TCF en distintas variables.

Variables	ECF	TCF
-----------	-----	-----

AOX (Compuesto orgánicos halogenados)	Se general algunos AOX desde la planta de blanqueamiento, pero sustancias distintas a esos producidos por cloro y no persistentes. Efluentes modernos reducen este contenido hasta niveles insignificantes.	No hay.
Peso molecular de los compuestos en el efluente	Generalmente compuestos con alto peso molecular (por lo tanto, menos tóxico) son detectados.	Compuestos con bajo peso molecular como glioxal y vainillina.
Toxicidad a corto plazo para una sola especie	Igual para las dos.	Igual para las dos
Toxicidad crónica para una sola especie	Ligeramente más bajo y por debajo del nivel de toxicidad de efluentes municipales.	Ligeramente más bajo y por debajo del nivel de toxicidad de los efluentes municipales.
Impacto ambiental general del curso de agua	TCF y ECF por igual y por debajo del nivel de toxicidad de efluente municipal.	TCF y ECF por igual y por debajo del nivel de toxicidad de efluente municipal.
Resultados de pruebas biológicas en el efluente que usan ECF Y TCF	TCF y ECF por igual	TCF y ECF por igual
Disrupción endocrina	Existe cierta cantidad de evidencia sobre sustancias que actúan como disruptores endocrinos en el efluente de ambos procesos, pero se creen que estos se originan desde la madera o químicos que se producen naturalmente y el impacto entre los dos procesos es indistinguible.	

Fuente: Bajpai, 2015.

6.4.10 Reciclaje de agua

En los últimos años, ha habido considerables incentivos para reducir la cantidad de agua utilizada por la industria de la pulpa y el papel, esto nace de la necesidad de reducir o eliminar la descarga de efluentes líquidos en el medio ambiente y las regulaciones introducidas para controlar la cantidad de sólidos suspendidos, residuos que consumen oxígeno y productos químicos tóxicos para la vida marina (Bajpai, 2010).

La industria posee distintas opciones en el momento de minimizar el uso de agua limpia. Estas opciones pueden ser control de derrames, modificaciones de proceso, reúso de agua, tratamiento parcial y reúso tratamiento completo y reciclaje (Bajpai 2015). El reciclaje del agua de la etapa de blanqueamiento en la última etapa de dióxido y otras etapas ácidas y desde la segunda etapa alcalina a la primera etapa

alcalina es practicado para reducir el volumen del efluente de la planta de blanqueamiento. Un sistema de blanqueo de circuito cerrado ha sido desarrollado en Suecia en el cual usa oxígeno en la primera etapa, luego peróxido de hidrógeno, ozono y pequeñas cantidades de dióxido de carbono en las etapas siguientes. Son doce etapas de blanqueamiento en el cual solo se agrega agua limpia en la última etapa, el agua vuelve a pasar por la pulpa y luego es evaporada (Siltala y Winberg, 1999).

Tipos de circuitos cerrados para reciclaje de agua:

- Condensados del evaporador son usados para el lavado de la pulpa cruda.
- Agua de refrigeración de la planta de dióxido de cloro se recicla para suministro de agua dulce.
- Los condensados del evaporador de licor se utilizan para rellenar el agua de alimentación de caldera, lavadores de lodo, lavador de horno de cal, lavado de escoria y requisitos para el patio de madera.

6.4.11 Eliminar los condensados contaminados y reutilizar los condensados en el proceso

Los condensados se pueden clasificar de la siguiente manera.

- Condensados primarios: condensados de vapor vivo que normalmente están lo suficientemente limpios como para ser reutilizados como agua de alimentación de la caldera (después del pulido).
- Condensados secundarios: condensados de vapor contaminados que se enjuagan de licor negro, suspensiones de pulpa, etc. Sólo la parte más sucia del condensado es despojada.

Los condensados se originan a partir del proceso de vapores de digestores y la planta de evaporación. En total, se forman entre 8 y 10 m³ /ADt de condensados totales con una carga de DQO de aproximadamente 20 – 30 kg/ADt y de 7 – 10

kg/ADt de DBO5. Normalmente, aproximadamente 1 m³ /ADt está muy contaminado, 4 m³ /ADt moderadamente contaminado y 4 m³ /ADt con un bajo nivel de contaminación (Sebbas, 1988).

La columna de desorción (stripping) puede ser una pieza separada del equipo o puede ser una parte integrada de la planta de evaporación. Los condensados se alimentan en la parte superior de la columna de desorción. El vapor o condensado vaporizado se eleva desde la parte inferior de la columna en una dirección de contracorriente hasta el condensado sucio. El vapor superior de la columna de desmontaje se envía a un condensador de reflujo donde se condensa parcialmente. El propósito del condensador de reflujo es condensar parte del agua y aumentar la concentración de material volátil en los gases que salen del condensador. Los gases no condensables del condensador contienen la mayoría de los compuestos volátiles que se eliminan en la columna de desorción. Son llevados a la incineración donde los compuestos orgánicos y TRS son destruidos por oxidación térmica (Sebbas, 1988).

Los condensados limpios están libres de metales y, por lo tanto, son particularmente útiles para el lavado en la planta de blanqueo, cuando se pretende cerrar esta parte del proceso. También se pueden reutilizar en lavado de pasta cruda, en la zona de cáustica (lavado y dilución de lodo, duchas de filtro de lodos), como licor de hornos de cal o como agua de recuperación de licor blanco. Esto significa que algunos condensados se utilizarán en partes cerradas del proceso y no se descargarán a los residuos. Otros condensados se utilizarán en sistemas abiertos, por ejemplo, la planta de blanqueo y terminarán en el efluente junto con aquellos condensados que no se reutilizan, sino que se descargan directamente a los residuos (Suhr, 2015).

Gracias a esta técnica se logra una reducción del consumo de agua, una reducción en la carga de material orgánico para la planta de tratamiento de agua y una reducción en emisiones de compuestos sulfurados (TRS) y metanol al aire (Suhr, 2015).

6.4.12 Tratamiento primario

Además de la sedimentación, la flotación se puede encontrar como una alternativa a algunas instalaciones de celulosa y papel para aclarar el efluente de la planta. Este método se conoce comúnmente como sistema de flotación por aire disuelto (DAF) (ver figura N°32). Tales dispositivos inyectan una corriente presurizada de agua saturada de aire en la base de una piscina poco profunda que contiene el agua de proceso de la planta de celulosa. Al reducir la presión, a medida que el agua inyectada se libera en la fuente, pequeñas burbujas de aire salen de la solución y comienzan a subir (Hubbe, 2016). A continuación, los sólidos pueden desprenderse de la superficie del agua. Se ha descubierto que las unidades DAF son rentables para el tratamiento de grandes flujos de agua que transportan una amplia gama de contenido de sólidos (300 a 5000 mg / L). El uso del sistema DAF es altamente dependiente de la capacidad de las partículas de mantenerse pegadas lo que se llama estabilidad coloidal. La forma más común para la desestabilización coloidal es la adición de materiales coagulantes, iónicos con carga opuesta y alto número de valencia y luego la adición de floculante para lograr una mayor aglomeración de partículas (Bolaño, 2009).

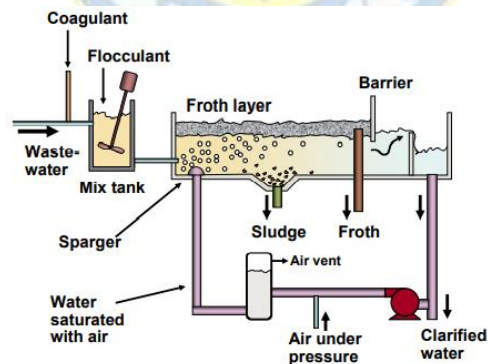


Figura N°32: Diagrama de unidad de operación de clarificador por aire disuelto (DAF).

Fuente: Elnakar, 2019.

6.4.13 Tratamiento aeróbico

En el tratamiento biológico aeróbico de aguas residuales, la carga biológicamente degradable se reduce en presencia de oxígeno por digestión por microorganismos, generando biomasa, dióxido de carbono y agua (Elnakar, 2019).

Después del tratamiento primario, generalmente realizado para proteger la planta de tratamiento biológico de cargas excesivas y contaminantes, el material biodegradable disuelto y coloidal en las aguas residuales se transforma por microorganismos en presencia de aire en sustancia de células sólidas (biomasa) y en dióxido de carbono y agua. Después de la biodegradación, la biomasa y el agua se separan normalmente utilizando tanques de sedimentación (la clarificación puede mejorarse mediante la floculación). Existen diferentes diseños de procesos, que pueden clasificarse en dos categorías principales: sistemas de lodos activados (como plantas de lodos activados de una o dos etapas o lagunas aireadas) y sistemas de biofilm (como reactores de biofilm de lecho móvil (MBBR) o biorreactores de membrana (MBR)). También se puede utilizar una combinación de sistema de membrana y sistemas de lodos activados (Elnakar, 2019).

La planta de lodos activados (ver figura N°33) consta de dos unidades principales, la zona de aireación y el clarificador secundario (zona de sedimentación). En la zona de aireación, el efluente se trata con un cultivo de microorganismos (los lodos activados), que están presentes en una alta concentración. El lodo está separado del agua en el clarificador. La mayor parte del lodo se recicla a la zona de aireación, que es necesaria para mantener alta la concentración de lodos. Una pequeña parte del lodo, correspondiente al crecimiento neto, se elimina del sistema como el exceso de lodos. La mezcla de oxígeno se proporciona a la laguna de aeración mediante equipos mecánicos de ventilación. Existen varios tipos de aireadores, como aireadores de superficie, aireadores de turbina sumergidos, aireadores de burbujas finas y aireadores de chorro (Elnakar, 2019). La base del proceso del reactor de biofilm de lecho móvil (MBBR) son los elementos portadores de biofilm que están hechos de polietileno. Los elementos proporcionan una gran superficie protegida

para el biofilm y condiciones óptimas para que el cultivo de bacterias crezca. Los cultivos bacterianos digieren los orgánicos solubles, maduran gradualmente y se desprenden de los portadores. Los cultivos forman una biopelícula natural que se puede separar fácilmente del agua (European Commission, 2013).

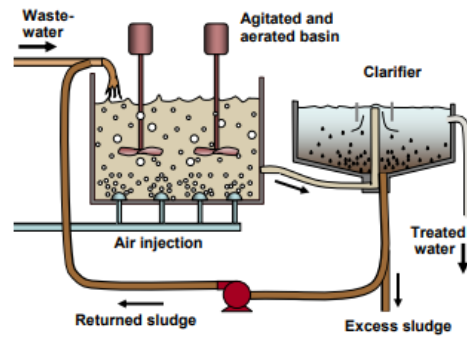


Figura N°33: Ilustración de un tratamiento de lodos activados, equipado con un clarificador y con recuperación de lodos.

Fuente: Elnakar, 2019.

Durante la última década se desarrollaron plantas compactas de efluentes de tratamiento biológico con el fin de reducir los volúmenes y disminuir el consumo de energía. Esto combina sistema de tratamiento de lecho móvil con lodos activados o "BAS" por su sigla en inglés (Biofilm Activated Sludge). La ventaja del portador de biofilm es que una gran cantidad de biomasa se mantiene en el portador y no tiene que circular a través de una cámara de sedimentación. Esta tecnología reduce el tiempo de retención en al menos un 50 % en comparación con las plantas tradicionales de lodos activados. La reducción de DQO es similar en todos los diferentes tipos de plantas de tratamiento con lodos activados; pero la producción de lodos es menor con las plantas BAS (European Commission, 2013).

El biorreactor de membrana (MBR) generalmente consiste en un biorreactor aireado, similar al proceso de lodos activados, combinado con un proceso de membrana para separar la biomasa del efluente. Existen dos configuraciones MBR básicas:

- Las membranas están sumergidas en el reactor y forman parte integral del reactor biológico (interno/sumergido).
- Las membranas son un proceso de unidad independiente después del reactor biológico (externo/corriente lateral).

El filtrado despejado de la etapa de membrana se puede reutilizar en el proceso y la biomasa separada se recircula al biorreactor. La alta calidad del filtrado hace que la tecnología MBR sea la más adecuada para su uso como tratamiento interno de circuitos de agua (Lozano, 2012). Para evitar la acumulación de sólidos en la superficie de la membrana, el sistema de membrana requiere en intervalos de tiempo definidos una limpieza mecánica o química. Esto se hace normalmente totalmente automático y se lleva a cabo directamente en el bioreactor MBR (no es necesaria la eliminación de membranas) (European Commission, 2013).

6.4.14 Tratamiento anaeróbico

En el tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales, la carga biológicamente degradable se reduce en ausencia de oxígeno mediante digestión por microorganismos que generan principalmente metano y dióxido de carbono (Lozano, 2012). El pretratamiento anaeróbico reduce la carga de contaminación orgánica de las aguas residuales, reduce el exceso de lodos generados en comparación con el tratamiento aeróbico independiente y utiliza el contenido energético inherente a la carga de contaminación orgánica (producción de biogás) (Bajpai, 2010). Durante el tratamiento anaeróbico se generan grandes cantidades de biogás con rangos entre 400 a 600 m³/t DQO removido y este biogás consiste principalmente en metano, dióxido de carbono y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrogeno, que luego es usado como combustible para la energía dentro de la planta, como sustituto de combustibles fósiles (Elnakar, 2019). Hay diferentes diseños de procesos disponibles. Los principales tipos de reactores aplicados son: reactor de cama fija, proceso de contacto de lodos, manta anaeróbica de lodos de flujo ascendente (UASB), manta de lodos granulares expandido (EGSB) y, más

recientemente, reactores de circulación interna (IC). En los reactores UASB y EGSB, las partículas de lodo se mantienen fluidizadas por el flujo hacia arriba. En los reactores IC, el gas producido en el sistema impulsa la circulación y mezcla de líquidos y sólidos en el reactor (Bajpai, 2010).

Las plantas de tratamiento anaeróbicos/aeróbicos combinadas han demostrado ser sistemas más estables con respecto a las cargas de DQO cambiantes y sustancias tóxicas o inhibitoras en el agua de proceso en comparación con las plantas de tratamiento aeróbicos independientes. El objetivo principal de los diferentes conceptos de reactores es garantizar una alta concentración de biomasa dentro de los reactores. Esto se logra ya sea reciclando biomasa lavada después de instalarse en un separador externo (sistema de reactor de contacto), o mediante la fijación de la biomasa a un soporte dentro del reactor (reactor de cama fija) o a través de la auto inmovilización, que produce biomasa granular (reactor UASB y EGSB). Los reactores pueden funcionar como unidades individuales o como unidades combinadas modulares (European Commission 2013).

En la siguiente tabla se muestra una comparación en la eficiencia de eliminación de los sistemas de tratamiento más utilizados en la industria de celulosa Kraft.

Tabla N°44: Eficiencia de eliminación de sistemas de tratamientos secundarios en efluentes de la industria de celulosa Kraft y papel.

Parámetro	Unidad	Lodo activado	Laguna aireada	MBBR
TRH	h	9,8-45,6	3,1-54,2	4,8 - 48
pH	-	7,5 ± 0,6	7,4 ±0,6	7,7 ±0,4
DQO	%	30,3 – 67,0	30,0 – 60,0	24,0-60,0
DBO	%	73,5 – 99,2	73,0 – 95,0	85,0-99,0
Fenoles totales	%	3,6	8,0 – 20,0	4,2-39,3
Nitrógeno total	mg/L	3,7 ±2,8	n.r	0,5 ±0,1
Fósforo Total	mg/L	6,5 ±3,5	n.r	0,7 ±0,2
Ácidos grasos volátiles	mg/L	1,9-256,1	n.r	16,6 – 35,0
Esteroles	mg/L	0,02-3,4	n.r	<0,0002
Esteroles	%	35-100	40 - 90	80,0 – 83,0

n.r: no registrado

Fuente: Jarpa, 2014.

6.4.15 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario se aplica normalmente para eliminar contaminantes que las medidas de tratamiento anteriores (por ejemplo, el tratamiento biológico) no pudieron eliminar o no pudieron eliminar lo suficiente, como el SST, el DQO, el nitrógeno o el fósforo. El tratamiento avanzado puede comprender técnicas como floculación/precipitación, biofiltración, membranas para filtración avanzada, ozonación, etc (Nurmesniemi, 2010). La floculación química de materia disuelta y suspendida genera flóculos separados por filtración o clarificador posterior. La precipitación química implica la adición de productos químicos para alterar el estado físico de los sólidos disueltos y suspendidos y para crear partículas/flóculos más grandes para facilitar su eliminación por sedimentación, o flotación. Diferentes sustancias se han utilizado como precipitantes. Las más comunes son sales de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y $\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3n-m}$), cloruro férrico (FeCl_3), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), sulfato ferroso (FeSO_4) o lima ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Para optimizar la floculación, se utilizan polielectrolitos en la fase de mezcla (European Commission, 2013).

En condiciones de ensayo controladas es posible eliminar entre el 30 y el 50 % del DQO no biodegradable del agua tratada biológicamente mediante coagulación química eficiente y que funcione bien. El tratamiento terciario puede ser una solución razonable cuando la carga de aguas residuales cambia significativamente durante diferentes estaciones y el rendimiento del tratamiento secundario (por ejemplo, una laguna aireada) es más pobre en comparación con una planta de lodos activados bien diseñada y operada.

Ej: Reducción de contaminantes obtenidas a partir de tratamiento terciario de planta de celulosa SE Varkaus (Nurmesniemi, 2010).

- SST 55%
- DQO 35%
- Fósforo 60%
- Nitrógeno 50%

En la siguiente tabla N°45 y figura N°34 se muestra una tabla resumen de las mejores tecnologías para plantas de celulosa Kraft en términos de descargas de efluentes, la tabla señala los principales beneficios medio ambientales que cada tecnología genera en cuanto a la descarga de efluentes.

Tabla N°45: Mejores tecnologías disponibles en el contexto de descarga de efluentes y mejora de efluente.

Tecnología	Beneficio relacionado a descarga de efluente
Descortezado en seco	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de flujo de efluente de 3-10 m³/ADt a 0,5-2,5m³/ADt • Disminución de DBO de 5 -15 kg/ADt a 0,5-2,5 kg/ADt • Disminución DQO de 20-30 kg/ADt a 1-10 kg/ADt • Disminución Tot-p DE 25-35 g/ADt a 10 – 20 g/ADt
Cocción modificada /extendida	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de numero Kappa • Disminución de carga de DQO • Disminución de carga de AOX • Disminución de uso de químicos en la planta de blanqueo
Deslignificación con oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de numero Kappa en un 45 -65% • Disminución de uso de químicos en la planta de blanqueo • Disminución de AOX • Disminución de DQO
Lavado mejorado de pulpa y depuración de pasta cruda en ciclo cerrado	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de DBO, DQO, Color, Conductividad en el efluente • Disminución de uso de agua • Mejora efluente para sistema de deslignificación con oxígeno • Disminución de pérdidas de lavado con contenido orgánico y químicos de cocción que ingresan en planta de blanqueo.
Blanqueamiento ECF moderno	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de sustancias organocloradas a < 0,2 kg AOX/ADT. • Disminución de dioxinas y furanos a niveles indetectables. • Reducción de concentración en parámetros como DBO, DQO y color.
Blanqueamiento totalmente libre de cloro (TCF)	<ul style="list-style-type: none"> • No se detecta formación de compuestos orgánicos adsorbibles (AOX). • Reduce demanda de agua desde aproximadamente 25-50 m³/ADt a 10 – 20 m³/ADt.
Reciclaje de agua y tratamiento de condensados	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de agua necesitada para el proceso, dependiendo de cuánta agua es reciclada. • Reducción de uso de energía.
Tratamiento primario	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de carga contaminante del efluente, especialmente sólidos suspendidos totales.
Tratamiento aeróbico	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de emisión de materia orgánica (DQO, DBO), AOX, fósforo, nitrógeno y agentes quelantes en el agua.
Tratamiento combinado aeróbico y anaeróbico.	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción en el uso de energía de la planta. • Reducción significativa de materia orgánica en el efluente. • Reducción en cantidad de lodos generados.
Tratamiento terciario	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de emisiones de sólidos suspendidos, DQO disuelto parcialmente no biodegradable y fósforo.

Fuente: Elaboración propia en base a Bajpai, 2015; European Commission, 2013; Elnakar, 2019; Hostachy, 2010 y Suhr, 2015.

Tras el análisis de la nueva tecnología se puede apreciar como cada vez las plantas de celulosa han ido mejorando en cuanto a descargas de efluentes, esto ha llevado a unos avances enormes en términos de impacto ambiental y en la carga de los parámetros característicos de plantas de celulosa Kraft. La realización que la mayoría de los contaminantes tóxicos eran producidos en la planta de blanqueo fue clave para que el desarrollo de la tecnología se diera a lo largo de todo el proceso, desarrollando cada etapa del proceso productivo de celulosa Kraft hacia un nuevo nivel tecnológico.



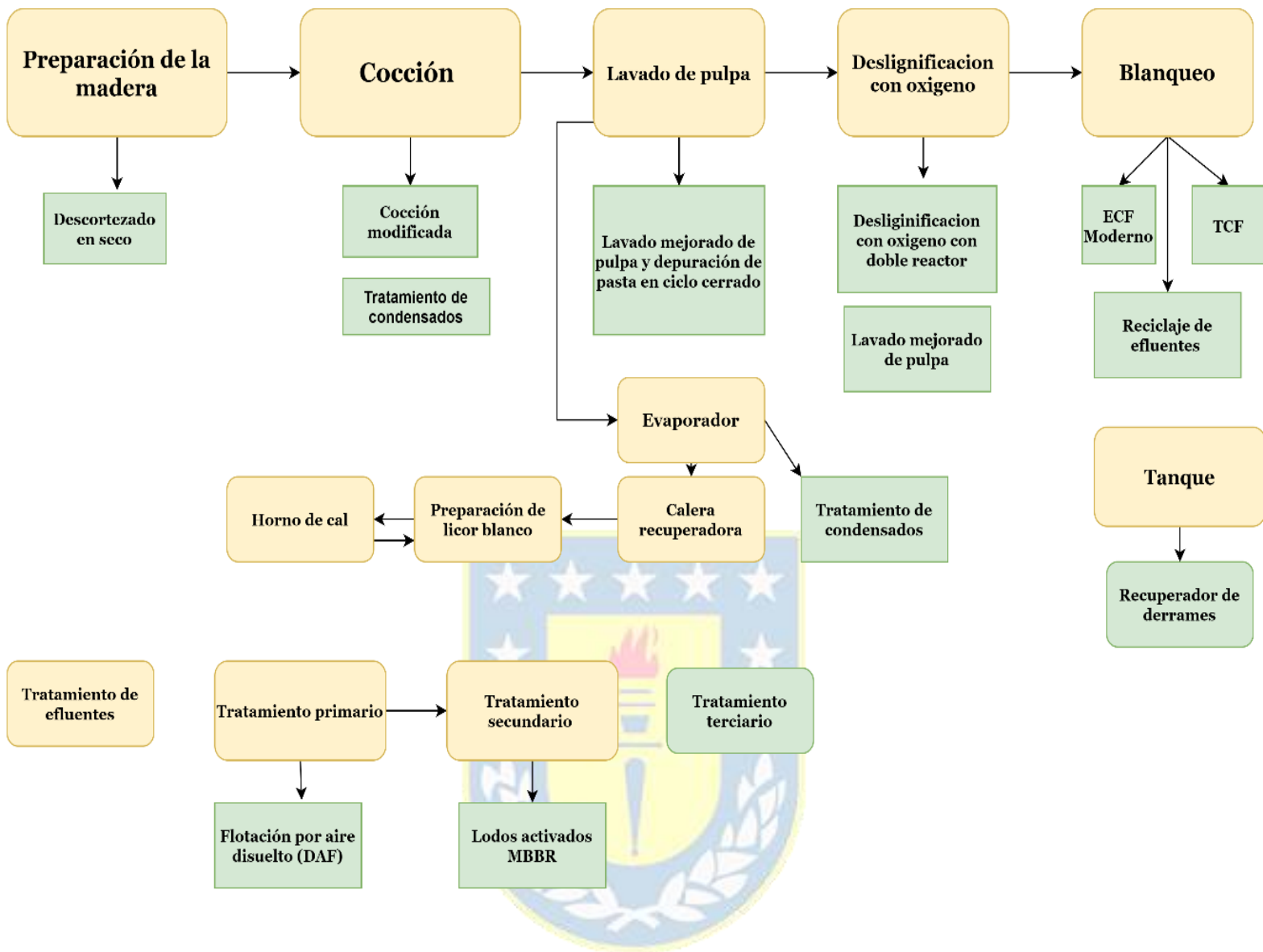


Figura N°34: Diagrama de flujo de proceso productivo general de celulosa Kraft con la mejor tecnología disponible (MTD) para cada etapa (Elaboración propia).
Fuente: Elaboración propia.

El foco del desarrollo para disminuir el impacto de descargas de efluentes es claramente, la disminución del número Kappa a lo largo del proceso, provocando así un menor uso de químicos en la planta de blanqueo principalmente que contengan cloro, así como también enfocándose en una continua reducción de uso de agua aumentando en distintas partes del proceso el reciclaje de esta.

6.5 Brechas normativas y tecnologías asociada a la generación de efluentes líquidos de la Industria de Celulosa en la Cuenca del río Biobío.

6.5.1 Brechas normativa de las empresas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío, en cuanto a descarga de efluentes

Como se estudió en el objetivo específico número 3 “Comparativa entre la normativa de descarga de aguas residuales para plantas de celulosa entre Suecia, Estados Unidos, Canadá y Chile”, se observó cómo cada país, si bien tiene un objetivo en común que es la reducción de la contaminación por medio de las descargas de efluentes de plantas de celulosa, dependiendo del país, se ha optado por diferentes mecanismos para hacerle frente a esta problemática. Como resultado de la revisión de las regulaciones internacionales realizada en este estudio, se observa que, en los países desarrollados considerados en el presente estudio, la tendencia regulatoria es a tener un estándar de descarga con leyes específicas para plantas de celulosa, ya sea enfocándose en la mejor tecnología disponible (MTD) como es el caso de Estados Unidos y Suecia o con leyes normativas de límites de descarga como es el caso de Canadá.

En Chile por su parte, su marco regulatorio de descargas es la norma de emisión, D.S 90/2001, es una ley general para todas las industrias y no se centra en los contaminantes característicos de plantas de celulosa, no contando con límites para contaminantes críticos como AOX, Color y DQO, los cuales en las demás legislaciones se ven contemplados. Sin embargo, esta carencia se ve compensada con el organismo de gestión ambiental Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEA), organismo de gestión ambiental de carácter preventivo cuyo objetivo es asegurar la protección del medio ambiente. Con la promulgación de la Ley 20.417, y la creación del Ministerio del Medio Ambiente(MMA), Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y el Servicio de Evaluación Ambiental(SEA), el sistema de normativa ambiental en Chile mejora en lo que es la regularización de proyectos con posible impacto al medio ambiente, ya que este sistema obliga a los proyectos de plantas de celulosa pasar por un Estudio de Impacto Ambiental(EIA) o Declaración

de Impacto Ambiental(DIA) y en caso de tener una resolución favorable, exigir a las empresas un monitoreo de efluentes más exhaustivo con parámetros característicos de efluentes de empresas de celulosa y también hacer continuos monitoreos de la calidad del agua, como se puede ver en los anexos 7,8 y 9 donde se especifican los parámetros requeridos por la RCA para la descarga de efluente de cada empresa. Teniendo esto en cuenta, si bien la normativa respecto a los límites de descarga (D.S. 90/2001) no es suficientemente específica con las plantas de celulosa, en general la normativa en Chile se asemeja más a la de Suecia donde por medio de una evaluación de impacto ambiental, se estudia caso a caso los impactos ambientales de la industria y mediante permisos ambientales proponer medidas de mitigación y seguimiento. Esto se ve fortalecido con la norma secundaria de calidad ambiental para la cuenca del río Biobío, la cual permite tener un monitoreo constante de la calidad del agua del río, logrando un control y manejo eficiente de lo que es la calidad del agua en el río.

Otra brecha entre la normativa chilena y la internacional estudiada es el caso de la normativa de Estados Unidos y Canadá, se les da una mayor importancia a sustancias tóxicas como los compuestos fenólicos clorados y los compuestos organoclorados adsorbibles (AOX), aunque hay que recalcar que la mayoría de estos se mide en el efluente de la planta de blanqueamiento y no en el efluente de descarga final.

En cuanto a los límites de descarga, la normativa internacional de los países estudiados cuenta con una guía específica para efluentes de plantas de celulosa, en la cual la unidad es de kg de contaminante por tonelada de pulpa seca producida al aire (ADt), en el caso de Chile los límites de descargas están en unidades de concentración como ml/L, por lo que, al no tener un efluente diario de descarga y una producción diaria fija, hace difícil la comparación de estos límites.

6.5.2 Brechas tecnológicas de las empresas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío, en cuanto a la mejor tecnología disponible.

La producción de celulosa en Chile y específicamente en el río Biobío inicia sus actividades en el año 1951 con la decisión de construir una planta de celulosa en Chile. En esta época en Chile y el mundo eran escasos los estudios sobre los daños que las descargas de contaminantes en el ambiente podrían generar al ecosistema y a la vida humana, la conciencia en el cuidado del planeta y los conceptos como calentamiento global y sustentabilidad aún no se conocían por lo que no es de extrañar que las tecnologías en estos tiempos no tuvieran una mayor preocupación en cuanto a las descargas de contaminantes al ambiente. Poco a poco a medida que las personas empezaron a notar alteraciones en el ecosistema y a medida que se hacían más estudios sobre los posibles impactos de efluentes de plantas de celulosa, esto empezó a tomar más importancia y la gente comenzó a adquirir mayor conciencia. En cuanto a las plantas de celulosa a nivel mundial, existe un hito ambiental con el descubrimiento de emisiones de dioxinas y furanos al ambiente eran causados en el proceso de blanqueamiento de la celulosa en base a cloro elemental. Si bien, las plantas en Chile tienen una tendencia a no ser los precursores en el desarrollo tecnológico para su proceso productivo, ni en la investigación para desarrollo de este, en el ámbito de la observación de las tendencias mundiales y en el adoptar buenas prácticas medio ambientales (ya sea por diversas influencias) no se queda atrás. Esto quedó demostrado en el análisis del capítulo 1 de este informe donde se ve la evolución tecnológica de las plantas de celulosa CMPC en la cuenca del río Biobío a lo largo del tiempo. En la siguiente tabla N°46 se muestra la comparación de la tecnología entre las plantas de celulosa en la cuenca del río Biobío con la mejor tecnología disponible (MTD) en cuanto a descarga de efluentes.

Tabla N°46: Comparación mejor tecnología disponible en cuanto a descarga de efluentes con tecnología utilizada en plantas CMPC en la cuenca del río Biobío.

Tecnología	CMPC Laja	CMPC Santa Fe	CMPC Pacífico
-------------------	------------------	----------------------	----------------------

Descortezado en seco	✓	✓	✓
Cocción extendida	✓	✓	✓
Lavado eficiente de pasta y depurador de ciclo cerrado	✓	✓	✓
Deslignificación con oxígeno con doble reactor	✓	✓	✓
Blanqueamiento ECF moderno	✓	✓	✓
Blanqueamiento TCF	-	-	-
Reciclaje de agua y reutilización de condensados.	✓	✓	✓
Tratamiento secundario de biorreactor de lecho móvil (MBR) más tecnología de lodos activados.	✓	✓	✓
Tratamiento secundario de efluente con pretratamiento anaeróbico	-	-	-
Tratamiento terciario de efluente	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

La tecnología en las plantas de celulosa CMPC ha evolucionado de forma exponencial. Ya sea por presiones normativas, sociales o internacionales del mercado, a lo largo de los años, las plantas de celulosa Kraft de CMPC han logrado desarrollar su tecnología de procesos hasta un estándar ambiental internacional de gran nivel. Teniendo en cuenta la tecnología inicial de planta CMPC Laja en donde, el cloro era producido en la planta mediante mercurio y solo contaba con tratamiento primario de efluente y que hasta 1990 no hay registros de alguna planta de celulosa que tuviera tratamiento secundario de tratamiento de agua, la tecnología actualmente utilizada genera un impacto mucho menor al medio receptor. Un hito importante fue el cambio de tecnología de blanqueamiento libre de cloro elemental (ECF), con la cual CMPC, 2019, reporta que “el nivel de AOX (Absorbable Organic Halogens) en los últimos 20 años ha bajado desde 8 kg/ton a 0,2-0,5 kg/ton de

celulosa; el DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) en los últimos 10 años ha bajado de 15 kg/ton a 1,5 kg/ton de celulosa y los compuestos sulfurados han sido reducidos en cerca de 90% desde los años 70” lo cual se explica, principalmente, por el cambio hacia tecnologías ECF moderno en la cual usa la secuencia estudiada en el capítulo anterior, D0(EOP)D1D2 la que incluye extracción alcalina, con oxígeno y peróxido en la etapa (EOP).

El desarrollo tecnológico de las empresas de celulosa en la cuenca del río Biobío, permite ilustrar la importancia del avance de esta industria en materia medioambiental, el que se explica en gran medida por un fuerte proceso de inversión, por la existencia de tecnologías desarrolladas en el extranjero que resultan rentables como inversión incremental y por la orientación de las empresas a los mercados extranjeros más importantes. Eso queda reflejado en la tabla N°46, donde se compara la tecnología actual de las empresas CMPC en contexto de descarga de efluentes, con la considerada mejor tecnología disponible en el mercado. Se puede apreciar como las empresas CMPC han adoptado las tecnologías medioambientales esenciales para el manejo de efluentes líquidos como son descortezado en seco, cocción extendida, lavado eficiente de pasta y depurador de ciclo cerrado, deslignificación de oxígeno con doble reactor y reciclaje de agua y reutilización de condensados. En cuanto a la mejor tecnología disponible que no están aplicadas en las plantas CMPC, como es el tratamiento secundario aeróbico con pretratamiento anaeróbico, plantas CMPC cuenta con un moderno sistema de tratamiento secundario que consta de un sistema de biorreactor de membrana con lecho móvil (MBBR) con un sistema de lodos activados la cual también se considera mejor tecnología disponible.

7. CONCLUSIONES

Esta tesis tuvo por objetivo identificar y analizar las brechas tecnológicas y normativas de las plantas de celulosa de la cuenca del río Biobío en el contexto del potencial impacto de sus contaminantes en los ecosistemas acuáticos.

Entonces, primeramente, por medio de la Norma Secundaria de Calidad de Aguas para el río Biobío (NSCA) y sus estaciones de monitoreo, se estudió la calidad del agua a lo largo del río, poniendo atención a las estaciones antes y después de las plantas de celulosa y una antes de la planta de tratamiento de agua potable de Concepción, planta la Mochita. Se verificó que a medida que avanza el río existe un aumento de ciertos contaminantes característicos de plantas de celulosa como, nitrógeno total, fósforo total y conductividad. Pero también se observó una estabilidad de otros parámetros como sólidos suspendidos, DBO5 y DQO sin tener mayores variaciones de concentración a lo largo del río. En la estación BI-20 en Rucalhue se observa que las condiciones del agua son prácticamente naturales y casi inalteradas por intervención humana teniendo una calidad de agua “excelente” y “buena”. Luego en la estación BI-30 en Coigüe, se aprecia un aumento en la concentración de forma general de contaminantes, en esta área ya existe intervención humana con centros urbanos y, además este punto de monitoreo se encuentra a 6 km del punto de descarga de efluentes de la planta CMPC Pacífico. Para la estación de monitoreo del área BI-40 antes de la confluencia con el río Gomero, es influenciada por descargas industriales (incluidas las tres plantas CMPC), descargas urbanas, agricultura y actividad forestal, en este punto se aprecia un aumento de concentración especialmente de nutrientes como fósforo y compuestos nitrogenados, llegando a tener una calidad “regular” para estos parámetros. Se esperaría que debido a la cantidad de influencias que tiene el río en este tramo, las concentraciones de los contaminantes aumentarían aún más; pero esto se explica con una importante contribución de “agua limpia” desde el río Laja. Finalmente, para la estación BI-50 antes de la planta de tratamiento la Mochita se observa un aumento de la concentración de los contaminantes de forma general

con los parámetros fósforo y nitrógeno total en una calidad “regular” por lo que podría haber un grado de eutrofización, lo que se confirmaría con el parámetro oxígeno disuelto que también tiene una calidad “regular”.

Tras analizar las variaciones de concentraciones de contaminantes a lo largo del río Biobío, también se aprecia una marcada característica estacional en la calidad de aguas asociada con el sistema hidrológico del río. En verano cuando el caudal del río es bajo y la capacidad de dilución es mínima, se ve un importante aumento de la concentración de contaminantes, mientras que, invierno, cuando la capacidad de dilución es alta, si bien sigue la tendencia a aumentar la concentración de contaminantes a medida que baja el río, el aumento de concentración no es tan significativo.

Es importante señalar que uno de los problemas al momento de evaluar los efectos de las plantas de celulosa en el río, es el poder separarlo de los demás efectos asociados a factores naturales o antrópicos. En este sentido el aumento de los parámetros fósforo y nitrógeno, además de las plantas de celulosa, también podrían deberse a factores agrícolas por escorrentía, efluentes de tratamiento de centros urbanos o debido a la carga contaminante de otras industrias.

Otro aspecto de la Norma Secundaria de Calidad de Aguas para el río Biobío (NSCA), es la falta de parámetros más específicos para plantas de Celulosa Kraft teniendo en cuenta que, en Chile, según el estudio de Chiang, et al., 2010, los principales efectos asociados a las plantas de celulosa en los ecosistemas acuáticos son las respuestas estrogénicas en distintos peces a causa de fitoesteroides.

En el caso de Chile y la industria de la celulosa Kraft, desde 1994 tras la publicación de la Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente, ha tenido que enfrentar grandes desafíos relacionados con cumplir la legislación vigente, modificar sus procesos productivos e incorporar el concepto de gestión ambiental y sustentabilidad para acceder a nuevos mercados y exigencias internacionales. Tras comparar la normativa chilena con los países de Estados Unidos, Suecia y Canadá

es notable que, en cada país, la autoridad encargada, establece sus requerimientos basándose en las consideraciones técnicas que implica la reducción de contaminantes y siempre teniendo en cuenta los posibles impactos que estos efluentes pueden tener en el medio receptor. En este contexto Chile, a diferencia de los demás países estudiados, no cuenta con normativa y límites estándar específicos para plantas de celulosa, así como tampoco hace uso de referencia tecnológica para fijar estos límites como en el caso de Estados Unidos. Los límites en Chile son normados por la norma de emisión D.S. 90/2001, que es general para todas las industrias que descargan efluentes a medios acuáticos. El sistema chileno se asemeja al de los demás países en el otorgamiento de permisos, en el cual una autoridad debe brindar permisos a la industria para comenzar a operar. En Chile estos permisos son dados mediante el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), con su respectivo Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o Declaración de Impacto Ambiental (DIA), esto, mejora en muchos sentidos el proceso de regularización con medidas de mitigación y seguimiento que compensa de cierta forma, las carencias de la norma de emisión D.S. 90/2001, pudiendo añadir parámetros clave en los efluentes de celulosa como AOX y color, como se analizó en el objetivo específico 1, en donde fueron estudiados los distintos proyectos de modificación e implementación de nueva tecnología de las empresas CMPC y como estos debieron someterse al Sistema de evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Al analizar la mejor tecnología disponible para las plantas de celulosa Kraft con énfasis en descarga de efluentes, se vio que a lo largo del tiempo la evolución de la tecnología en cuanto a proceso productivo de celulosa no se ha detenido y que ya sea por distintos factores la tecnología siempre está en constante desarrollo. Impulsada por la conciencia del medio ambiente, la constante investigación científica en el estudio de los impactos de los efluentes en el sistema receptor y la revelación de los altos niveles de toxicidad, llevaron al mundo a hacer cambios críticos en el sistema productivo de la celulosa Kraft blanqueada. El percatarse que la mayoría de los tóxicos se generaban en la zona de blanqueamiento, llevó a

desarrollar nuevas tecnologías en cuanto, cambio de químicos de blanqueamiento, como se puede ver en el capítulo donde se estudia el estado del arte de las plantas de celulosa, el desarrollo de las tecnologías cambia su enfoque desde tecnología basada en tratamiento de aguas, “al final del tubo”, para centrarse en la integridad del proceso productivo desde su etapa inicial. Esto se ve reflejado en la reducción de número Kappa a lo largo de todo el proyecto para así hacer un menor uso de químicos de blanqueo y mejoramiento de sistema de tratamiento de efluentes. Desarrollando así tecnologías revolucionarias como el descortezado en seco, cocción extendida, lavado eficiente, deslignificación con oxígeno, recuperación de agua y cierre de circuitos, blanqueo ECF modificado, TCF, tratamiento secundario combinado anaeróbico más aeróbico y tratamiento terciario.

Para alcanzar estas exigencias normativas, empresas CMPC se ha visto en la necesidad de implementar nueva tecnología acorde a las tendencias amigables con el medio ambiente que se daban a lo largo del mundo, adaptando a sus procesos diseños de mejor tecnología disponible (MTD). Entre las mejores tecnológicas aplicadas a las plantas, se encuentran la eliminación de cloro elemental en el proceso de blanqueo, utilizando ahora tecnología ECF con secuencia moderna, la mejora en los procesos de cocción, depurado y lavado eficiente. Estas tecnologías mencionadas, ya han sido implementadas para las tres plantas CMPC en la cuenca. A pesar de no cumplir con el 100% de las mejores tecnologías disponibles, la tecnología utilizada en empresas CMPC en la cuenca del río Biobío sigue siendo de altos estándares tecnológicos y moderna lo que se ve reflejado en la disminución de concentraciones de parámetros de atención para las plantas de celulosa. Estas medidas son fundamentales para que las fábricas garanticen el cumplimiento de las normas ambientales y prácticas internacionales.

Tras analizar las brechas normativas y tecnológicas en las plantas de celulosa en la cuenca del río Biobío, se aprecia que, si bien el desarrollo de Chile en el ámbito normativo y tecnológico es más bien reactivo a lo que pasa en el resto del mundo, ya que el cambio tiende a producirse años después de la implementación en países

en la vanguardia ambiental como Suecia o Canadá, empresas CMPC ha alcanzado altos estándares normativos y tecnológicos comparables con los países estudiados. Pero este carácter reactivo de implementar normativas y tecnología sugiere, que, en vez de depender de las investigaciones y desarrollo tecnológico de otros países, es necesario el desarrollo de normativas y aplicación de tecnología en base a nuestro contexto. Esto se vio reflejado en este informe, en el cual las tres plantas de celulosa cuentan con tecnología moderna ambientalmente y ninguno de los efluentes de descarga excede la normativa establecida, sin embargo, tras analizar investigaciones como las de Karrassch et al., 2009, en el cual se hace un estudio físico-químico y ecotoxicológico; Parra et al., 2009, en donde se hace una evaluación de calidad de aguas en el río Biobío tras monitorearlo por 14 años y Chiang et al., 2010, donde estudia los efectos específicos de las plantas de celulosa en el río Biobío, queda demostrado el impacto negativo de los efluentes de plantas de celulosa en el río teniendo consecuencias negativas para la calidad de las aguas y por ende para todo el ecosistema. Por lo que las medidas en cuanto a efluentes si bien han tenido una mejora importante a lo largo del tiempo aun no son lo suficientemente estrictas para mitigar el impacto en su totalidad generado en el río. Teniendo en cuenta la importancia que tiene el río Biobío para la población, los múltiples servicios ecosistémicos que brinda, siendo el hogar de especies únicas endémicas del país y siendo la fuente de agua potable para todas las personas de Concepción, es de suma importancia tener en consideración una correcta gestión de contaminantes y un estricto cuidado de la calidad de agua del río Biobío.

Esta tesis también abarca tres de los 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable dados por la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), estos objetivos son:

El objetivo 6 Agua Limpia y Saneamiento, siendo el agua limpia una necesidad de la población mundial y teniendo en cuenta que el río Biobío abastece de agua potable a gran cantidad de la población de Concepción, es de suma importancia el estudio y el cuidado de la calidad de agua de este río y en especial el estudio de

una de sus cargas contaminantes más importantes como son los efluentes de plantas de Celulosa Kraft en la cuenca.

El objetivo 12 producción y consumos responsables. Los productos en base a la producción de celulosa han ido en un continuo incremento a lo largo de los años, si bien algunos productos como el papel de diario ha dejado de ser una prioridad en la sociedad moderna actual, la necesidad de papel de impresión, papel tisú y nuevos productos emergentes como son los de embalaje y hoy en día a causa de la pandemia las mascarillas han ido en notable aumento. Esto conlleva a una responsabilidad por parte de las empresas haciendo que su importancia económica y social, sea al mismo tiempo armoniosa con el medio ambiente, modernizando su tecnología y aplicando una gestión de residuos eficiente.

Finalmente, el objetivo 14 Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos: Los sistemas hidrológicos son los que hacen que la tierra sea un lugar habitable para el ser humano. Una gestión cuidadosa de este recurso mundial esencial es una característica clave para lograr un futuro sostenible. En este trabajo de tesis se analizó los efectos adversos que han tenido los efluentes de plantas de celulosa en los ecosistemas, responsables de toxicidad de peces y de eutrofización, esto hace, que el estudio de los efluentes de celulosa sea de suma importancia al momento de abarcar este objetivo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alejandro, M & Saldivia, G. (2003). Two-stage O₂ delignification system cuts mill's chemical use. *Boosts Pulp Qual* January/February, *PaperAge*, pp 18–24.
- Alén, R. (2000). Basic chemistry of wood delignification. In: Stenius P (ed) *Forest products chemistry*. Fapet Oy, Helsinki, pp 58–104.
- Ali, M and Sreekrishnan, T, (2001). Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. *Advances in Environmental Research*, 5: 175 – 196.
- Anku, W., Mamo, M & Govender, P. (2017). *Phenolic Compounds in Water: Sources, Reactivity, Toxicity and Treatment Methods*. DOI: 10.5772/66927.
- Arancibia, S. (2018). Propuesta de mejora para elementos sellantes de la unidad rotatoria en bomba centrífuga sulzer 85-098 área caustificación planta pacífico CMPC pulp. Tesis de pregrado. Universidad técnica Federico Santa María. Viña del Mar. Chile.
- Armstrong, B. (16 de diciembre de 2020). Los principales Países productores de pulpa y papel en el mundo. *Ripleybelieves*. <https://es.ripleybelieves.com/top-pulp-and-paper-producing-countries-in-world-3888>.
- Bajpai, P. (2010). *Environmentally friendly production of pulp and paper*. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey.
- Bajpai, P. (2013). *Bleach Plant Effluents from the Pulp and Paper Industry*. Springer International Publishing.
- Bajpai, P. (2015). *Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry*, Springer International Publishing, Switzerland.
- Bajpai, P. (2016). *Pulp and Paper Industry – Energy Conservation*, Elsevier, Amsterdam.
- Banco Mundial. (2011). Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe.
- Barra, O., Chiang, G., Saavedra, M., Orrego, R., Servos, M., Hewitt, M., McMaster, M., Bahamonde, P., Tucca, F & Munkittrick, K. (2021). Endocrine Disruptor Impacts on Fish From Chile: The Influence of Wastewaters. *Frontiers in Endocrinology*. 12:611281,. Doi:10.3389/fendo.202201.611281
- BCN. (2020). Decreto Supremo 90/2001 del Ministerio secretaria general de la presidencia. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas continentales superficiales. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>

- BCN. (2020). Decreto Supremo 46/2002 del Ministerio secretaria general de la presidencia. Establece norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=206883>
- BCN. (2020). Decreto Supremo 09/2015 del Ministerio del Medio Ambiente. Establece normas secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas continentales superficiales de la cuenca del río Biobío. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1084403>
- BCN. (2020). Decreto Supremo 609/1998 del Ministerio de Obras Públicas. Establece normas de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=121486>
- BCN. (2020). Normativas Chilenas de residuos líquidos. <http://www.leychile.cl/Consulta>.
- BCN. (04 de junio de 2018). Biblioteca del congreso nacional de Chile. Marco regulatorio en Chile y algunas experiencias internacionales en materia de descarga de residuos líquidos a distintos cuerpos receptores (España, Ecuador, Canadá, Australia y Estados Unidos de Norteamérica). Asesoría técnica Parlamentaria.
- Beltran, F. (1999). Wine distillery wastewater degradation 2 Improvement of aerobic biodegradation by means of an integrated chemical (ozone)-biological treatment.
- Bergnor-Gidnert, E. (2006). STFI Pac kforsk report, February, 2006 (in Swedish) Berry R (1996) Oxidative alkaline extraction. In: Dence CW, Reeve DW (eds) Pulp bleaching – principles and practice. Tappi Press, Atlanta, pp 291–320.
- Bergquist, A. (2013). Command-and-control revisited: environmental compliance and technological change in Swedish industry, 1970–1990. ELSEVIER.
- Bernardolabs. (2017). Parámetros clave de la calidad del agua para piscicultura. <https://bernardolabs.com/parametros-clave-de-la-calidad-del-agua-para-piscicultura/>
- Bolañao, A. (2009). Sistema de flotación por aire disuelto para el tratamiento de aguas residuales industriales. Tesis de pregrado. Escuela de ingeniería de Antioquia. Turquía.
- Bright, D., Hodson, P., Lehtinen, k., Mckague, B., Rodgers, J & Solomon, K. (2003). Evaluation of ecological risks associated with the use of chlorine dioxide for the bleaching of Pulp: scientific progress since 1993. Pensacola. USA.
- Carey J., Hall, E., and McCubbin, N. (2002). Review of Scientific Basis for AOX Effluent Standard in British Columbia. Report prepared for Minister of Water, Land and Air Protection in British Columbia. 36p.

- Carrasco, G. (2015). Reúso de efluente de celulosa Kraft en la producción de aeropónica de liliom asiático como planta ornamental. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción. Chile.
- Carrasco, L. (2005). Entre el desierto verde y el país productivo. El modelo forestal en Uruguay y el cono sur. Capítulo 5: Contaminantes ambientales derivados del pulpaje y blanqueo de la pulpa de madera. Imprenta Zonalibro Industria Gráfica, Uruguay, Montevideo.
- CEPI. (2018). Confederation of European Paper Industries: Sustainability Report 2018. European Paper Industry. https://sustainability.cepi.org/wpcontent/uploads/2018/10/CEPI_Sustainability_report_full_update.pdf
- Chamorro, S., Hernández, V., Monsalvez, E., Becerra, J., Mondaca, MA., Piña, B & Vidal, G. (2010). Detection of estrogenic activity from kraft mill effluents by Yeast estrogen Screen. Bull. Env. Contam. Toxicol. 84:165–169.
- Chiang, G., Munkittrick, K.R., Orrego, R. & Barra, R. (2010). Monitoring of the Environmental Effects of Pulp Mill Discharges in Chilean Rivers: Lessons Learned and Challenges. Water Quality Research Journal of Canada 45(2), 111-122.
- CIPEC. (2018). Benchmarking energy use in Canadian Pulp and Paper Mills. Natural Resources Canada. Ottawa. Canadá.
- CMPC. (2019). Somos la fibra del futuro. Reporte Integrado 2019. Empresas CMPC. https://www.cmpc.com/pdf/Reporte_2019.pdf
- CMPC. (2019). 60 AÑOS CMPC PULP PLANTA LAJA, 1959-2019. <https://fliphtml5.com/hrvzi/coqe/basic>
- CMPC. (07 de junio de 2021). Certificaciones CMPC. <https://www.cmpc.com/certificaciones-celulosa>
- Dence, C. and Reeve, D. (1996). Pulp Bleaching, Principles and Practice. College of environmental Science and Forestry, Retired State University of New York Syracuse, NY, USA
- Diaz, M. (2017). Evaluación de los servicios ecosistémicos asociados al recurso hídrico: Cuenca del río Biobío como caso de estudio. Tesis de postgrado. Universidad de Concepcion. Concepcion. Chile.
- ECFR. (2021). Electronic code of federal regulations, Part 430 – The Pulp, paper, and paperboard point source category. Title 40: Protection of environment. Recuperado de: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text->

idx?SID=6b51273d47e8dc451e0aac10f60cdfce&mc=true&node=pt40.32.430&rgn=div5

- Enviromental Quality Act. (2020). Regulation respecting Pulp and paper mills. Quebec Official Publisher.
- Elnakar, H. (2019). Pulp and paper mil effluent management. Department of civil & enviromental engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- EPA. (2000). Permit Guidance Document. Pulp, paper and paperboard manufacturing. Point Source Category (40CFR, 430).
- EPA. (2021). Agencia de protección ambiental de Estados Unidos. Implementación de las leyes sobre el agua. <https://espanol.epa.gov/espanol/implementacion-de-la-leyes-sobre-el-agua>
- EPA. (2021). Aquatic Life Criteria- Ammonia. Unired States Enviromental Protection Agency. <https://www.epa.gov/wqc/aquatic-life-criteria-ammonia>
- EULA. (2019). EULA-CHILE. Centro de ciencias ambientales, evolución y perspectiva a 30 años de su creación.
- European Commission. (2013). Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). JOINT RESEARCH CENTRE, Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau.
- FAO. (24 de febrero de 2021). Forestry production and trade. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>
- Fernández, M. (2008). Análisis de alternativas tecnológicas e ingeniería conceptual de una biorefinería lignocelulósica. Tesis de pregrado. Escuela superior de ingenieros de Sevilla. Sevilla. España.
- Finnish Enviroment Institute. (2007). Rethinking BAT emissions of the Pulp and Paper Industry in the European Union. Expert Services Department. Finland
- ForestSweden. (2021). The Pulp and paper industry. <https://www.skogssverige.se/en/the-pulp-and-paperindustry#:~:text=Sweden%20is%20the%20world's%20second,EU%20are%20manufactured%20in%20Sweden.>
- Gapes, D., Frost, N., Clark, T., Dare, P., Hunter, R & Slade, A. (1999). Nitrogen fixation in the treatment of pulp and paper wastewaters. Water Science & Technology. Vol: 40, pp 85-92.

- Gavrilescu, D. (2007). Zero discharge: Technoogical progress towards eliminating Pulp mil liquid effluent, Technical University of Iasi, Environmental Engineering and Mandagment Journal.
- Gellerstedt, G. (2009). The chemistry of bleaching and posr-color formation in Kraft pulps. Department of Fibre AND Polymer Tecgnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- González, E. (2004). El pulpeo con etanol como alternativa para incrementar la competitividad de fábricas de papel mediante su desarrollo prospectivo integrado a industrias de la caña de azúcar. CYTED. Santa Clara. Cuba.
- Genco, J., Van Heiningen, A & Miller, W. (2012). Chapter 2: Oxygen delignification, the bleaching of pulp. In: Hart P, Rudie A (eds) TAPPI Press, Atlanta.
- González, P. (2020). Clase de curso Procesos productivos y ambiente. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Grandón, M. (2011). Utilización de dregs y grits provenientes de la industria de celulosa Kraft en la estabilización de biosólidos originados en el tratamiento de aguas servidas. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción.
- GRN. (2021). Resolución de calificación ambiental RCA. Consultado el 27 de Junio de 2021. <https://www.grn.cl/permiso-ambiental-sectorial-pas/permiso-ambiental/resolucion-de-calificacion-ambiental-rca.html>
- Gustavsson, C. (2006). On the interrelation between kraft cooking conditions and Pulp composition. Doctoral Thesis. Royal Institute of Technology. Department of Fibre and Polymer Technology.
- Harrison, K. (2005). Paper Trails: Global enviromental regulation of the papel industry. University of British Columbia, Granada. Spain.
- Henríquez. (2013). Generación de una línea base del funcionamiento del tratamiento secundario de efluente de CMPC celulosa S.A. Planta Santa Fe. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción, Chile.
- Hernández, L. (2015). Evaluación de la toxicidad de efluentes de celulosa Kraft expuestos a derrames de licor negro. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción. Chile.
- Hostachy, J. (2010). Ozone-enhanced bleaching of softwood kraft pulp (peer-reviewed), TappiJournal, Vol. August, pp. 14-21.
- Hubbe, M., Hermosilla, D., Blanco, M., Yerushalmi, L., Haghghat, F., Lindholm-Lehto, P., Khodaparast, Z., Kmali, M & Elliott, A. (2016). Wastewater Treatment and

Reclamation: A Review of Pulp and Paper Industry Practices and Opportunities. DOI: 10.15376/BIORES.11.3.HUBBE.

ICLG. (2020). Sweden: Environment & Climate Change Laws and Regulations 2020. <https://iclg.com/practice-areas/environment-and-climate-change-laws-and-regulations/Sweden>

INFOR. (2019). Anuario forestal 2019. Chilean statistical yearbook of forestry. <https://wef.infor.cl/publicaciones/anuario/2020/Anuario2020.pdf>

INFOR. (2020). El sector forestal chileno. Chilean Forestry Sector 2020. https://wef.infor.cl/publicaciones/sector_forestal/2020/SectorForestal_2020.pdf

INFOR. (2021). Exportaciones forestales 2020. Boletín estadístico N°178. Instituto Forestal. Área de información y economía forestal. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/30433/30433.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

ISO. (2021). Certification & Conformity. Consultado el 26 de junio del 2021. <https://www.iso.org/certification.html>

Jara, C. (2007). Elementos base para la gestión ambiental del mercurio en Chile. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Jarpa, M. (2014). Tratamiento secundario y terciarios de efluentes de la industria forestal y su efecto sobre la toxicidad. Tesis de postgrado. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

Johansson, B. (1984). Modified continuous kraft pulping – now a reality. Sven Pap 87(10):30–35.

Johnson, A., Johnson, B., Gleadow, P., Silva, F., Aquilar, R., Hsiang, C & Araneda, H. (2008). 21st century fibrelines. In: Proceedings of the international bleaching conference, Quebec City.

Kapanen, J & Kuusisto, L. (2002). A new brown stock washing optimization method for economical pulp production, TAPPSA APPW.

King, A. (2012). Industry self-regulation and environmental protection. In: Bansal P, Hoffman AJ, editors. Oxford Handbook in Business and the Environment. Oxford: Oxford University Press.

Knowpulp. (2020). Kraft pulping. Cooking process. https://www.knowpulp.com/spanish/demo/spanish/pulping/cooking/1_process/1_principle/fr_text.htm

- Kringstad, K. P. (1984). Spent liquors from pulp bleaching. *Environmental Science and Technology* 18, 2403 - 2410.
- Larios, L. (2009). Contaminación del agua por nitratos: significación sanitaria. *Revista Archivo Médico de Camagüey*.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-02552009000200017&lng=es&tlng=es
- Latorre, A., Rigol, A., Lacorte, S., & Barceló, D. (2005). Organic Compounds in Paper Mill Wastewaters. *Handbook Environ. Chem.* 5, 25– 51.
- Latribuna. (12 de Julio de 2015). El estrecho vínculo de CMPC con la historia de Laja. *La tribuna*.
<https://www.latribuna.cl/opinion/2015/07/12/el-estrecho-vinculo-de-cmpc-con-la-historia-de-laja.html>
- Lillo, F. (2013). Estimar el balance de fósforo en el proceso de fabricación de celulosa de fibra corta: Evaluación de la carga de fósforo aportado al río Biobío. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Lönnroth, M. (2010). The organisation of environmental policy in Sweden. a historical perspective. Swedish environmental protection agency, Report 6404.
- Lorenzi, S. (2018). Propuesta de mejora tecnológica en sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales de una planta papelera para la implementación de ciclo cerrado. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Lozano, W. (2012). Curso Fundamentos de Diseño de Plantas Depuradoras de Aguas Residuales. Bogotá D.C., Colombia.
- 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, Chile.
- McDonough, T. (1996). Oxygen delignification. In: Dence CW, Reeve DW (eds) *Pulp bleaching – principles and practice*. Tappi Press, Atlanta.
- Melanson, J. (2000). Effluent Recycling in a Kraft Pulp Mill. A tesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research. Máster Degree. Department of Chemical and Material Engineering, Edmonton. Alberta. Canadá.
- Metcalf & Eddy. (1998). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. McGraw-Hill Companies, Inc. China.
- Microlab Industrial. (2017). Las formas múltiples del Nitrógeno (amonio-nitrito-nitrato-nitrificación-desnitrificación). <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/las-formas-multiples-del-nitrogeno>

- MMA. (2017). Guía para la elaboración de normas secundarias de calidad ambiental en aguas continentales y marinas.
- Morales, G. (2014). Evaluación de la estabilidad de un sistema de lodos activados mediante indicadores fisicoquímicos y biológicos. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción. Concepción. Chile.
- Moreira, D. (2012). Modelling of Kraft Mill Chemical Balance. Graduate Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry. University of Toronto.
- Noel, M. (2017). Pulp Mill Wastewater: Characteristics and Treatment. <http://dx.doi.org/10.5772/67537>
- Nordic Council of Ministers. (1993). Study on nordic pulp and paper industry and the environment. Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Niiranen, M. (1985). Study of debarking drum process dimensioning. Doctoral thesis. Helsinki University of Technology.
- Nurmesniemi, H. (2010). Tertiary treatment of biologically treated wastewater from the pulp and paper mill – internal report assessing findings of the WWF report on the Celco pulp mill in Valdivia, Chile.
- OECD. (1997). Reference Guide on Environmental Requirements for Industrial Permitting. <https://www.oecd.org/env/outreach/35056678.pdf>
- OECD. (1999). Environmental requirements for industrial permitting. Case study on the Pulp and paper sector. ENV/EPOC/PPC (99)8/FINAL/PART1. [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EP/OC/PPC\(99\)8/FINAL/PART1&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/EP/OC/PPC(99)8/FINAL/PART1&docLanguage=En)
- OECD. (2019). Best Available Techniques for Preventing and Controlling Industrial Pollution. <https://www.oecd.org/chemicalsafety/risk-management/measuring-the-effectiveness-of-best-available-techniques-policies.pdf>
- ODEPA. (2018). Celulosa chilena: Avances y perspectivas de su comercio exterior. Ministerio de agricultura. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/celulosaFinal.pdf>
- Olivares, A. (2010). El nuevo marco institucional ambiental en Chile. Revista catalana de dret ambiental vol. 1-Num. 1 -23.
- Panchapakshan, B & Hickman, E. (1997). Fiberline advancements spur papermaking process changes. In: Patrick KL (ed) Advances in bleaching technology. Miller Freeman Books, San Francisco.

- Parra, O y Valdovinos, C. (2006). La cuenca del río Biobío: Historia natural de una cuenca de uso múltiple. Concepción, Chile. Publicaciones centro EULA.
- Parra, O. (2012). "El recurso agua: un análisis comparativo e interdisciplinar de las cuencas hidrográficas de los ríos Iguazú (Brasil) y Biobío (chile) bajo escenarios de alta demanda y cambio climático". EULA-Chile. Universidad de Concepción, Chile.
- Parra, O., Figueroa, R., Valdovinos, C., Habit y Díaz, M. (2013). Programa de monitoreo de la calidad del agua del sistema Río Biobío 1994-2012: Aplicación del Anteproyecto de Norma Secundaria de la Calidad Ambiental (NSCA) del río Biobío. Editorial Universidad de Concepción, Chile
- Pereira, M. (2014). Fabricación de pulpa de celulosa. Facultad de ingeniería. Universidad de Concepción. Concepción. Chile.
- Pikka, O. (2007). Advances in eucalyptus pulp bleaching technology', 3rd ICEP - International Colloquium on Eucalyptus Kraft Pulp, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- PMA. (2005). Programa de medio ambiente. Protocolo de kyoto: Una oportunidad para Chile.
- Pulppapermill. (2015, 11 de Diciembre). Alkaline extraction stage for Pulp bleaching. <http://www.pulppapermill.com/alkaline-extraction-stage-for-pulp-bleaching/>
- Pulppapermill. (2015, 28 de Julio). Oxygen delignification process. <http://www.pulppapermill.com/oxygen-delignification-process/>
- Pulppapermill. (2015, 30 de Junio). The chemical reactions in Kraft pulping process. <http://www.pulppapermill.com/the-chemical-reactions-in-kraft-pulping-process/>
- Q2chile. (07 de Junio de 2021). Certificación Sistema de Gestión Integrado. <https://www.q2chile.cl/sistema-de-gesti%C3%B3n>
- Ramalho, R. (1996). Tratamiento de aguas residuales, editorial Reverté, Barcelona 707 pp.
- Raud, M. (2012). BOD biosensors for Pulp and paper industry wastewater análisis. Springer-Verlag, Environ Sci Pollut Res. 19:3039–3045 DOI 10.1007/s11356-012-0817-0.
- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°092/2001. (27 de agosto de 2001). Resolución exenta N°092/2001. Califica Ambientalmente el Proyecto "Optimización Planta Pacífico PROPAC". https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2013072201/EIA_3778_DOC_8381287.pdf

- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°056/2004. (8 de marzo de 2004). Resolución exenta N°056/2004, califica DIA del proyecto “Proyecto de Optimización Planta Laja – PROFAL IV”. https://seia.sea.gob.cl/archivos/164865_292035.pdf
- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°066/2004. (25 de marzo de 2004). Resolución exenta N°066/2004. Califica Ambientalmente Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto “Ampliación Planta Santa Fe”. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2013121701/EIA_6265_DOC_2128939538_1.pdf
- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°2719/2005. (22 de diciembre de 2005). Resolución exenta N°2719/2005. Califica Ambientalmente favorable el proyecto “Optimización Operacional de Planta Pacífico, Mininco”. <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=877a/a74b7f5f010f3f03de98099a818f8c363ff8>
- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°1576/2008. (15 de mayo de 2008). Resolución exenta N°1576/2008. Califica Ambientalmente el proyecto “PROAMP”. <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=5e/82/1df3b1e8577c7468e654db6d7fd27981297a>
- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°203/2009. (29 de julio de 2009). Resolución exenta N° 203/2009. Califica Ambientalmente el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto “Modernización de Planta Laja”. https://seia.sea.gob.cl/archivos/RCA_203_LAJA.PDF
- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°039/2010. (02 de febrero de 2010). Resolución exenta N°039/2010. Califica Ambientalmente Declaración de Impacto Ambiental de proyecto “Optimización Operacional Planta Santa Fe – Línea 2”. https://seia.sea.gob.cl/archivos/rca_planta_santa_fe.pdf
- RIADICYP. (2008). Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica 2008. Red Iberoamericana de celulosa y papel. Argentina.
- Rivera, M. (2012). Implementación de nuevas secuencias de blanqueo en pulpa de Eucalipto para maximizar el desarrollo de la fibra y minimizar la materia orgánica en el efluente. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción. Concepción. Chile.
- Romero, J. (2009). Tratamiento de aguas residuales: teorías y principios de diseño. Bogotá. Colombia: Editorial escuela colombiana de ingeniería.
- Ruiz, J. (2008). La producción forestal, de la celulosa y el papel y sus repercusiones sobre la cuenca hidrográfica del río Biobío. Concepción, Chile.

- Rybbert, G. (2021, 12 de enero). Declaración pública “Término y Cierre de las Actividades Productivas – Planta BO Paper Bio Bio S.A. Gerente general BO Paper. San Pedro de la Paz. Concepción. Chile.
- Salo, M. (1999). Environmental best practices in the forest cluster, Interim Report IR-00-015, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Santos, R., Hart, P., Jameel, H & Chang, H. (2013). Wood Based Lignin Reactions Important to the Biorefinery and Pulp and Paper Industries. Department of Forest Biomaterials, North Carolina State University. United States.
- Särkkä, T., Gutiérrez-Poch, M & Kuhlberg, M. (2018). Technological Transformation in the Global Pulp and Paper Industry 1800–2018, World Forests 23.
- Savant, D., Abdul-Rahman, R & Ranade, D. (2006). Anaerobic Degradation of Adsorbable Organic Halides (AOX) from Pulp and Paper Industry Wastewater. Bioresource technology. 97. 1092-104. 10.1016/j.biortech.2004.12.013.
- Sebbas, E. (1988). Reuse of kraft mill secondary condensates, Tappi Journal.
- SEIA. (2001). Evaluación de impacto ambiental: Proyecto Optimización Planta Pacifico PROPAC.
https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?id_expediente=3778&idExpediente=3778
- SEIA. (2004). Evaluación de impacto ambiental: Proyecto Ampliación Planta Santa Fe.
https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=6265
- SEIA. (2004). Declaración de impacto ambiental: Proyecto De optimización Planta Laja – PROFAL IV.
https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=164865
- SEIA. (2009). Evaluación de impacto ambiental: Optimización Operacional de Planta Santa Fe – Línea 2.
https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=4193511
- SEIA. (2014). Evaluación de impacto ambiental: Modernización Ampliación Planta Arauco (MAPA).
https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=6856586
- Siltala, M & Winberg, K. (1999). The use of bleach plant filtrate for post-oxygen washing: a way to save money and the environment. In: Proceedings of the 27th EUCEPA conference – crossing the millennium frontier, emerging technical and scientific challenges, Grenoble, France.

- Simons Consulting Group. (1994). Forestry Sector Benchmarking Initiative: A Case Study in Environmental Regulations. Prepared for Industry Canada and Forestry Canada.
- Skogs Industrierna. (2016). Swedish Forest Industries Federation, Stockholm, Sweden. Recuperado de: http://www.forestindustries.se/documentation/statistics_ppt_files/international/production-and-exports-of-paper
- SMA. (2018). Informe técnico de cumplimiento de calidad del agua. Normas Secundarias de calidad ambiental para la protección de las aguas de la cuenca del río Biobío.DFZ-2010-2853-VIII-NC.
- SMA. (2008). Informe semestral RCA 092/2001 PROPAC y RCA 2719/2005 Optimización operacional planta pacifico.
- Sonnenfeld, D. (1999). Social movements and ecological modernization. The transformation of Pulp and paper manufacturing, Washington State University. United States of America.
- Söderholm, K., Bergquist, A-K., Söderholm, P. (2017). The transition to chlorine free pulp revisited: Nordic heterogeneity in environmental regulation and R&D collaboratio. J Clean Prod165:1328–1339.
- Stehr, A. (2018). El Sistema Ambiental de la Cuenca del río Biobío (1990-2018). [Diapositiva de PowerPoint]. Centro EULA. http://www.eula.cl/doc%20wordpress/Cuenca_río_Biobio_S_Stehr.pdf
- Suhr, M. (2015). Best available techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. JRC science and policy reports. European commission.
- Svärd, A. (2014). Effect of raw material and Kraft Pulping Conditions on Characteristics of Dissolved Lignin. Degree Project in Pulp technology.
- Swedish Environmental Protection Agency. (1992). Kvalitetssäkrad miljökontroll: Handbok i kvalitetssäkring; Allmänna råd 92:1.
- Terram. (2004). Evaluación de los impactos de la producción de celulosa. Análisis de políticas públicas N°4.
- Tervola, P. (2007). Confidence limits in mass balances with application to calculation of pulp washing efficiency. Appita J 60(6):474–481.
- Tran, H. (2008). The Kraft chemical recovery process.Pulp & Paper centr, University of Toronto, Toronto, Canadá.
- TSEC. (2015). Government Offices of Sweden: The Swedish Enviromental Code. <https://www.government.se/legal-documents/2000/08/ds-200061/>

- Tutus, A & Usta, M. (2004). Bleaching of chemithermomechanical pulp (CTMP) using environmentally friendly chemicals. *J Environ Biol* 25:141–145.
- Urquejo, P. (2015). Mejoramiento de la calidad de depuración de efluente de celulosa Kraft, tratado por un sistema biológico incorporando una tecnología de tratamiento terciario. Tesis de pregrado. Universidad de Concepción.
- Wennerström, M. (2002). Decreasing brightness reversion with powerful ozone bleaching, at IPBC, Portland, Oregon, USA, p 265.
- Xavier, C., Chamorro, S. & Vidal, G. (2005). Chronic effects of kraft mill effluents and endocrine active chemicals on *Daphnia magna*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 75:670-676.
- Zaror, C. (2000). Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos. Editorial Universidad de Concepción.
- Zaror, C. (2020). Clase Sistemas de Tratamiento de residuos líquidos. Procesos productivos y ambiente. Universidad de Concepción.



9. ANEXOS

Anexo N° 1: Tabla 1 del DS 90/2000 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales sin capacidad de dilución.

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	5
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	0,2
Cloruro	mg/L	Cl-	400
Cobre Total	mg/L	Cu	1
Coliformes fecales o Termotolerantes	NPM/100 ml	Coli/100ml	1000
Indice de fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo hexavalente	mg/L	Cr6+	0,05
DBO5	mgO2/L	DBO5	35
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Fósforo	mg/L	P	10
Hidrocarburos fijos	mg/L	HF	10
Hierro disuelto	mg/L	Fe	5
Manganeso	mg/L	Mn	0,3
Mercurio	mg/L	Hg	0.001
Molibdeno	mg/L	Mo	1
Niquel	mg/L	Ni	0,2
Nitrógeno total kjeldahl	mg/L	NKT	50
Pentaclorofenol	mg/L	C6OHC15	0,009
Ph	Unidad	pH	6.0-8.5
Plomo	mg/L	Pb	0,05
Poder Espumogeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0.01
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80
Sulfatos	mg/L	So42-	1000
Sulfuro	mg/L	S2-	1
Temperatura	°C	T°	35
Tetracloroetano	mg/L	C2C14	0,04
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7
Triclorometano	mg/L	CHC13	0,2
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5
Zinc	mg/L	Zn	3

Fuente: BCN, 2020.

Anexo N°2: Tabla 2 del DS 90/2000 Límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor.

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	mg/L	A y G	50
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	1
Boro	mg/L	B	3
Cadmio	mg/L	Cd	0,3
Cianuro	mg/L	CN-	1
Cloruro	mg/L	Cl-	2000
Cobre Total	mg/L	Cu	3
Coliformes fecales o Termotolerantes	NPM/100 ml	Coli/100ml	1000
Indice de fenol	mg/L	Fenoles	1
Cromo hexavalente	mg/L	Cr6+	0,2
DBO5	mgO2/L	DBO5	300
Fluoruro	mg/L	F-	5
Fósforo	mg/L	P	15
Hidrocarburos fijos	mg/L	HF	50
Hierro disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	3
Mercurio	mg/L	Hg	0,01
Molibdeno	mg/L	Mo	2,5
Niquel	mg/L	Ni	3
Nitrógeno total kjeldahl	mg/L	NKT	75
Pentaclorofenol	mg/L	C6OHC15	0,01
Ph	Unidad	pH	6.0-8.5
Plomo	mg/L	Pb	0,5
Poder Espumogeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	300
Sulfatos	mg/L	So42-	2000
Sulfuro	mg/L	S2-	10
Temperatura	°C	T°	40
Tetracloroetano	mg/L	C2C14	0,4
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	7
Triclorometano	mg/L	CHC13	0,5
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	5
Zinc	mg/L	Zn	20

Fuente: BCN, 2020.

Anexo N°3: Resumen áreas de vigilancia establecidas en la NSCA en la cuenca del río Biobío.

Cauce	Área de vigilancia	Limites áreas de vigilancia	% Superficie total de la cuenca
Biobío	BI-10	Desde: Naciente río Biobío Hasta: Aguas arriba río llanquen(Ralco)	13,77
	BI-20	Desde: Aguas arriba río llanquen (Ralco) Hasta:Rucalhue	16,01
	BI-30	Desde:Rucalhue Hasta:Aguas arriba confluencia río Vergara	5,7
	BI-40	Desde:Aguas arriba confluencia río Vergara Hasta:Aguas arriba confluencia río Gomero	11,18
	BI-50	Desde:Aguas arriba confluencia río Gomero Hasta:Puerto mecano	4,60
	BI-60	Desde:Puerto mecano Hasta:Desembocadura boca Norte	0,52
Bureo	BU-10	Desde: Naciente río bureo Hasta: Aguas arriba confluencia río Biobío.	5,74
Duqueco	DU-10	Desde:Naciente río duqueco Hasta: Duqueco 12 km aguas arriba confluencia río Biobío	5,46
Laja	LA-10	Desde: Naciente río Laja Hasta: Bajo descarga central antuco	9,36
	LA-20	Desde:Bajo descarga central Antuco Hasta: Aguas arriba confluencia río caliboro	3,25
	LA-30	Desde: Aguas arriba confluencia río caliboro Hasta: Puente laja (aguas arriba confluencia río Biobío)	6,66
Malleco	MA-10	Desde: Naciente Río Malleco Hasta: angol	4,55
Renaico	RE-10	Desde: Naciente río renaico Hasta: Aguas arriba confluencia río Vergara	6,33
Vergara	VE-10	Desde: Naciente río Rehue Hasta:Aguas arriba confluencia río Biobío.	7,10

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la SMA.

Anexo N°4: Acuerdo de producción limpia para el sector de industrial de celulosa de 1999.

Descripción del acuerdo: Suscrito por la totalidad de las empresas del sector, la Superintendencia de Servicios Sanitarios y el Ministerio de Economía con el apoyo de la Corporación Chilena de la Madera (CORMA). El Acuerdo, el primero suscrito en Chile, se caracteriza por definir objetivos para cada una de las empresas firmantes (CMPC, Celulosa Arauco y Constitución, Licancel) y sus respectivas plantas.

Compromisos: Las tres empresas coinciden en la necesidad de:

- Situar el compromiso de la industria chilena de celulosa en el contexto de la normativa vigente, y en la perspectiva de la nueva normativa que regulará las descargas de residuos industriales a cursos de aguas superficiales.
- Establecer los mecanismos de control, seguimiento y evaluación periódica del cumplimiento, privilegiando el autocontrol por parte de las empresas.
- Establecer un nuevo mecanismo de comunicación directa entre las empresas del rubro y la Superintendencia que permita analizar y resolver situaciones futuras no cubiertas por el Acuerdo.

Anexo N°5: El protocolo de Kyoto

El protocolo de Kyoto establece la reducción obligatoria de la emisión de gases de efecto invernadero a 30 países industrializados que lo han, a niveles un 5% por debajo de las emisiones de la década de 1990, meta que deberá lograrse entre el 2008 y 2010. Para ello se crean una serie de mecanismos económicos con el fin de flexibilizar las soluciones individuales de los países que han suscrito dichos compromisos. Estos mecanismos son básicamente tres: la implementación conjunta, mediante el cual aquellos países que acordaron reducciones legalmente vinculantes deciden desarrollar proyectos conjuntos de reducción de emisiones con el resto de los países firmantes y repartirse los créditos de reducción que se obtengan; mecanismos de desarrollo limpio(MDL), mediante el cual los países

suscriben proyectos en conjunto con los países , quedando los créditos de reducción en manos de estos últimos; transacción de emisiones, que permite transar libremente los créditos por reducción de emisiones entre los países (PMA, 2005).

El MDL es establecido por el Protocolo de Kioto. Este mecanismo ha sido concebido como una forma de asistir a los países más industrializados en el cumplimiento de sus obligaciones, posibilitando el aprovechamiento de las oportunidades para reducir emisiones donde los costos son competitivos. El Protocolo también establece que los proyectos de reducción de emisiones deben contribuir al desarrollo sostenible de los países en los cuales los mismos se implementan (SEIA, 2008).

Chile es el primer país de Latinoamérica que recibe una bonificación por reducción de GEI a la atmósfera. Además, según el Banco Mundial, es el segundo mejor país para invertir en el mercado de bonos de carbono y actualmente el tercer mayor oferente de proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) a nivel mundial, después de India y Brasil. Es así como en 2003, se transaron US\$ 106 millones por venta de bonos de carbono de proyectos nacionales, lo que representó el 7% del total de ventas mundiales (PMA, 2005).

Anexo N°6: Parámetros y frecuencia de monitoreo de contaminantes en el efluente según RCA para Planta Santa Fe.

Seguimiento ambiental para RCA 066/2004, RCA 285/2009 Y RCA 039/2010			
Parámetro	Unidad	Limite	Frecuencia
AOX	mg/L	-	Diaria
Color aparente	Pt-Co	-	Diaria
DBO5	mg O2/l	300	Semanal
DQO	mg O2/l	-	Semanal
Fósforo Total	mg/L	15	Semanal
Nitrógeno Total	mg/L	75	Semanal
pH	-	6,0-8,5	Diaria
Sólidos suspendidos totales	mg/L	300	Semanal
Temperatura	°C	40	Diaria
Caudal	M3/día	-	Diaria

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos de página web SEIA.

Anexo N°7: Parámetros y frecuencia de monitoreo de contaminantes en el efluente según RCA para Planta pacifico.

Seguimiento ambiental para RE 056/2004, RE 203/2009 y RE 3762/2011				
Parametro	Unidad	Límite máximo D.S. N° 90	Límite máximo Re SISS N°4562	Frecuencia
pH	-	6,0-8,5	6,0-8,5	Semanal
Temperatura	°C	40	40	Semanal
Caudal	M3/día	-	112.300	Diaria
DBO5	mgO2/L	300	300	Semanal
Fosforo	mg/L	15	15	Semanal
Nitrógeno total kjedahl	mg/L	75	75	Semanal
Solidos suspendidos totales	mg/L	300	300	Semanal
Coliformes fecales	NMP/100ml	1000	1000	Semanal
Poder espumógeno	mm	7	7	Semanal
Hidrocarburos fijos	mg/L	50	50	Semanal
Indice de Fenol	mg/L	1	1	Semanal
Pentaclorofenol	mg/L	0,01	0,01	Semanal

Fuente: Elaboración propia en base de datos obtenidos de página web SEIA.

Anexo N°8: Limites para efluentes con la mejor tecnología disponible alcanzable económicamente (BAT).

Contaminante	Unidad	Limite Máximo en 1 día	Promedio mensual	Punto de cumplimiento
2,4,6 - triclorofenol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
Pentaclorofenol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,3,7,8-tetraclorodibenzeno-p-dioxin (TCDD)	ug/L	10	NE	Efluente de planta de blanqueo
Compuestos orgánicos adsorbibles(AOX)	kg/ADT	0,951	0,623	Efluente final
Cloroformo	g/ADT	6,92	4,14	Efluente de planta de blanqueo
Triclorosiringol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,4,5- triclorofenol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,5- triclorocatecol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,5-tricloroguaiacol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,6-triclorocatecol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
3,4,6-tricloroguaiacol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
4,5,6-tetracloroguaiacol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo
Tetraclorocatecol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
Tetracloroguaiacol	ug/L	5,0	NE	Efluente de planta de blanqueo
2,3,4,6-tetraclorofenol	ug/L	2,5	NE	Efluente de planta de blanqueo

2,3,7,8-tetraclorodibenzofuran (TCDF)	pg/L	10	NE	Efluente de planta de blanqueo
---------------------------------------	------	----	----	--------------------------------

NE: No especifica

Fuente: Elaboración propia en base a datos recopilados de ECFR, 2021.

Anexo N°9: Límites para efluentes según mejor tecnología de control disponible (BPT).

Contaminante	Unidad	Límite máximo en 1 día	Promedio Mensual	Punto de cumplimiento
Planta Kraft que produce pulpa blanqueada para mercado				
DBO5	kg/ADT	15,45	8,05	Efluente final
SST	kg/ADT	30,4	16,4	Efluente final
pH	-	5,0-9,0	5,0-9,0	Efluente final
Planta Kraft que produce cartón, papel grueso y papel tisú.				
DBO5	kg/ADT	13,65	7,1	Efluente final
SST	Kg/ADT	24	12,9	Efluente final
pH	-	5,0-9,0	5,0-9,0	Efluente final
Planta Kraft que produce pulpa y papel fino				
DBO5	kg/ADT	10,6	5,5	Efluente final
SST	Kg/ADT	22,15	11,9	Efluente final
pH	-	5,0-9,0	5,0-9,0	Efluente final

Fuente: Elaboración propia en base a página web de US EPA.

