



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**



DEPURACIÓN DE EFLUENTES DE *Pinus radiata* D. Don y *Eucalyptus globulus* Labill PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA DEL ASERRÍO MEDIANTE EL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Presentada a la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad de Concepción,
para optar al título de Bioingeniero mención Ambiental

CARLA MUÑOZ GONZALEZ

Tutora: Dra. Gladys Vidal

Concepción, 2010

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi mamá y a mi hermana, Eugenia y Carolina, por su constante apoyo y ayuda no sólo en los años de universidad sino que a lo largo de toda mi vida. Por su cariño y compañía. Las amo demasiado, gracias por todo.

Agradezco muy sinceramente a la profesora Gladys Vidal por la confianza depositada en mí para el desarrollo de esta tesis, por la paciencia infinita y la ayuda brindada en todo momento. Siempre estará en mi corazón nunca la olvidare.

A Carlos, por el amor y apoyo entregados en todo momento.

A mis amigos que me acompañaron durante mi estadía en la universidad.

Al grupo de Biotecnología Ambiental por su apoyo, compañía y ayuda durante esta etapa de mi vida. Agradecer en especial a Catalina, Soledad, Leonardo y Guillermo por el apoyo, consejos, alegrías, compañía y por confiar siempre que lo podía lograr. Los quiero mucho y nos los olvidare.

Y por último agradecer a Dios, por acompañarme en todo momento y ayudarme a completar este ciclo de mi vida.

INDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Industria Forestal en Chile.....	11
1.1.1	Industria del Aserrío.	11
1.1.2	Contaminación ligada a industria del aserrío.	13
1.1.3	Compuestos extraíbles lipofílicos presentes en la madera.	14
1.2	Plantas Acuáticas	14
1.2.1	Descripción de las plantas.....	15
1.2.2	Uso de Plantas Acuáticas para tratamiento de residuos.	15
1.3	Humedales Artificiales	16
1.3.1	Tipos de Humedales Artificiales.	17
1.3.2	Principales componentes de los Humedales Artificiales.	17
1.3.3	Mecanismos de depuración de Humedales Artificiales.	18
1.3.4	Ventajas y Desventajas.	18
1.3.5	Resultados esperados.	19
1.4	Problemática de la industria del aserrío y su solución a través de Humedales Artificiales	19
1.4.1.	Toxicidad aguda	20
2.	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo general	22
2.2	Objetivos específicos.....	22
3	METODOLOGÍA	23
3.1	Obtención del Influyente	23
3.2	Caracterización del Humedal Artificial	24
3.2.1	Caracterización física de los mesocosmos.	24
3.2.2	Operación de los mesocosmos.....	24
3.2.3	Monitoreo de los mesocosmos.....	24
3.3	Métodos analíticos.....	25
3.3.1	Parámetros físico-químicos.	25

3.3.2	Actividad de la biomasa	26
3.3.3	Determinación de toxicidad aguda.....	26
4.	RESULTADOS.....	28
4.1	Caracterización fisicoquímica de influente de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	28
4.2	Comportamiento de la operación de los mesocosmos	29
4.2.1	Resultados de los mesocosmos alimentados con efluente de <i>Pinus radiata</i>	29
4.2.2	Resultados de los mesocosmos alimentados con efluente de <i>Eucalyptus globulus</i>	38
4.3	Evolución de las plantas	47
4.4	Evolución de la actividad de la biomasa.....	49
5	DISCUSIÓN	52
5.1	Caracterización fisicoquímica de influente de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	52
5.2	Comportamiento de la operación de los mesocosmos	52
5.3	Evolución de las plantas	54
5.4	Evolución de la actividad de la biomasa.....	55
6	CONCLUSIONES	56
7	REFERENCIAS.....	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procedimiento obtención del influente.....	23
Figura 2. Preparación del influente.....	23
Figura 3. Esquema de instalación del humedal artificial.....	25
Figura 4. Vaciado de los mesocosmos mediante un sifón.....	25
Figura 5. Protocolo para determinación de la actividad de la biomasa.....	26
Figura 6. Individuo representante del género <i>Daphnia magna</i>	27
Figura 7. Viales de realización de bioensayos agudos (30 mL)	27
Figura 8. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la DQO en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación.....	30
Figura 9. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de los compuestos fenólicos totales en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación.....	32
Figura 10. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de los compuestos aromáticos en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación	33
Figura 11. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de ácidos lignosulfónicos en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación.....	34
Figura 12. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la lignina UV ₂₇₂ en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación.....	35
Figura 13. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la lignina UV ₂₈₀ en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación.....	36
Figura 14. Evolución del pH [con planta (●), sin planta (○)] en efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación.....	37
Figura 15. Bioensayo agudo mediante <i>Daphnia magna</i> a las 48 horas de exposición [influyente (■), efluente con planta (☼), efluente sin planta (☼)]	38

Figura 16. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la DQO en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación...	39
Figura 17. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de los compuestos fenólicos totales en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación	41
Figura 18. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de los compuestos aromáticos en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación.....	42
Figura 19. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de ácidos lignosulfónicos en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación	43
Figura 20. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la lignina UV ₂₇₂ en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación.....	44
Figura 21. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la lignina UV ₂₈₀ en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación.....	45
Figura 22. Evolución del pH [con planta (●), sin planta (○)] en efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación.....	46
Figura 23. Bioensayo agudo mediante <i>Daphnia magna</i> a las 48 horas de exposición [influyente (■), efluente con planta (⊙), efluente sin planta (⊘)]	47
Figura 24. Evolución del humedal a través del tiempo a) 0 día, b) 56 días, c) 98 días.....	48
Figura 25. Altura de <i>Phragmites australis</i> durante el período de operación a) Efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> [mesocosmo 1 (▲), mesocosmo 2 (Δ)] b) Efluente de <i>Pinus radiata</i> [mesocosmo 1 (●), mesocosmo 2 (○)]	49

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización físico-química de los influentes de <i>P. radiata</i> y <i>E. globulus</i>	28
Tabla 2. Determinación de la DBO ₅ en Efluente de <i>Pinus radiata</i> durante el tiempo de operación	31
Tabla 3. Determinación de la DBO ₅ en Efluente de <i>Eucalyptus globulus</i> durante el tiempo de operación.....	40
Tabla 4. Velocidad de consumo de utilización de la biomasa y velocidad de utilización específica por microorganismos en función de la VCO, en humedales artificiales con efluente de <i>Pinus radiata</i>	50
Tabla 5. Velocidad de utilización de oxígeno de la biomasa y velocidad de utilización específica por microorganismos en función de la VCO, en humedales artificiales con efluente de <i>Eucalyptus globulus</i>	51

ABREVIACIONES

DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días	(mg/L)
DQO	Demanda Química de Oxígeno	(mg/L)
SST	Sólidos Suspendidos Totales	(mg/L)
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles	(mg/L)
VUO	Velocidad de utilización de oxígeno	(mgO ₂ /L·min)
VCO	Velocidad de carga orgánica	(gDQO/m ² ·d)
TRH	Tiempo de retención hidráulico	(d)
RAE	Residuos aprovechables energéticamente	(m ³ scc)

RESUMEN

La industria de la madera aserrada y sus derivados es el segundo gran rubro más importante de exportación forestal en Chile. Este tipo de industria debe utilizar grandes canchas de acopio para mantener la madera en espera de ser transformada. Los principales componentes de la madera son: celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos de la madera. Es conocido que, los compuestos extractivos, tanto ácidos resínicos, como fitoesteroles causan toxicidad hacia el medio ambiente. El uso de humedales construidos usando macrófitas puede constituir una alternativa de bajo costo de implementación y operación, que tienen la capacidad de eliminar compuestos contenidos en los lixiviados provenientes (taninos, ligninas, ácidos grasos de cadena larga y carga orgánica) de las canchas de riego por aspersión de la madera.

El objetivo de este estudio es evaluar la capacidad de depuración de los efluentes de *Pinus radiata* D. Don y *Eucalyptus globulus* Labill provenientes de la industria del aserrío mediante el uso de humedales artificiales.

Como metodología de trabajo, se utilizaron mesocosmos con y sin *Phragmites australis* (Cav.) Steud. Los sistemas fueron alimentados a través de un sistema fed-batch con influentes de pino y eucalipto, a incrementos de velocidad de carga orgánica (VCO) a un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 7 días durante un período de operación de 98 días.

Los resultados generales mostraron que existe similitud en el comportamiento de los mesocosmos alimentados con influentes de pino y eucalipto, observando una mayor eficiencia de eliminación en los humedales artificiales sin planta (70 % y 65 % de DQO, 85% y 82% de DBO₅, 60% y 65% de compuestos fenólicos, 60% y 40-55% de compuestos específicos en pino y eucalipto, respectivamente).

Los humedales artificiales fueron capaces de alcanzar eficiencias de eliminación altas de la materia orgánica y alrededor del 50% en compuestos específicos (por ejemplo, compuestos fenólicos totales o ligninas). Además, actuaron como estabilizador del pH, redujeron la toxicidad aguda presente en el influente de pino. Respecto de la microbiología en los sistemas, la degradación microbiana fue principalmente anaeróbica y las plantas no tuvieron un rol importante en la degradación y eliminación de la materia orgánica y compuestos específicos presente en los influentes atribuyéndoles un rol ornamental y estético. Debido a todo lo antes indicado, estos sistemas pueden constituir una alternativa en el tratamiento de este tipo de influentes provenientes de la industria del aserrío.

ABSTRACT

The industry of the sawed wood and its derivatives are more important the great second red of forest export in Chile. This type of industry must use great fields of storing to maintain the wood waiting being transformed. The main components of the wood are: cellulose, hemicellulose, lignin and extractive of the wood. It is known that, the extractive compounds, as much acid resin, as phytosterol cause toxicity towards the environment. The use of constructed wetlands using macrophytes can constitute an alternative of low cost of implementation and operation, that have the capacity to eliminate compound contents in the originating leached ones (tannins, lignins, fatty acids of long chain and mass load) of the fields of irrigation by aspersion of the wood.

The objective of this study is to evaluate the capacity of depuration of the effluents of *Pinus radiata* D. Don and *Eucalyptus globulus* Labill originating of the industry of sawmills by the use of constructed wetlands.

As work methodology, mesocosms with and without *Phragmites australis* (Cav.) Steud were used. The systems were fed through a system fed-batch with influents on pine and eucalyptus, to increases of VCO at the same time of hydraulic retention (TRH) of 7 days during a period of operation of 98 days.

The general results showed that similarity in the behavior of the mesocosms fed with influents of pine and eucalyptus exists, observing a greater efficiency of elimination in constructed wetlands without plant (70% and 65% of DQO, 85% and 82% of DBO₅, 60% and 65% of phenolic compounds, 60% and 40-55% of specific compounds in pine and eucalyptus, respectively).

Constructed wetlands were able to reach high efficiencies of elimination of the organic matter and around 50% in specific compounds (for example, total phenolic compounds or lignins). In addition, they acted like stabilizer of the pH, reduced to the acute toxicity present in the influent of pine. With respect to the microbiology in the systems, the microbial degradation was mainly anaerobic and the plants did not have an important role in the degradation and specific elimination of the organic matter and compounds present in the influents attributing to them an ornamental and esthetics role. Due to all before indicated, these systems can constitute an alternative in the treatment of this type of originating influents of the industry of sawmills.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Industria Forestal en Chile

La industria forestal es la segunda generadora de divisas para el país y la primera basada en un recurso forestal renovable. Genera cerca de 130 mil empleos directos y algo más de 300 mil indirectos en las áreas de silvicultura y cosecha, industria primaria y secundaria y servicios. A lo largo de los últimos 15 años, ha generado aproximadamente el 13 % del total anual de los retornos por exportaciones que realiza Chile.

1.1.1 Industria del Aserrío. La industria de la madera aserrada y sus derivados es el segundo gran rubro más importante de exportación forestal, con 37 % del total de productos, que se envían a una diversidad de mercados, destacando principalmente Estados Unidos, Japón y México (CORMA, 2008).

La industria del aserrado en Chile se inicia en el siglo pasado, con la inmigración alemana. En el año 1848, se instaló el primer aserradero tipo sierra circular en la Aguada de Corral (X Región). Los aserraderos son parte de la industria primaria, es decir, aquella que realiza las primeras transformaciones de la troza o rollizo, produciendo madera aserrada o elaborada y residuos madereros. Básicamente se definen dos tipos de aserradero, los de tipo móvil y los permanentes.

Según el INFOR (2005), en el año 1988 se registraron 1545 aserraderos en el país los que hasta la fecha han disminuido en número a tan sólo 595 aserraderos, esta disminución se debe a la drástica caída del mercado inmobiliario norteamericano sumado a la crisis financiera mundial, lo que ha repercutido en nuestro país con el cierre de un gran número de aserraderos y con ellos la pérdida de empleos sobre todo en la región del Bio-Bio por presentar la mayor cantidad de éstos (CORMA, 2008). Del grupo de aserraderos móviles, la estimación de los valores a nivel poblacional, consideró una muestra de 102 aserraderos móviles portátiles y 152 aserraderos móviles tradicionales. Para el grupo de aserraderos permanentes se realizó un censo de los 341 aserraderos existentes y trabajando, completándose un total de 595 aserraderos. La especie *Pinus radiata* es la más utilizada, abarcando el 96,7 % del consumo; luego están las especies nativas con un 1,9 %; Álamo con 0,6 %; *Pino Oregón* con 0,6 % y otras especies con el 0,2 % restante. Los valores obtenidos, libres de corteza, muestran una producción total de madera aserrada de 5.555.154 m³ssc, en donde el 93,8 % es aportado por los aserraderos permanentes, el 1,2 % por los aserraderos móviles portátiles y un 5,0 % por los aserraderos móviles tradicionales. La

producción de madera elaborada alcanza a 1.915.659 m³ssc en donde un 55,2 % es generado por aserraderos con remanufactura y un 44,8 % por aserraderos con elaboración. Los consumos asociados logran un volumen total de 17.205.663 m³scc, manteniéndose las proporciones anteriores, con un 95,6 % para los aserraderos permanentes; 0,8 % y 3,6 % para los aserraderos móviles portátiles y móviles tradicionales, respectivamente.

La relación entre los niveles de producción y consumo entrega un rendimiento general de 52 % de producción de madera aserrada, generando en el proceso residuos de lampazo y aserrín, además de un volumen de astillas y tapas, provenientes de la utilización de los lampazos. Parte del volumen generado de madera aserrada, se reprocesa para generar madera elaborada o de remanufactura, con lo cual se genera un nuevo volumen de residuos, del tipo despunte, viruta y aserrín. Considerando el total de consumo con corteza, los resultados muestran que el volumen de lampazo es de 611.844 m³ssc (3,6 %); el aserrín, proveniente de las dos etapas, es de 2.986.793 m³ssc (17,4 %); despuntes, 309.323 m³ssc (1,8 %); viruta, 342.106 m³ssc (2,0 %); y, por último, la corteza alcanza a 1.292.583 m³ (7,5 %), completándose un volumen total de RAE de 5.542.649 m³scc, correspondiente al 32,2% del volumen (scc) de trozas consumido. La diferencia de 67,8 % se distribuye de la siguiente forma: 5.555.154 m³ssc (32,3 %) de madera aserrada; 1.915.659 m³ssc (11,1 %) de madera elaborada; 4.133.328 m³ssc (24,0 %) de astillas; y 58.873 m³ssc (0,4 %) de tapas. El equivalente en unidades de peso del RAE es de 3.253.724 toneladas.

La disponibilidad y destinos que tienen los residuos obtenidos principalmente son: la comercialización con un 56,6 %, seguido del autoconsumo con un 33,8 %, y en menor medida, se regala o acumula, con un 5,8 % y 3,8 % respectivamente. Considerando sólo los residuos que son comercializados, el 60,7 % del volumen tiene como destino la industria forestal (plantas de celulosa y tableros), ya sea para la generación de energía o como insumo para nuevos productos (INFOR, 2006).

Los destinos que registran las exportaciones forestales en el lapso enero-marzo 2007 totalizaron 90 países, donde los cuatro mayores, Estados Unidos, China, México y Japón, representaron el 63 % del valor total exportado en dicho período; sólo con excepción de Estados Unidos, todos presentaron alzas en sus exportaciones: entre 6 % y 93 %. Estados Unidos registró una baja de 12,4 % en el monto exportado, donde las principales bajas lo protagonizaron las molduras de madera, la madera cepillada y los muebles. A este país se enviaron 131 productos forestales en los tres primeros meses de este año. Los exportadores más relevantes que enviaron productos

forestales a este país fueron Aserraderos Arauco, Paneles Arauco y Molduras Trupán, del grupo Arauco; Masisa, CMPC Maderas y Promasa. Estas 6 compañías representan el 62 % de las exportaciones totales trimestrales a Estados Unidos (INFOR, 2007).

Este rubro, principalmente las grandes empresas de aserraderos, han incorporado cambios importantes en su tecnología y prácticas de gestión, reduciendo fuertemente la generación de residuos y privilegiando el consumo de tales recursos potenciales. Sin embargo, el tema de la gestión ambiental en las empresas va perdiendo importancia desde el nivel de medianas empresas hasta muy pequeños aserraderos. Es precisamente en esas últimas donde la situación ambiental es más crítica, vinculando principalmente al tema del manejo de residuos en general.

1.1.2 Contaminación ligada a industria del aserrío. Los aserraderos producen contaminación a partir de los desechos no utilizados, tales como corteza, aserrín y despuntes, los que también pueden producir contaminación de cursos de agua y/o del aire. Otra fuente importante de contaminación la constituye el uso de baños antimanchas a base de sales de cobre, cromo, arsénico y pentaclorofenato de sodio, debido a que sus derrames contaminan el suelo y las napas freáticas. Al respecto se dice que existen tres productos cuyo uso podría constituirse en riesgo de intoxicación de personas y del ambiente; éstos son el pentaclorofenato de sodio, las sales preservantes que incorporan arsénico y los volúmenes de aserrín generados como sub productos de desecho.

De la industria del aserrío se pueden clasificar en estratos que producen entre 90,001 y 220,000 m³/año (estrato 1); 20,001 y 90,000 m³/año (estrato 2); 2,000 y 20,000 m³/año (estrato 3).

Los efluentes están formados principalmente por aguas originadas en el riego por aspersion de las canchas de trozas; lo que no constituye problema para los aserraderos del estrato 1, los cuales poseen sistemas de recirculación de aguas. El 66,7 % de los aserraderos encuestados en el estrato 2 utiliza riego en sus canchas de trozas, pero la mitad de ellos no cuenta con sistemas de recirculación de aguas, por lo cual éstos podrían estar sobrepasando la norma. Para los residuos industriales sólidos, como son la corteza y el aserrín, existe un manejo de ellos en los aserraderos de los estratos 1 y 2, ya sea como combustible o comercializados para la fabricación de otros productos. El 60 % de los aserraderos encuestados en el estrato 3 deja en descomposición el aserrín generado en el proceso productivo y el 46,7 % deja en descomposición o acopios la corteza. Por lo tanto, los últimos presentan un potencial riesgo de incendios o una potencial

contaminación de las aguas subterráneas, por lavado e infiltración de las sustancias extraíbles presentes en la madera.

En cuanto a los aserraderos, los principales problemas dicen relación con el agua de las canchas de riego, el destino de la corteza y el aserrín, y la utilización de pentaclorofenato de sodio en el baño antimanchas. De los aserraderos con mayor producción, el 50 % posee un sistema eficiente de recirculación de aguas y la totalidad de los desechos se utilizan. El 50 % de la producción no considera manipulación directa con pentaclorofenato. En el estrato de producción media, el riego es similar al anterior y la totalidad de la corteza se utiliza como combustible (De la Maza *et al.*, 1998).

1.1.3 Compuestos extraíbles lipofílicos presentes en la madera. Producto de la descomposición natural o incidida por los compuestos agregados a la mantención de la madera surge el problema debido a la solubilización de compuestos extraíbles que pueden ser liberados al medio ambiente. Estos compuestos extraíbles lipofílicos en la madera varía entre distintas especies de árboles y especialmente entre madera dura y blanda. Estos compuestos presentes en la especie *Eucalyptus globulus* está comprendida principalmente por esteroides (31,12 %), ésteres de esteroides (25 %), ácidos grasos de cadena larga (13,4 %), cetonas de esteroides (10,5 %), hidrocarburos (8 %), triglicéridos (6,37 %), ceras (2,79 %), tocoferoles (1,21 %), diglicéridos (0,82 %), monoglicéridos (0,76 %) y alcoholes grasos (0,17 %) (Gutiérrez *et al.*, 1999). Los compuestos presentes en la especie de Pino en porcentajes corresponden a ácidos resínicos (54,13 %), diterpenos (15,15 %), monoterpénos (14,01 %), ácidos grasos (12,79 %) y sesquiterpenos (3,92 %) (Fernández, 2001). Además los llamados esteroides, específicamente están principalmente en *Eucalyptus globulus* y los ácidos resínicos están presentes en mayor proporción en madera de *Pinus sp.*

1.2 Plantas Acuáticas

Las plantas vasculares acuáticas han conquistado el ambiente hídrico después de muchos años de adaptación, las cuales presentan una distribución cosmopolita. Se definen como aquel vegetal cormófito (con raíz, tallo y hojas), que habita permanentemente en ambientes inundados, ya sea sumergido o emergente en lagos, lagunas, ríos, arroyos y estuarios.

Se han clasificado tres grupos:

-Plantas Libre Flotantes: son aquellas cuyo cuerpo vegetativo flota total o parcialmente, pudiendo estar también bajo la superficie del agua.

-Plantas Sumergidas: son aquellas especies cuyo cuerpo vegetativo está inmerso en el agua y están arraigadas al sustrato. Las flores y hojas pueden flotar en la superficie del agua.

-Plantas Emergentes: son aquellas que poseen gran parte del cuerpo vegetativo fuera del agua, pero las raíces y parte de tallos y hojas se encuentran sumergidas.

Anatómicamente, las plantas que viven en ambientes acuáticos presentan una gran cantidad de tejido con células que dejan grandes espacios llenos de aire, especialmente en sus órganos vegetativos, cualidad que le permite una mejor adaptación para la flotabilidad. También existe una notable disminución de los tejidos conductores y mecánicos, los que usualmente quedan fisiológicamente inactivos en las especies que crecen sumergidas o flotantes (Rodríguez y Dellarossa, 1998).

1.2.1 Descripción *Phragmites australis* (Cav.) Steud. Pertenece a la familia de las *Poaceae*, del tipo emergente, la que presenta rizomas enterrados en el fango, cañas de 1-4 m de alto y hojas de 20-40 cm de largo por 1-3 cm de ancho, planas, adelgazadas en punta. Las flores van dispuestas en panojas de 20-40 cm de largo. Este tipo de macrófita presenta una distribución cosmopolita, encontrándose en Chile desde la II Región hasta Puerto Montt, crece frecuentemente en pajonales y a la orilla de esteros y lagunas.

Dentro de sus requerimientos ecológicos se encuentran, Luminosidad: crece a plena luz aunque soporta sombra, Temperatura: calor moderado. Continentalidad: intermedia. Humedad: suelos encharcados. Acidez: suelos débilmente ácidos, pH 4.5-7.5. Nitrógeno: principalmente suelos ricos, indicadora de riqueza de nutrientes. Por sus largas cañas es utilizada para cubrir techos de construcciones livianas.

1.2.2 Uso de Plantas Acuáticas para tratamiento de residuos. La utilización de plantas acuáticas para la depuración de aguas residuales tiene hoy en día gran interés por cuanto que implica el uso de sistemas blandos de depuración de costo reducido respetuosos con el medio ambiente. Estos sistemas se denominan genéricamente “humedales artificiales”, y en contraposición a la sencillez de su apariencia, son sistemas dinámicos y complejos en su funcionamiento, porque combinan

procesos físicos, químicos y biológicos en un medio diseñado, construido y manejado por el hombre, en el que la vegetación es un elemento fundamental.

En términos cuantitativos se considera que las principales actuaciones son, por una parte, la de servir de filtro para mejorar los procesos físicos de separación de partículas y por otra, la de actuar a modo de soporte activo para el desarrollo de biofilms de microorganismos que actúan purificando el agua. Otros papeles a reseñar son, la oxigenación del medio circundante a la rizosfera y la extracción de nutrientes.

Para que haya una buena implantación de las plantas y que la vegetación prospere, obviamente no deberán sobrepasarse los umbrales de tolerancia a la contaminación de las especies que intervienen en el humedal artificial.

El abanico de especies que se utilizan en los humedales artificiales es reducido y en general se centra en especies helófitas o emergentes debido a que los sistemas más extendidos son los que constan de un sustrato para soporte de las plantas, como son los sistemas de flujo superficial y los sistemas de flujo sub-superficial o de lecho de grava. En estos sistemas las especies vegetales más utilizadas son las eneas, género *Typha*, y el carrizo, *Phragmites australis*, ya que en ellas concurren características muy favorables, como son amplia versatilidad ecológica, alta productividad en biomasa, y facilidad de multiplicación (Valdés *et al.*, 2005). En estudios realizados por Hedmark y Scholz (2008), Masbough *et al.* (2005) emplean la planta acuática del género *Typha* para la eliminación efectiva de los contaminantes proveniente de la industria de aserraderos. Además, según Jordan *et al.* (2008) y Prabu y Udayasoorian (2007) también utilizan plantas acuáticas como *Phragmites australis* para eliminación de efluentes proveniente de la industria de la celulosa.

1.3 Humedales Artificiales

Investigaciones actuales han utilizado sistemas de humedales artificiales para así disminuir el impacto de las descargas de estos compuestos a los ecosistemas naturales (Vera *et al.*, 2007; Jordan *et al.*, 2008; Hedmark y Scholz, 2008; Masbough *et al.*, 2005; Prabu y Udayasoorian, 2007).

Un humedal artificial es una tecnología diseñada para imitar los procesos que ocurren en los humedales naturales, siendo eficaces en la eliminación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno

(DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Nitrógeno, fósforo, metales pesados e hidrocarburos.

Estos son sistemas que dan lugar a interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, radiación solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental.

Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos.

La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

Dentro de las funciones que presentan estos humedales están el fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos y lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

1.3.1 Tipos de Humedales Artificiales. Existen dos tipos de sistemas desarrollados para tratamiento de aguas residuales que corresponden a sistemas de flujo libre que son estanques en los que la superficie del agua se encuentra expuesta a la atmósfera y las plantas emergentes están enraizadas sobre una capa de suelo generalmente impermeabilizado, para evitar la infiltración al manto freático. La depuración de las aguas se logra al circular el agua a través de los tallos y raíces de las plantas y sistemas de flujo subsuperficial son estanques con el fondo sobre el cual se coloca un medio poroso que puede ser suelo, arena o grava en el que se siembra las plantas emergentes. Las aguas residuales aplicadas a estos sistemas son generalmente pretratadas (Silva, 2002).

1.3.2 Principales componentes de los Humedales Artificiales. Los humedales se definen como áreas que se encuentran permanentemente inundadas por aguas superficiales o profundas y donde prevalece una densa vegetación adaptada a suelos inundados (Brix, 1997).

Este tipo de sistema existe una estrecha relación entre plantas, sustrato y microorganismos, los que en conjunto generan un sistema integrado para la eliminación de variados contaminantes.

La eliminación de estos contaminantes ocurre mediante a una compleja variedad de procesos fisicoquímicos y biológicos, entre las plantas acuáticas, el sustrato y los microorganismos. Los mecanismos de remoción asociados a humedales son: la sedimentación, coagulación, adsorción, filtración, absorción y transformación microbiana (Dahab, 2001). Dentro de las plantas más frecuentes utilizadas para construcción de humedales destacan las espadañas (*Typha sp.*), la caña o junquillo (*Phragmites australis*) y los juncos (*Scirpus sp.*).

1.3.3 Mecanismos de depuración de Humedales Artificiales. Los principales mecanismos de depuración que actúan en un humedal son los siguientes:

-La eliminación de sólidos suspendidos, por medio de la sedimentación, decantación, filtración y degradación realizada en conjunto por la acción del sustrato, las raíces y rizomas de las plantas.

-La eliminación de materia orgánica es realizada por los microorganismos que viven adheridos al sistema radicular de las plantas y que reciben el oxígeno a través del sistema de aireación. También se elimina una parte por sedimentación.

-La eliminación de nitrógeno se realiza por adsorción directa por las plantas y en menor medida, por fenómenos de nitrificación-desnitrificación y amonificación realizados por bacterias.

-La eliminación de fósforo se realiza por absorción por las plantas, adsorción sobre las partículas de arcilla y precipitación de fosfatos insolubles, principalmente con Al y Fe, en suelos ácidos y con calcio en suelos básicos.

-La eliminación de microorganismos patógenos es realizada por filtración y adsorción en partículas de arcilla, por acción predatoria de otros organismos (bacteriófagos y protozoos), por toxicidad de sustancias bactericidas generadas por el sistema radicular de la planta y por la radicación UV de la luz solar incidente.

Los metales tienen una alta afinidad por adsorción y complejación con materia orgánica y pueden ser acumulados en los humedales. También existen transformaciones microbianas y asimilación por las plantas (Fernández, 2006).

1.3.4 Ventajas y Desventajas. Las ventajas que presentan estos sistemas de tratamiento principalmente es su gran eficiencia en la depuración de aguas residuales, simplicidad de

operación, bajo costo energético, baja producción de residuos, bajo impacto ambiental y buena integración al medio ambiente (Vera, 2007).

Dentro de las principales desventajas que presenta este tipo de sistema es el área requerida para su emplazamiento, suministros constantes de efluentes con el fin de contrarrestar las pérdidas por evaporación, alta sensibilidad a condiciones climáticas estacionales, las que pueden reducir la eficiencia del sistema. así como también el efecto de altas cargas de materia orgánica, grasas o altas concentraciones de amoníaco.

1.3.5 Resultados esperados. Para reducir el impacto en el ambiente generado por los lixiviados de la madera formados en canchas de acopio en la industria del aserrío, se realizará el tratamiento de estas sustancias mediante el uso de humedales artificiales. Las macrófitas actúan como filtro mecánico y provee sustrato para microorganismos, los cuales forman parte de los procesos de degradación y absorción de contaminantes.

Según estudios de Hedmark *et al.* (2008) a través de este sistema de tratamiento se obtuvieron porcentajes de eliminación para DQO, DBO₅, ácidos grasos de cadena larga, taninos y lignina de aproximadamente 60 %, 50 %, 69 % y 42 %, respectivamente. Según estudios de Masbough, *et al.* (2005) a través de este sistema de tratamiento se obtuvieron los siguientes porcentajes de reducción de DQO, DBO₅, ácidos grasos de cadena larga, taninos y lignina de 50 %, 60 %, 69 % y 42 %, respectivamente. Lo que hace de este sistema de tratamiento una alternativa en el tratamiento de este tipo de efluentes.

1.4 Problemática de la industria del aserrío y su solución a través de Humedales Artificiales

En la industria del aserrío, los efluentes generados en las canchas de acopio se generan en el riego por aspersión de las trozas y luego esta agua escurre o fluye a través de las pilas de troncos, cortezas y derivados almacenados. Las sustancias encontradas en la madera son extraídas con el agua, y compuestos tales como, ácidos resínicos, ligninas, terpenos, ácidos grasos y taninos, entre otros, pueden ser lixiviados a napas freáticas. Estos residuos provenientes de canchas de acopio generan un aumento en la demanda bioquímica de oxígeno en sedimentos a medida que se descomponen y éstos pueden contaminar aguas subterráneas, ya que contienen altas concentraciones de compuestos orgánicos naturales. Estos compuestos pueden ser tóxicos para plantas acuáticas y animales.

La baja riqueza de especies y baja diversidad registrada en estos sitios, pueden ser debido en gran parte a los residuos de aserrín de la industria de aserrío, que conducen a color turbio de los residuos de la madera como la alta carga de material suspendido lo que lleva a una baja en la fotosíntesis por lo tanto a baja productividad en las especies. Además, estos residuos depositados en los cursos de aguas o cerca de ellos puede afectar la variedad y abundancia de los peces (Arimoro *et al.*, 2007).

En los extractivos de la madera también se encuentran compuestos esteroidales que se presentan en mayor cantidad en *Eucalyptus globulus Labill* y los ácidos resínicos en *Pinus radiata D. Don*. Sin embargo, tanto ácidos resínicos como esteroides están relacionados con toxicidad. El primero a una toxicidad aguda y el segundo a una toxicidad crónica (López, 2008).

1.4.1. Toxicidad aguda

Los bioensayos han sido desarrollado y estandarizados por agencias internacionales EPA, USEPA, ASTM. En Chile, la normativa vigente de bioensayos de toxicidad, es la Normativa Chilena Oficial 2083 (1999), de protección ambiental, ya que por su carácter cuantitativo representan una herramienta alternativa necesaria para mejorar la regulación y manejo del recurso agua. Estos ensayos permiten determinar la capacidad de un contaminante (sea una sustancia pura o efluente) de producir efectos tóxicos sobre los organismos vivos, cuando estén expuestos durante un cierto tiempo a determinadas concentraciones.

En el caso de los ensayos de toxicidad aguda, estos son basados en respuestas letales (Mortalidad, inmovilidad) a través de la concentración letal 50 (LC₅₀), que determina la concentración del tóxico (conocido o desconocido) que es capaz de matar o inmovilizar el 50 % de la población en 48 horas. Estos ensayos nos dan una aproximación de la sensibilidad de los organismos y su efecto en la trama trófica en un corto periodo de tiempo.

Dentro de los organismos más utilizados se encuentran los que corresponden al género *Daphnia sp.* Estos organismos tienen varios aspectos biológicos interesantes que las hacen ideales para los ensayos, entre ellas se pueden indicar las siguientes: a) su reproducción es partenogenética, con lo que se pueden obtener muchas generaciones que son clónicas entre sí, evitando así las diferencias genéticas, b) corto ciclo de vida (3 ó 4 semanas) que permite la realización de ensayos de toxicidad crónicos en un espacio breve de tiempo, c) fácilmente cultivable en condiciones de laboratorio, ya que requiere poco espacio, siendo su mantenimiento más económico que el de

otros animales como los peces ó moluscos (Larraín, 2005). Por otro lado, representan a la comunidad de zooplancton, siendo un elemento importante en las cadenas alimenticias de las aguas dulces.

En el caso de los efluentes de aserrío, existe poca información sobre los efectos agudos, sin embargo, es conocido que los compuestos extractivos de la madera, tales como ácidos resínicos presentan letalidad aguda sobre los organismos acuáticos en concentraciones que van desde los 0,4 mg/L, causando además genotoxicidad y potencial bioacumulación en los tejidos de peces (Belmonte *et al.*, 2008; Belmonte *et al.*, 2006 a y b).

Por lo antes descrito, el presente trabajo tiene como finalidad evaluar el uso potencial de humedales artificiales, para el tratamiento de sustancias presentes en efluentes de *Eucalyptus globulus Labill* y *Pinus radiata D. Don* proveniente de lixiviados originados en canchas de acopio de aserraderos, utilizando *Phragmites australis (Cav.) Steud.* Al mismo tiempo, se evaluará la presencia de compuestos con toxicidad aguda y la factibilidad de eliminación mediante este tipo de sistemas.

Tomando como base la necesidad de un tratamiento de los efluentes generados por la industria del aserrío, debido al impacto ambiental que presentan, como riesgo de contaminación de napas freáticas y cursos de aguas, se propone la siguiente hipótesis de trabajo:

Los sistemas de humedales artificiales son capaces de eliminar compuestos contenidos en los efluentes de *Pinus radiata D. Don* y *Eucalyptus globulus Labill* provenientes del procesos de lixiviación de la madera de la etapa de acopio en la industria del aserrío.

Para desarrollar este proyecto y responder a la hipótesis de trabajo se pretenden cumplir los objetivos que se detallan en el apartado siguiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad de depuración de los efluentes de *Pinus radiata D. Don* y *Eucalyptus globulus Labill* provenientes de la industria del aserrío mediante el uso de humedales artificiales.

2.2 Objetivos específicos

- Obtener y caracterizar físico-químicamente efluentes de *Pinus radiata D. Don* y *Eucalyptus globulus Labill* proveniente de la industria del aserrío.

- Evaluar la eliminación de sustancias orgánicas y compuestos específicos, mediante *Phragmites australis (Cav.) Steud.*

- Evaluar la toxicidad aguda de influentes y efluentes de *Pinus radiata D. Don* y *Eucalyptus globulus Labill* mediante el organismo bioindicador *Daphnia magna Straus*.

3 METODOLOGÍA

3.1 Obtención del Influyente

El influente fue obtenido a partir de aserrín de dos especies mayormente utilizadas en los procesos de aserrío de la Octava Región, como lo son el *Pinus radiata D. Don* y *Eucalyptus globulus Labill.*

Para la obtención del lixiviado, se tomaron por separado 500 g de aserrín obtenido previamente desde aserraderos de la zona y se le añadieron 10 L de agua proveniente de puntera, con lo que se pretende simular las condiciones de aspersión de la madera en canchas de acopio. Posteriormente, la mezcla fue agitada mediante un equipo Stirrer ss 10, durante 24 horas dejándose decantar por un periodo de 1 h para su posterior filtración y almacenamiento en bidones de 5 L para su uso (Figura 1 y 2).

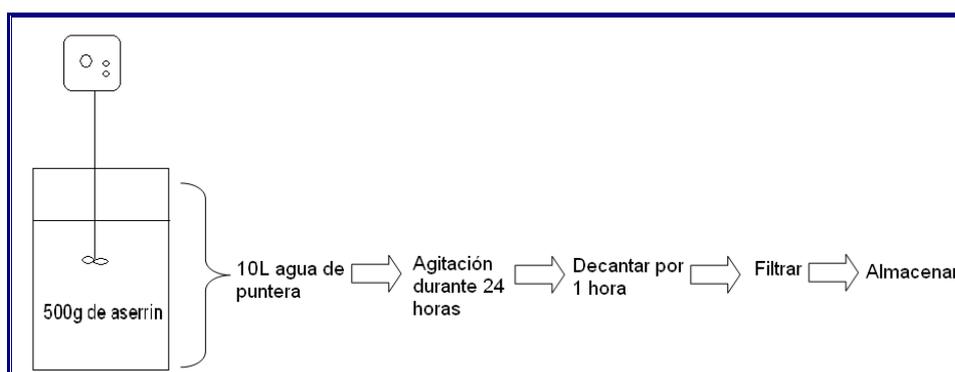


Figura 1. Procedimiento obtención del influente



Figura 2. Preparación del influente

3.2 Caracterización del Humedal Artificial

3.2.1 *Caracterización física de los mesocosmos.* Se instalaron 6 humedales artificiales de flujo superficial como sistema de tratamiento de efluentes de pino y eucalipto proveniente de la industria del aserrío. Las cubetas empleadas fueron de plástico transparente con las siguientes dimensiones: 0,29 m (largo) x 0,21 m (ancho) x 0,20 m (alto). Ellos fueron llenados con grava (26 mm de diámetro) a una profundidad de 0,10 m. 4 de las cubetas contienen dos plántulas de *Phragmites australis* (Cav.) Steud y 2 restantes solo contienen grava (Figura 3). Ambos experimentos con planta y sin planta, fueron llevados en paralelo bajo las mismas condiciones por 98 días de operación. El llenado de los mesocosmos fue manual y el vaciado mediante el uso de un sifón (Figura 4).

3.2.2 *Operación de los mesocosmos.* Los mesocosmos fueron alimentados a través de un sistema fed-batch y operados a distintas concentraciones de influente a 3 velocidades de carga orgánica (VCO) que se fueron incrementando progresivamente, de 10 a 20 g DQO/m²·d y 10 a 40 g DQO/m²·d para mesocosmos alimentados con efluente de pino y eucalipto, respectivamente a un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 7 días.

3.2.3 *Monitoreo de los mesocosmos.* La toma de muestra se realizó desde el 2 de septiembre hasta 9 de diciembre (para un total de 98 días). Se tomaron 2 tipos de muestras, las muestras de la columna de agua (muestra de agua tomada de tubo de PVC ubicado en centro de cada humedal) se realizaron ensayos fisicoquímicos y de toxicidad aguda, y las muestras del medio de soporte cercano a la rizosfera de las plantas a las cuales se determinaron la actividad de la biomasa a través de la técnica de respirometría. Además, se realizaron mediciones longitudinales de las plantas presentes en los mesocosmos cada semana durante el período de operación.

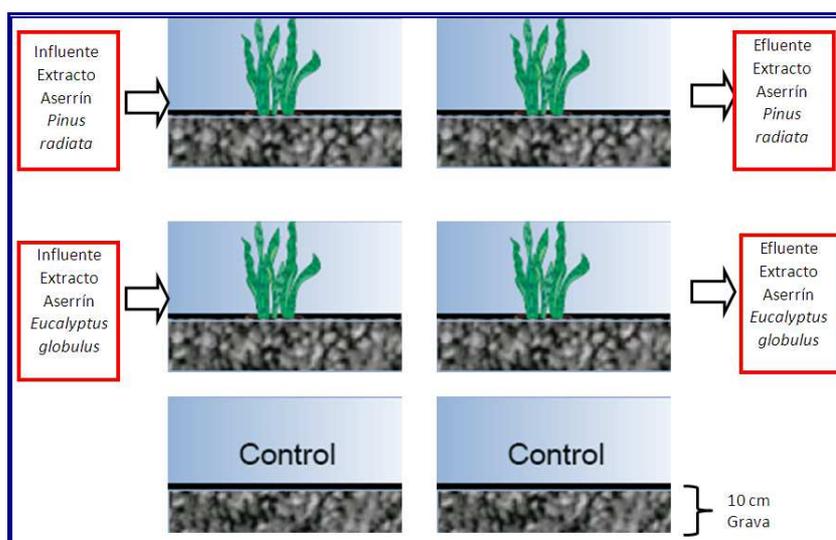


Figura 3. Esquema de instalación del humedal artificial



Figura 4. Vaciado de los mesocosmos mediante un sifón

3.3 Métodos analíticos

3.3.1 Parámetros físico-químicos. Para la caracterización de los influentes y efluentes se determinaron los parámetros de DQO, DBO₅, SST, SSV y compuestos fenólicos totales (UV_{215nm}) estos fueron medidos de acuerdo a las técnicas descritas en “Standard Methods” (APHA/WWA- WPCF, 1985). La DBO₅ se realizó utilizando el método de Winkler ácida modificada sin inoculación, se empleó un volumen de muestra suficiente para que la concentración de oxígeno disuelto se reduzca a la mitad, durante cinco días de incubación a 20 °C (APHA, 1998). La DQO se determinó espectroscópicamente (660 nm) mediante el equipo (Spectronic unicam-Genesis 10 UV), después de 2 h de digestión a temperatura 150 °C con solución de dicromato de potasio y sulfato de plata. Por otro lado, se evaluaron compuestos

específicos tales como: ácido lignosulfónico (VIS_{346nm}), compuestos fenólicos totales (UV_{215nm}), compuestos aromáticos (UV_{254nm}), lignina y sus derivados (UV_{272nm}, UV_{280nm}) mediante espectrofotómetro Génesis 10UV Unicam (Çeçen, 2003). Además fueron medidos pH (WTW Inolab pH level 1) y nutrientes (NOVA 60). Los análisis de DQO, compuestos específicos, compuestos fenólicos totales y pH se realizaron semanalmente tanto en el influente como efluente, mientras que la DBO₅ se realizó al término de cada velocidad de carga orgánica.

3.3.2 Actividad de la biomasa. Se midió a través de un análisis respirométrico, que consiste en medir en forma continua en un sistema cerrado el consumo de oxígeno por parte de una población de microorganismos. Durante los primeros 5 minutos se realizó las mediciones cada 15 segundos para después de los 5 minutos medir cada 30 segundos hasta los 15 minutos el consumo de oxígeno. Para esto, se inyecta una cierta cantidad de efluente en la fase endógena de respiración de la biomasa y se empiezan a registrar las lecturas de concentración de oxígeno disuelto, con el tiempo, para obtener el perfil de consumo de oxígeno. Esta experiencia se lleva a cabo usando 5 ml de biomasa con una concentración de 1 g SSV/L proveniente de un sistema de humedales artificiales, previamente lavada con buffer, con la finalidad de eliminar el posible contenido de compuestos que lleven a un valor erróneo de la actividad de la biomasa. Después de ajustado el pH a 7 y oxigenado por 30 minutos de tal forma de mantener una cantidad de oxígeno de a lo menos 7-8 mgO₂/L. Posteriormente se introduce el oxímetro a la cámara de medición, la que se encuentra sumergida en un baño de agua a 20° C y se procede a realizar las pruebas con el influente de Pino y Eucalipto con 100 µL (Figura 5). Además se realiza un blanco con buffer y pruebas de respiración a la biomasa sin ser afectado por el efluente de Pino y Eucalipto (velocidad de utilización de oxígeno endógeno). Se realizará al término de cada velocidad de carga orgánica.



Figura 5. Protocolo para determinación de la actividad de la biomasa

3.3.3 Determinación de toxicidad aguda. Para evaluar la toxicidad aguda, se seleccionaron neonatos de *Daphnia magna Straus* (Figura 6), menores a 24 horas de vida (Neonatos). Se

evaluaron 5 niveles de tratamiento (concentraciones mL) (100, 50, 25, 12.5, 6.25) 4 réplicas por cada nivel, y 5 organismos por réplica, en envases de vidrio (30 mL) (Figura 7). El bioensayo tuvo una duración de 48 horas, sin recambio ni alimentación. La respuesta evaluada en los organismos fue la mortalidad a las 48 horas de exposición ($LC_{50-48\text{ h}}$), cada una de las pruebas fueron calculadas a través del análisis PROBIT (EPA 1993).



Figura 6. Individuo representante de *Daphnia magna* Straus



Figura 7. Viales de realización de bioensayos agudos (30 mL)

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización fisicoquímica de influente de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*

Los resultados obtenidos de la caracterización del influente derivado del aserrín de *P. radiata* y *E. globulus*, son presentados en la Tabla 1. De los resultados se puede indicar que existe una diferencia en el pH inicial de las muestras, siendo el más ácido el Eucalipto con 5,3. En cuanto a la cantidad de materia orgánica (DQO) el influente de eucalipto es el que posee más materia orgánica (832,8 mg/L), siendo también reflejada en la cantidad de compuestos fenólicos presentes (13076,8 mg/L) y compuestos específicos en general presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización físico-química de los influentes de *P. radiata* y *E. globulus*

Parámetro	Unidad	<i>P. radiata</i>	<i>E. globulus</i>
pH	-	5,8	5,2
DQO	mg/L	376,5	832,8
Compuestos fenólicos totales ($\lambda_{215\text{nm}}$)	mg/L	1909,2	13076,8
Color ($\lambda_{440\text{nm}}$)	-	0,1	1,0
Compuestos aromáticos ($\lambda_{254\text{nm}}$)	Abs	1,41	12,26
Derivados de ligninas ($\lambda_{272\text{nm}}$)	Abs	1,27	11,34
Derivados de ligninas ($\lambda_{280\text{nm}}$)	Abs	1,29	10,44
Ácido lignosulfónico ($\lambda_{346\text{nm}}$)	Abs	0,56	4,08
Nitrógeno Total	mg/L	1,9	< 0,5
Fósforo Total	mg/L	0,9	3,7

λ : Longitud de onda

4.2 Comportamiento de la operación de los mesocosmos

A continuación se entregarán los resultados relacionados del comportamiento de los diferentes mesocosmos y la eficiencia de eliminación de compuestos específicos y parámetros globales monitoreados en el tiempo en los diferentes sistemas.

4.2.1 *Resultados de los mesocosmos alimentados con efluente de Pinus radiata.* Se evaluó la eliminación de materia orgánica a través de los parámetros: DQO y DBO₅. En la Figura 8, se observa la evolución de la eliminación de materia orgánica a través de la determinación de la DQO durante el período de operación de 98 días con VCO de 10 a 20 g DQO/m²·d. Se evidenció reducción de materia orgánica a VCO bajas (13,13 g DQO/m²·d), con eficiencia de eliminación entre 70 % y 80 % con concentraciones que fluctúan entre 50 y 70 mg/L, y a VCO altas como 19,47 g DQO/m²·d se evidencia una eficiencia de eliminación de 60 % y 70 %, cuyas concentraciones medias fueron 120 mg/L y 90 mg/L, en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente.

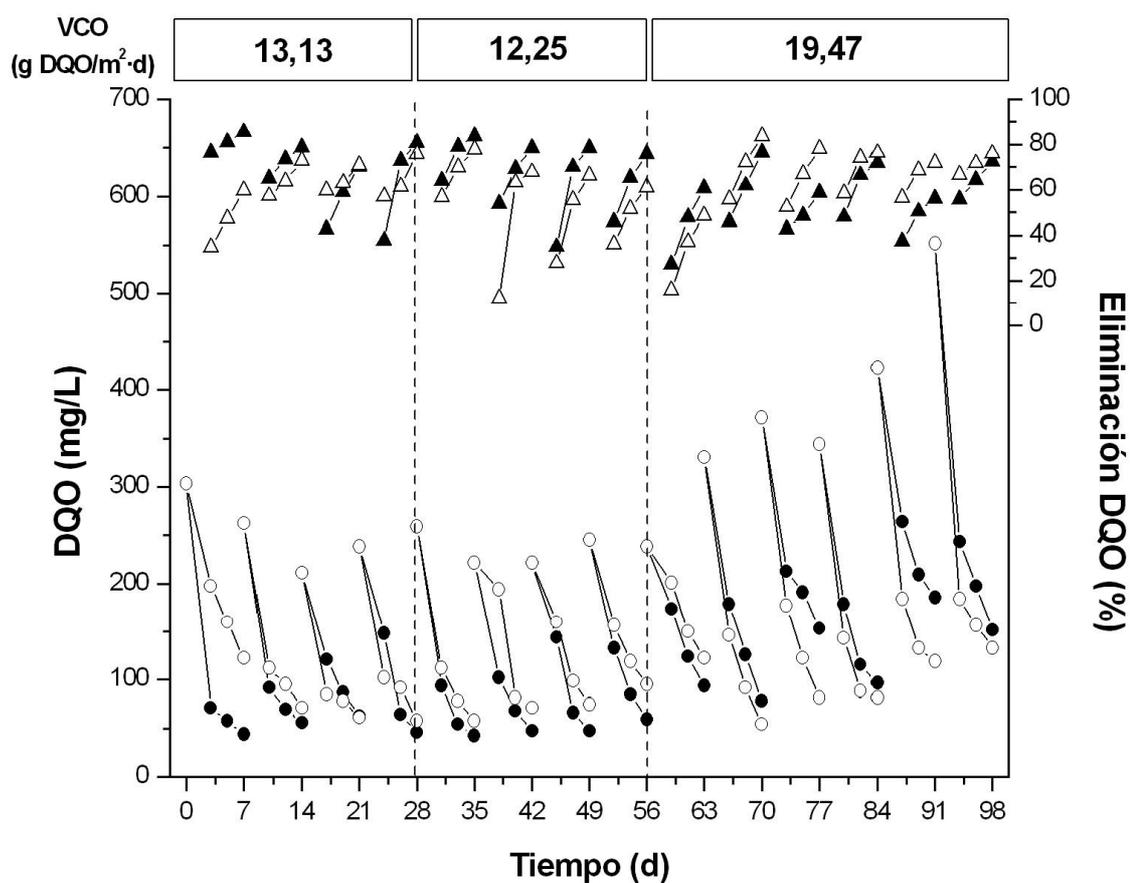


Figura 8. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de la DQO en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

En la Tabla 2, se observa la evaluación de la demanda biológica de oxígeno, medidas los días 56 y 98 días del período de operación. Este parámetro indica la biodegradabilidad del efluente mostrando valores máximos de eficiencia a VCO altas de 90 % y 85 % con planta y sin planta, respectivamente.

Tabla 2. Determinación de la DBO₅ en Efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

VCO (g DQO/m ² ·d)	Tiempo (d)	Humedal artificial con planta			Humedal artificial sin planta		
		Influente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiencia (%)	Influente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiencia (%)
12,25	56	78,5	16,1	79,5	78,5	22,5	71,3
19,47	98	104,0	8,25	92,1	104,0	15,6	85,0

En la Figura 9, se observa la evolución de los compuestos fenólicos totales a distintas VCO. A VCO bajas se evidencia una mayor eficiencia de eliminación de 60 % y 75 % con concentraciones que fluctúan entre 200 y 550 mg/L, mientras que a VCO altas se observa una reducción de 50 % y 60 % cuyas concentraciones medias fueron 1 g/L y 700 mg/L, en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente.

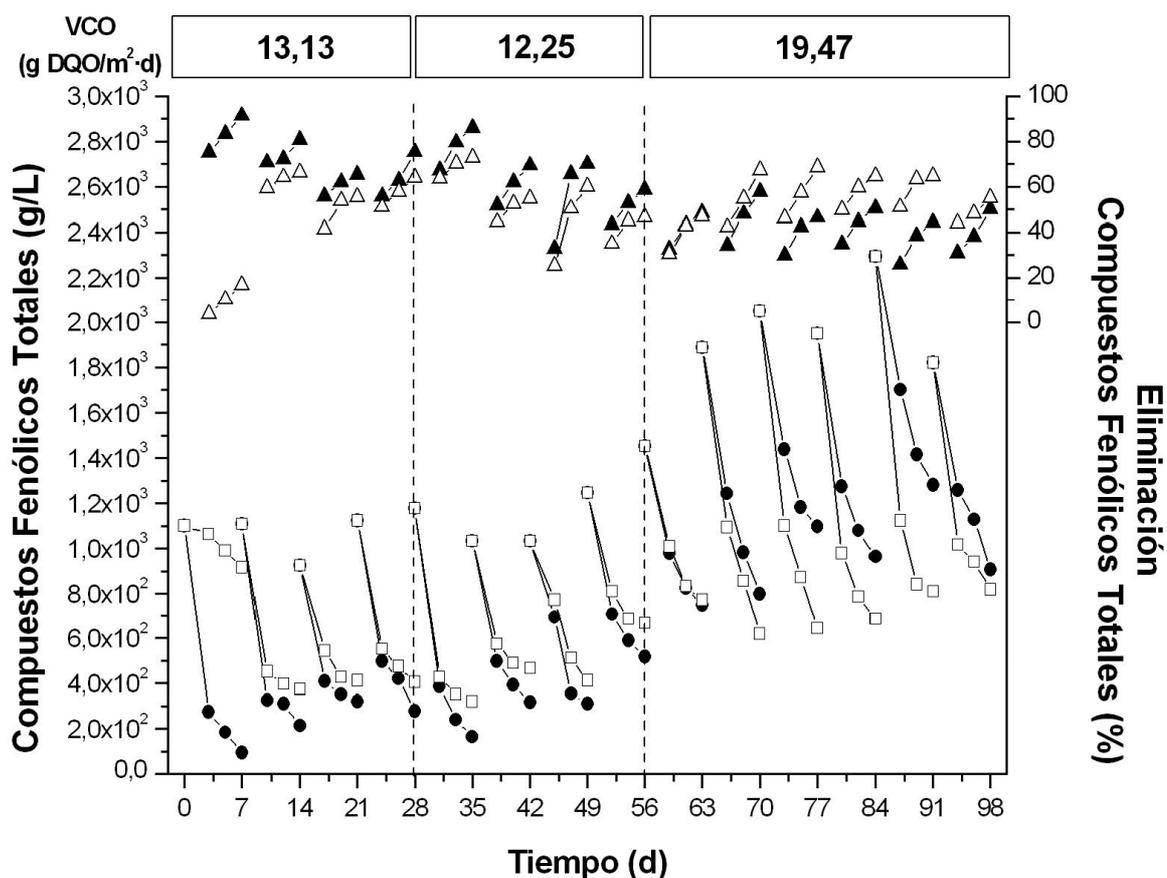


Figura 9. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de los compuestos fenólicos totales en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

En la Figura 10, se observa la evolución de los compuestos aromáticos, a distintas VCO. A VCO bajas (13,13 g DQO/m²·d) se evidencia una mayor eficiencia de eliminación de 65 % y 70 % con valores de absorbancias en el rango entre 0,3 y 0,4, mientras que a VCO altas (19,47 g DQO/m²·d) se observa una reducción de 50 % y 60 % cuyas absorbancias medias fueron 0,7 y 0,6, en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente. El mismo comportamiento se observa para los ácidos lignosulfónicos (Figura 11) con eficiencias de 70 % y 75 % con valores de absorbancias en el rango entre 0,05 y 0,11 para VCO bajas (13,13 g DQO/m²·d) y presentando una eficiencia similar ambos sistemas de 60 % con una absorbancia media de 0,22 a VCO altas (19,47 g DQO/m²·d). Las ligninas (Figura 12 y Figura 13), cuyas concentraciones se midieron tanto en el UV₂₇₂ como también en el UV₂₈₀, se obtuvieron mayores eficiencias a VCO bajas (13,13 g DQO/m²·d) de 60 % y 70 % con valores de absorbancias entre 0,2 y 0,4, y a VCO altas

(19,47 g DQO/m²·d) se observa una reducción de 50 % y 60 % cuyas absorbancias medias fueron 0,6 y 0,5 en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente.

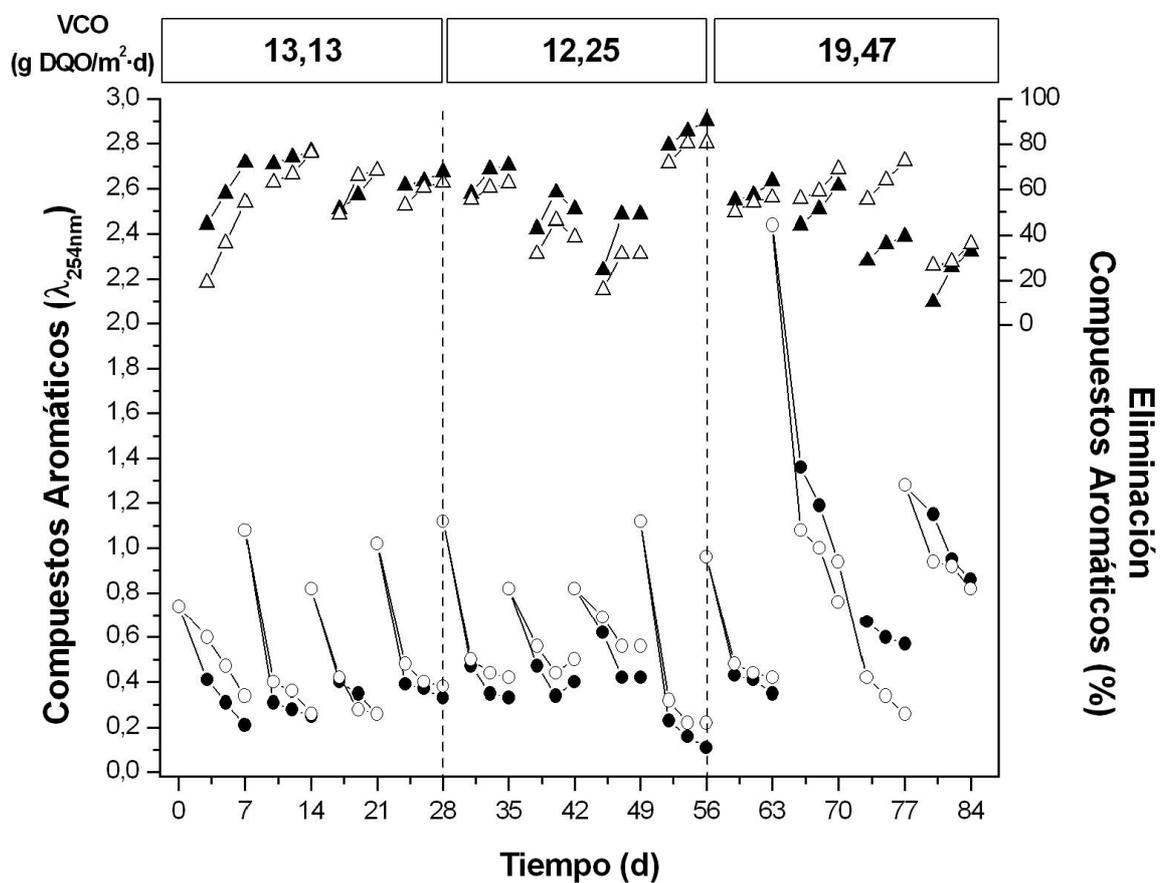


Figura 10. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de los compuestos aromáticos en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

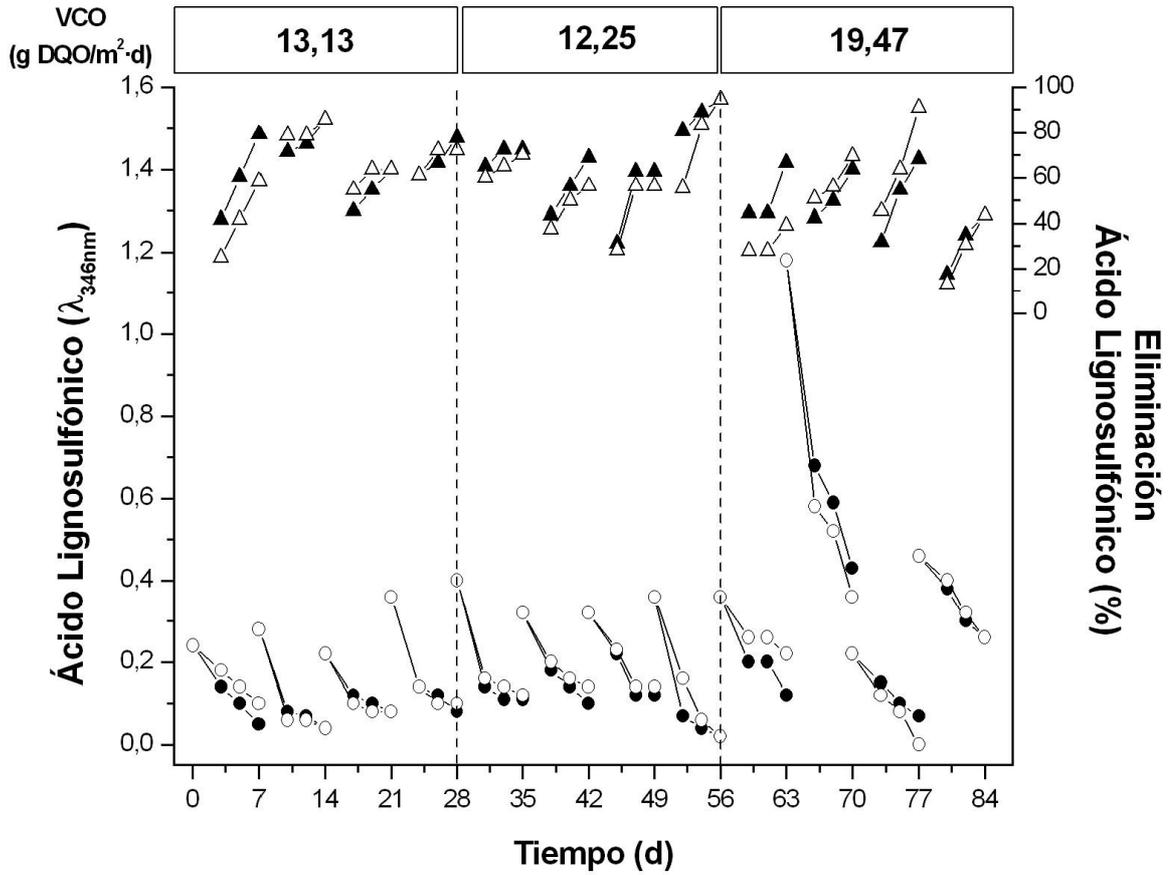


Figura 11. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de ácidos lignosulfónicos en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

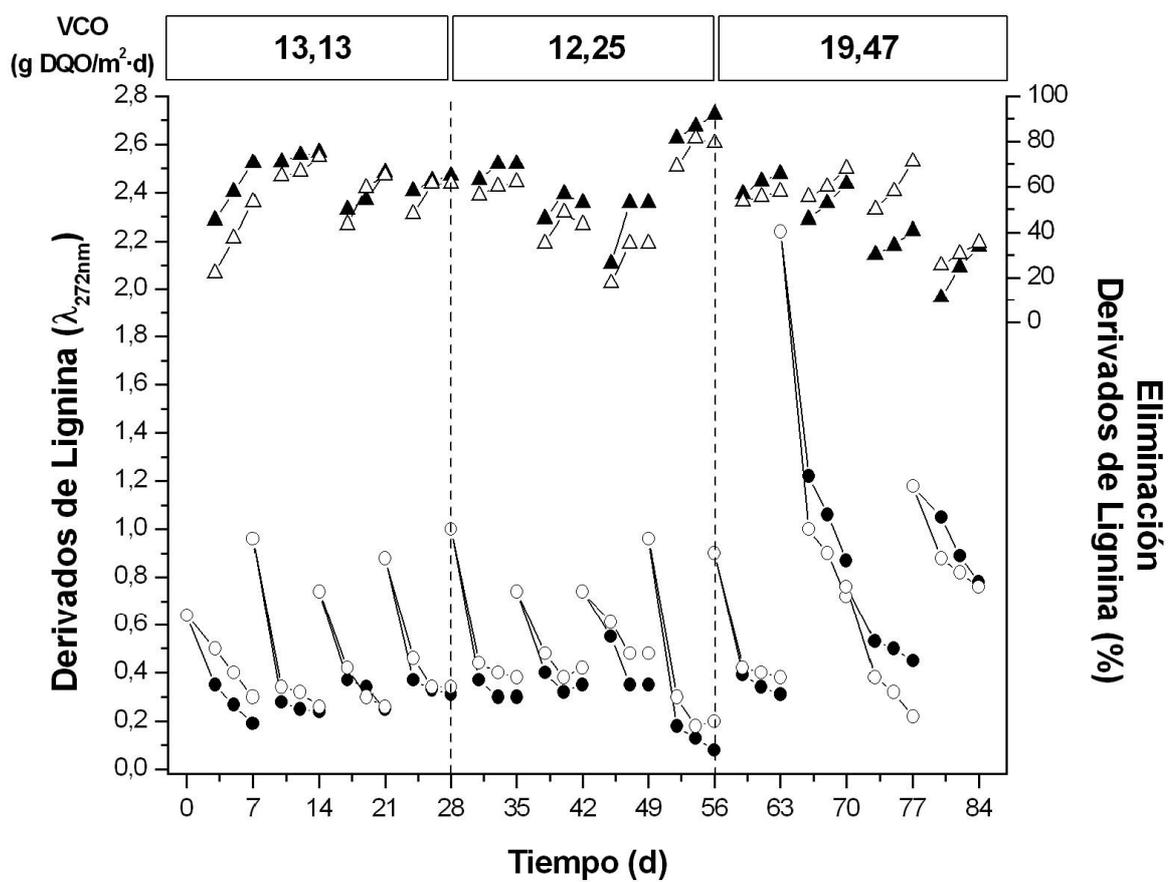


Figura 12. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de la lignina UV₂₇₂ en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

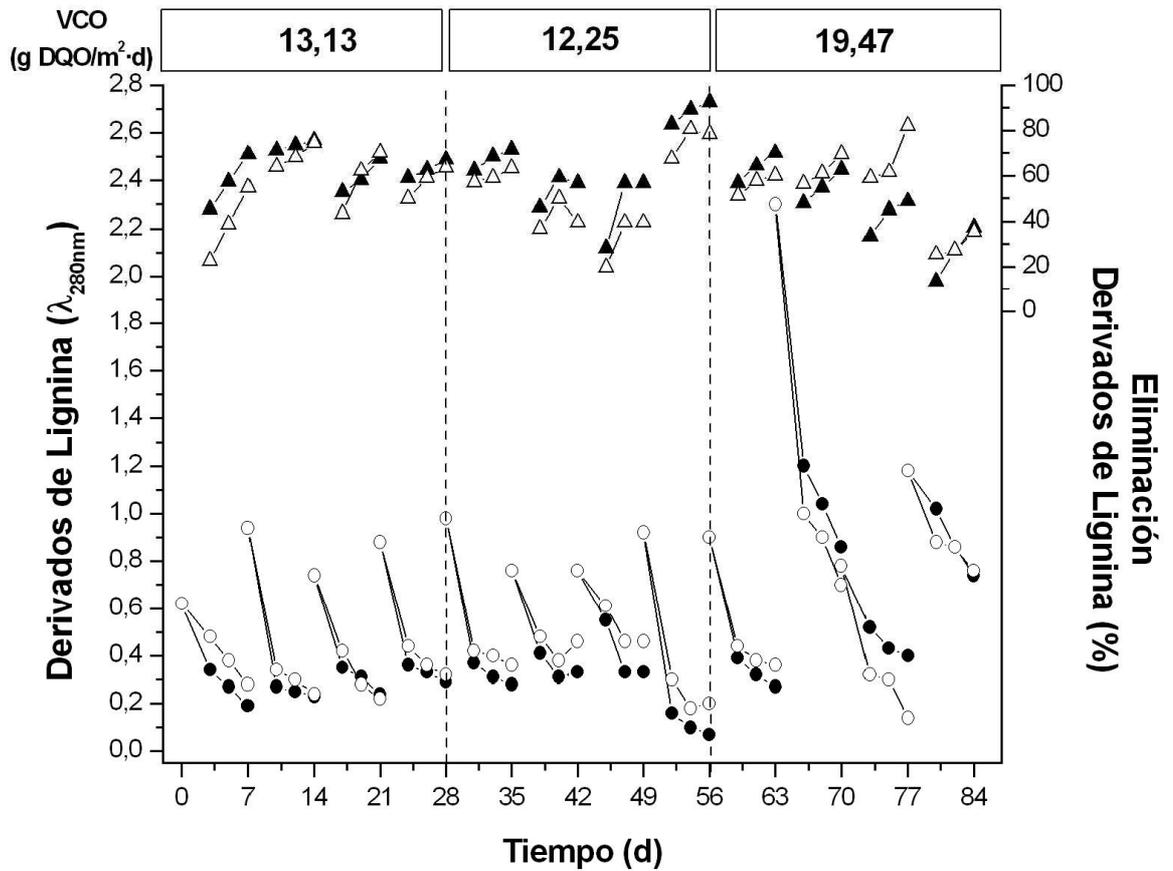


Figura 13. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la lignina UV₂₈₀ en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

Se observa en la Figura 14, la evolución del pH a las distintas VCO durante el tiempo de operación. Siendo el pH del influente ácido registrando valores entre 5,8 y 6,6. Mientras que, el efluente refleja un aumento creciente, llegando a valores máximos entre 7,3 y 7,5.

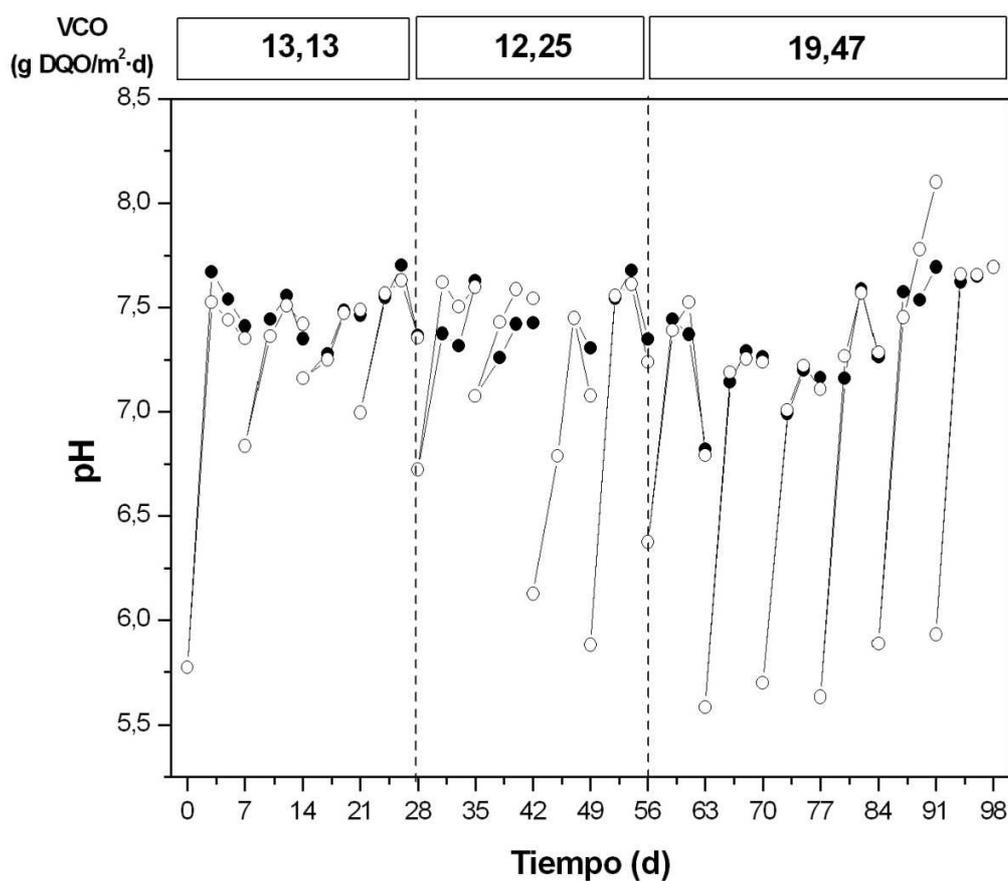


Figura 14. Evolución del pH [con planta (●), sin planta (○)] en efluente de *Pinus radiata* durante el tiempo de operación

En la Figura 15, muestra la reducción de la toxicidad aguda por medio de los humedales artificiales mediante ensayos letales, expresada en mortalidad de individuos a las 48 horas de exposición. Se observa que el influente de pino posee una toxicidad aguda medida como concentración letal 50 (CL_{50}) de 39,173 mL con límites de detección (19,440-89,032 mL) al 95 % de confianza. Por otro lado, se evidencia una reducción de toxicidad por parte de este sistema de humedales artificiales, siendo mayor en los mesocosmos con plantas.

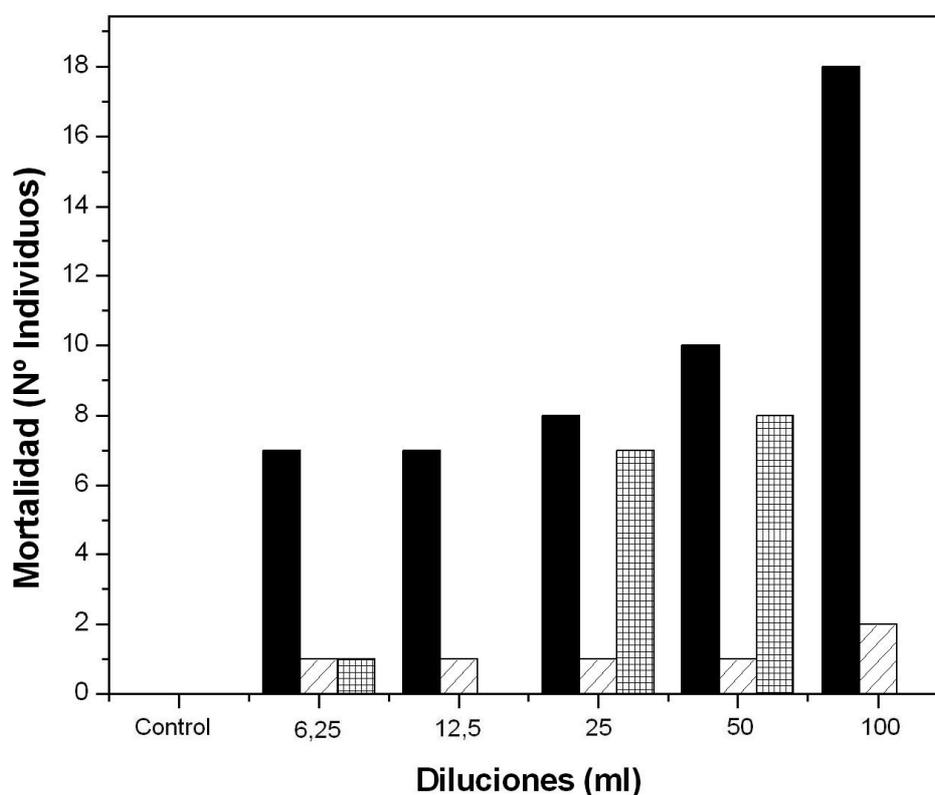


Figura 15. Bioensayo agudo mediante *Daphnia magna* a las 48 horas de exposición [influyente (■), efluente con planta (▨), efluente sin planta (▩)]

4.2.2 *Resultados de los mesocosmos alimentados con efluente de Eucalyptus globulus.* Se evaluó la eliminación de materia orgánica a través de los parámetros: DQO y DBO₅. En la Figura 16, se observa la evolución de la eliminación de materia orgánica a través de la determinación de la DQO durante el período de operación de 98 días con VCO de 10 a 40 g DQO/m²·d. Se evidenció reducción de materia orgánica a VCO bajas (14,05 g DQO/m²·d), con eficiencia de eliminación entre 60 % y 70 % con concentraciones que fluctúan entre 80 y 200 mg/L, y a VCO altas como 40,01 g DQO/m²·d se evidencia una eficiencia de eliminación de 55 % y 65 %, cuyas concentraciones medias fueron 420 mg/L y 330 mg/L, en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente.

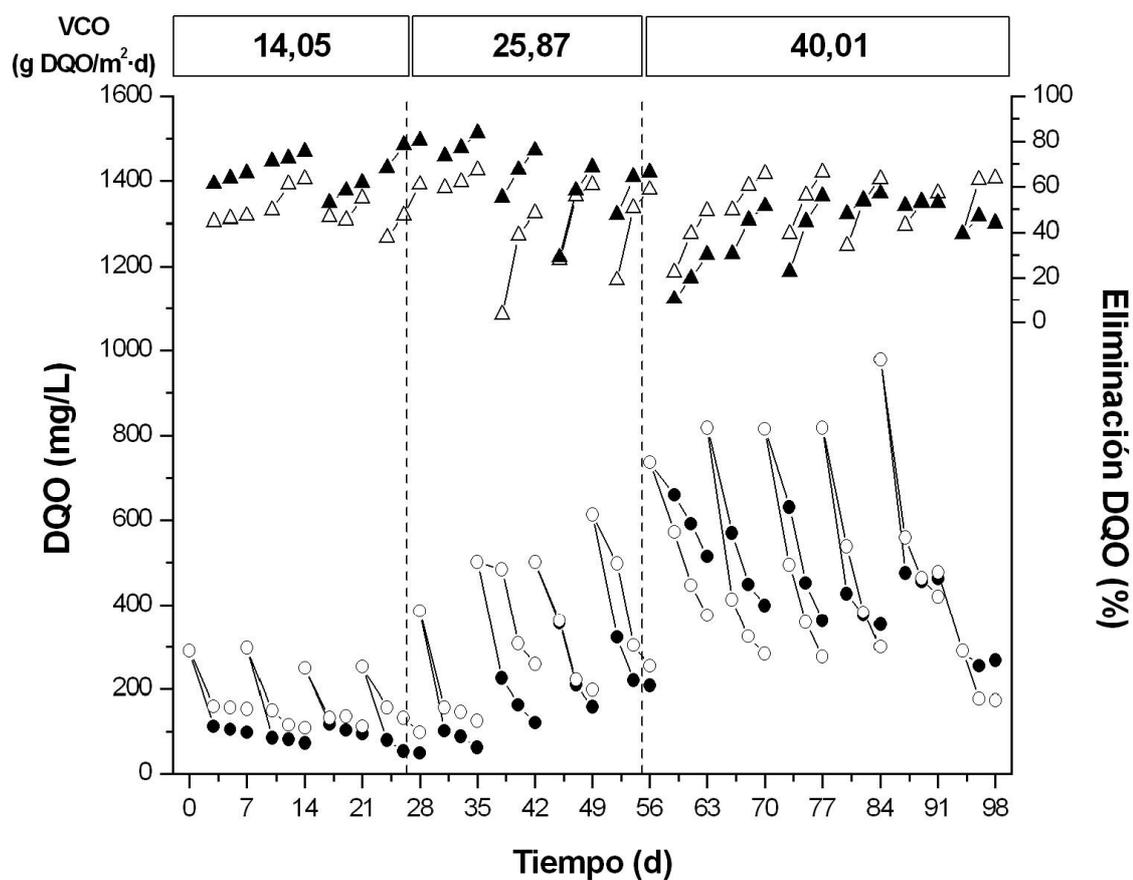


Figura 16. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de la DQO en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

En la Tabla 3, se observa la evaluación de la demanda biológica de oxígeno, medidas los días 56 y 98 días del período de operación. Este parámetro indica la biodegradabilidad del efluente mostrando valores máximos de eficiencia a VCO altas de 93 % y 82 % con planta y sin planta, respectivamente.

Tabla 3. Determinación de la DBO₅ en Efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

VCO (g DQO/m ² ·d)	Tiempo (d)	Humedal artificial con planta			Humedal artificial sin planta		
		Influyente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiencia (%)	Influyente (mg/L)	Efluente (mg/L)	Eficiencia (%)
25,87	56	144	78	45,8	144	60	58,3
40,01	98	216	15,5	92,8	216	40	81,5

En la Figura 17, se observa la evolución de los compuestos fenólicos totales a distintas VCO. A VCO bajas se evidencia una mayor eficiencia de eliminación de 55 % y 70 % con concentraciones que fluctúan entre 1 y 2,2 g/L, mientras que a VCO altas se observa una reducción de 55 % y 65 % cuyas concentraciones medias fueron 5,7 g/L y 4,5 g/L, en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente.

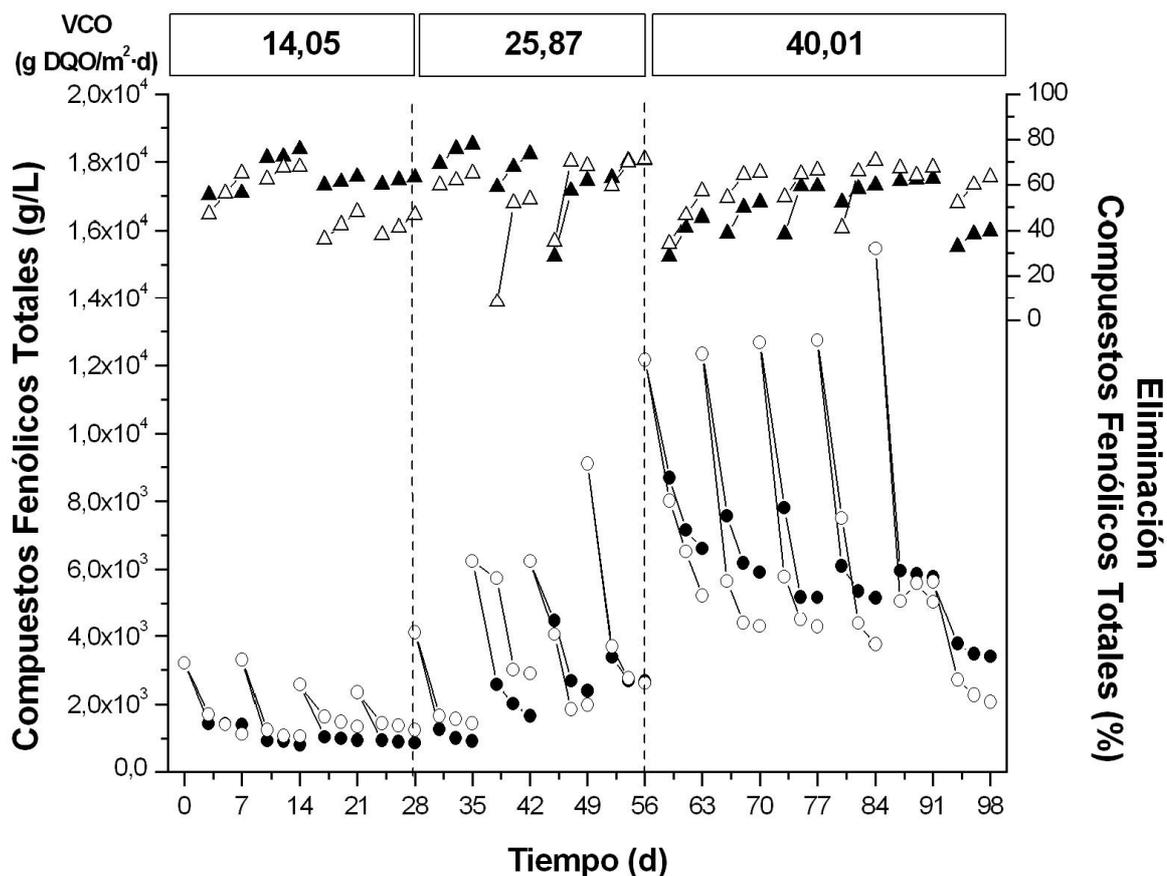


Figura 17. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de los compuestos fenólicos totales en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

En la Figura 18, se observa la evolución de los compuestos aromáticos, a distintas VCO. A VCO bajas (14,05 g DQO/m²-d) se evidencia una mayor eficiencia de eliminación entre 50 % y 75 % con valores de absorbancias en el rango entre 1,4 y 3,6, mientras que a VCO altas (40,01 g DQO/m²-d) se observa una reducción de 49 % y 60 % cuyas absorbancias medias fueron 7,8 y 5,7, en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente. El mismo comportamiento se observa para los ácidos lignosulfónicos (Figura 19) con eficiencias entre 30 % y 46 % con valores de absorbancias en el rango entre 0,55 y 1,5 para VCO bajas y presentando una eficiencia de 30 % y 42 % con absorbancias medias de 2,8 y 2,3 a VCO altas. Las ligninas (Figura 20 y Figura 21), cuyas concentraciones se midieron tanto en el UV₂₇₂ como también en el UV₂₈₀, se obtuvieron mayores eficiencias a VCO bajas de 50 % y 70 % con valores de absorbancias entre 1,2 y 3,2, y a

VCO altas se observa una reducción de 47 % y 55 % cuyas absorbancias medias fueron 6 y 5 en sistemas con plantas y sin plantas, respectivamente.

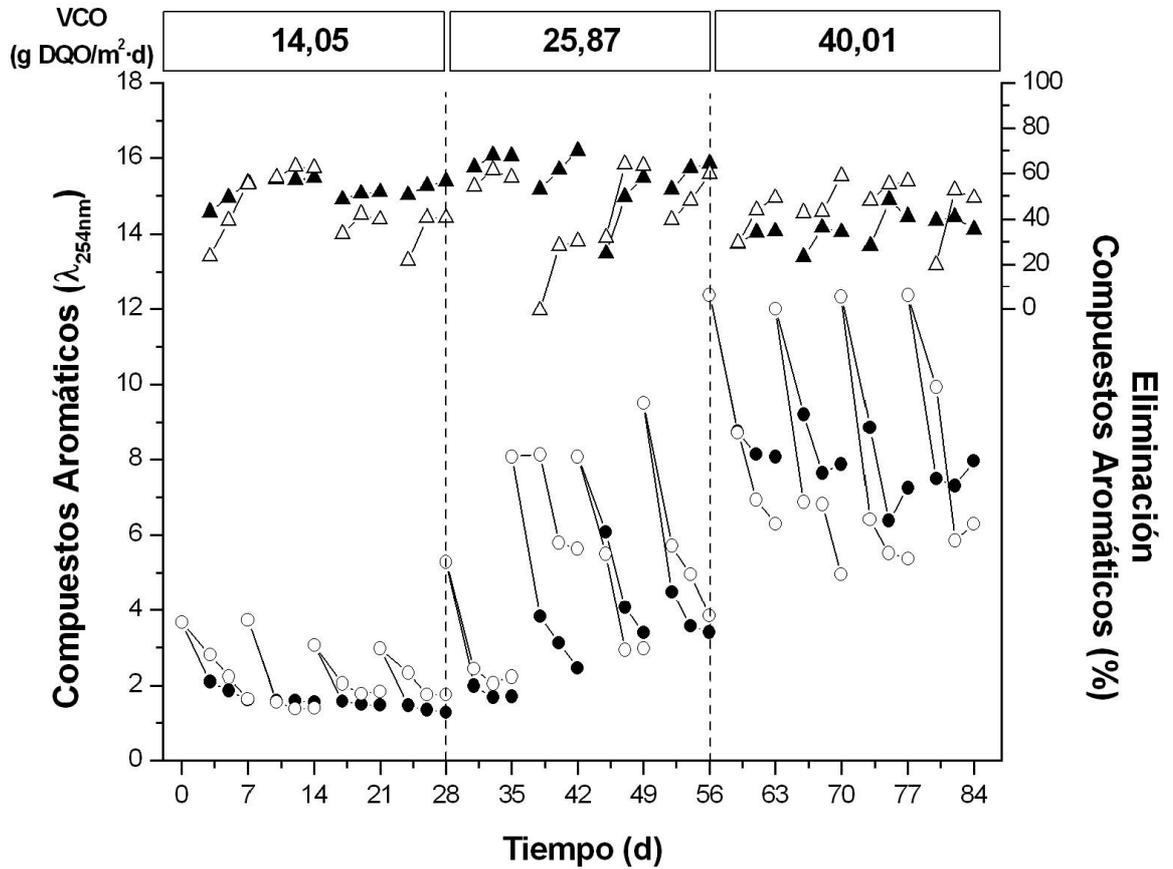


Figura 18. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de los compuestos aromáticos en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

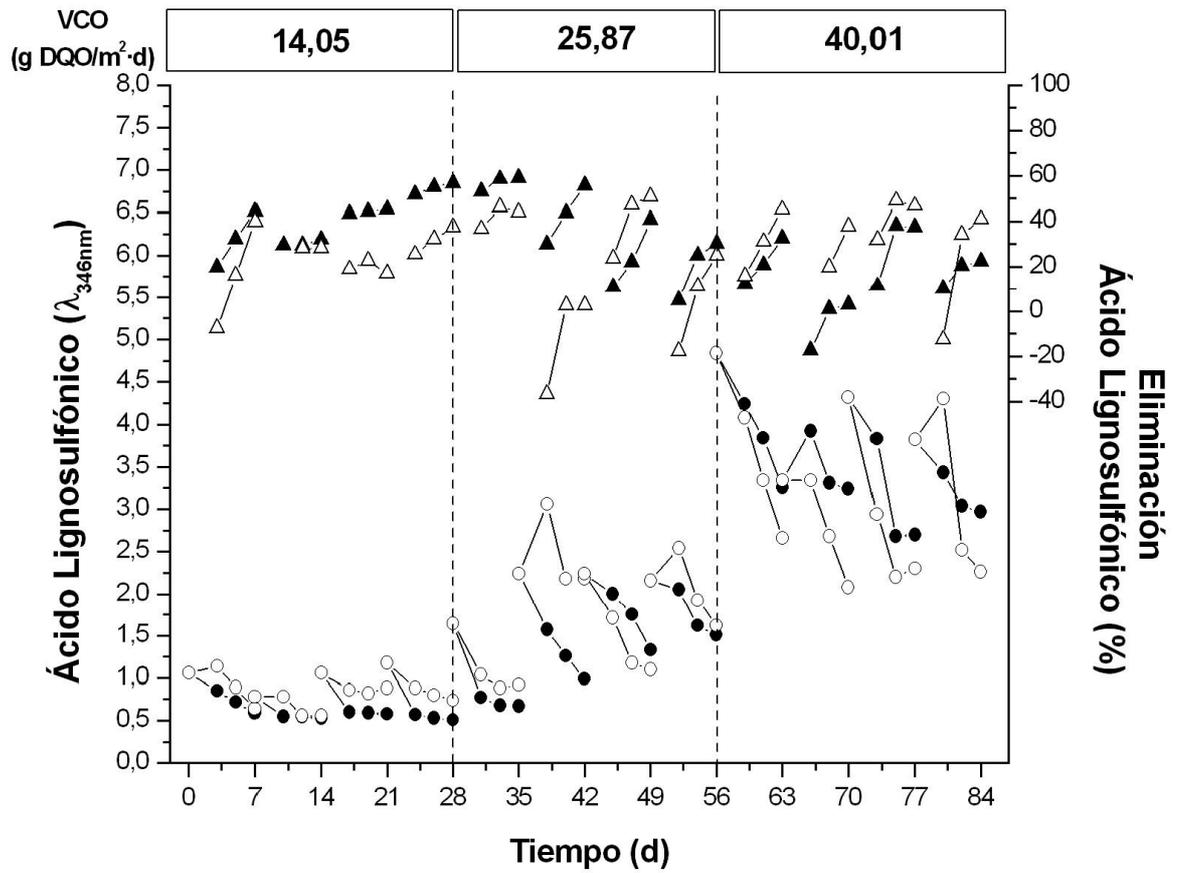


Figura 19. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de ácidos lignosulfónicos en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

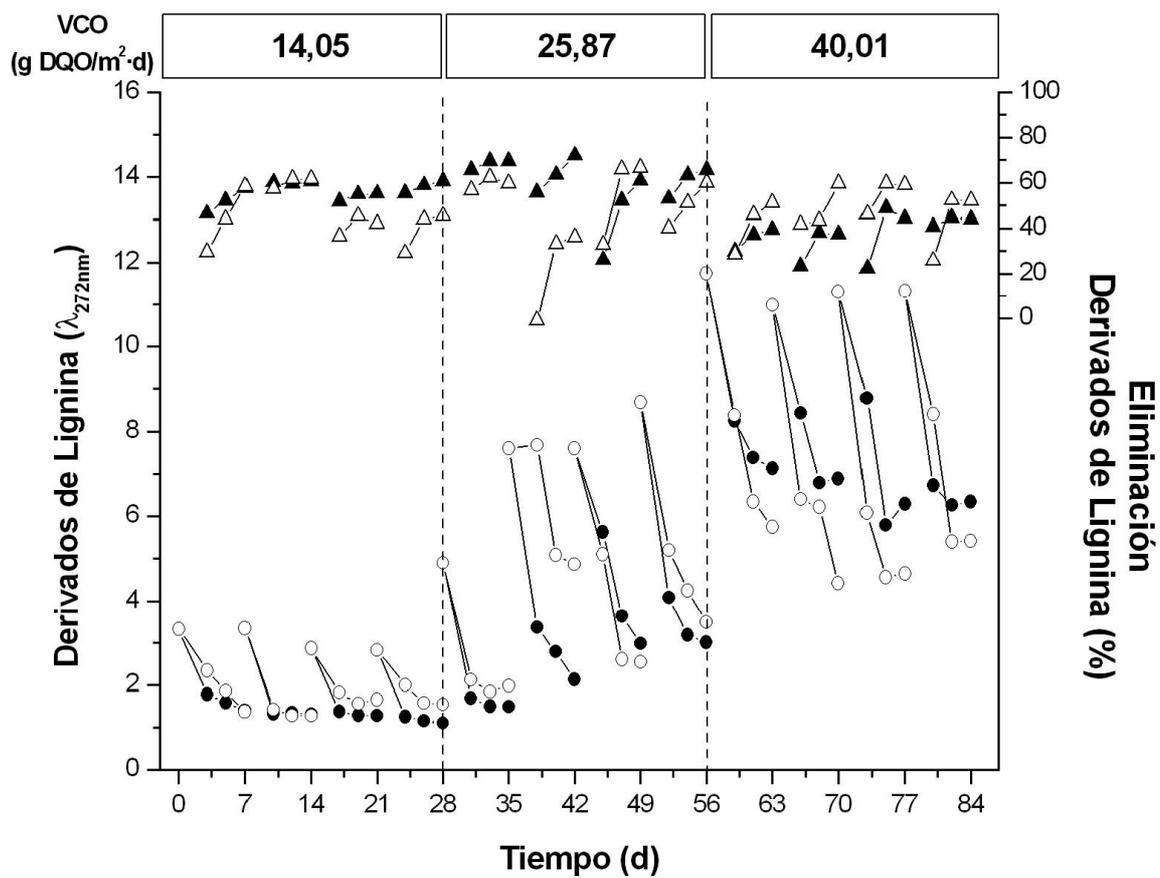


Figura 20. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (△)] de la lignina UV₂₇₂ en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

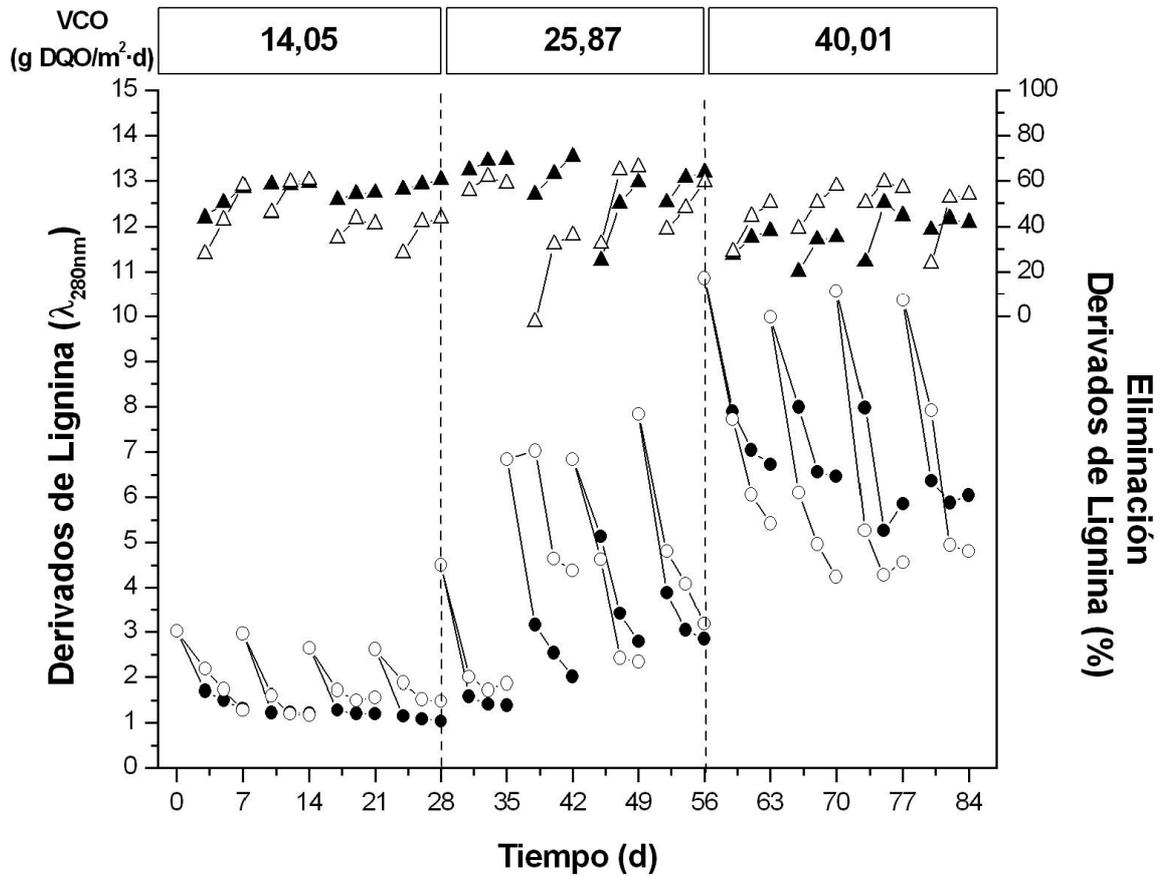


Figura 21. Concentración [con planta (●), sin planta (○)] y eficiencia de eliminación [con planta (▲), sin planta (Δ)] de la lignina UV₂₈₀ en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

Se observa en la Figura 22, la evolución del pH a las distintas VCO durante el tiempo de operación. Siendo el pH del influente ácido registrando valores entre 5,1 y 6,6. Mientras que, el efluente refleja un aumento creciente, llegando a valores máximos entre 6,8 y 7,3.

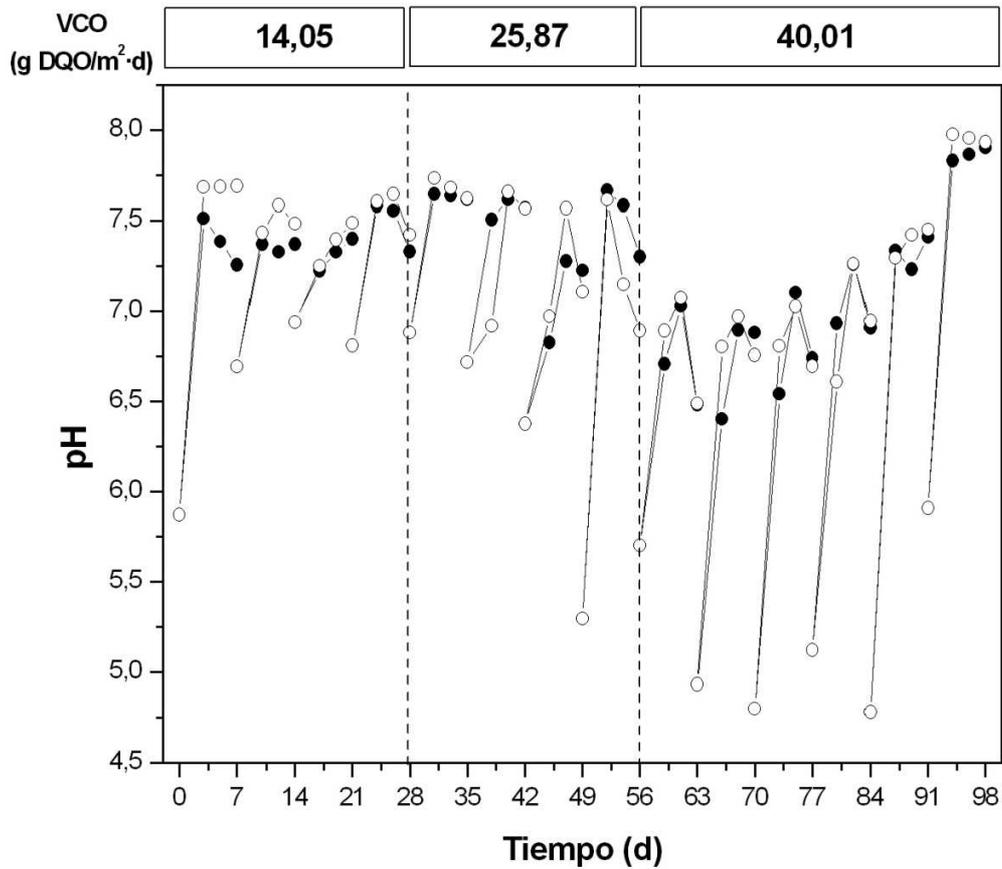


Figura 22. Evolución del pH [con planta (●), sin planta (○)] en efluente de *Eucalyptus globulus* durante el tiempo de operación

En la Figura 23, muestra la reducción de la toxicidad aguda por medio de los humedales artificiales mediante ensayos letales, expresada en mortalidad de individuos a las 48 horas de exposición. Se observa el influente de eucalipto no posee toxicidad aguda en comparación con el influente de pino. Sin embargo, se observa una reducción en la mortalidad de individuos cuando se trata el influente de Eucaliptus, mediante el sistema biológico.

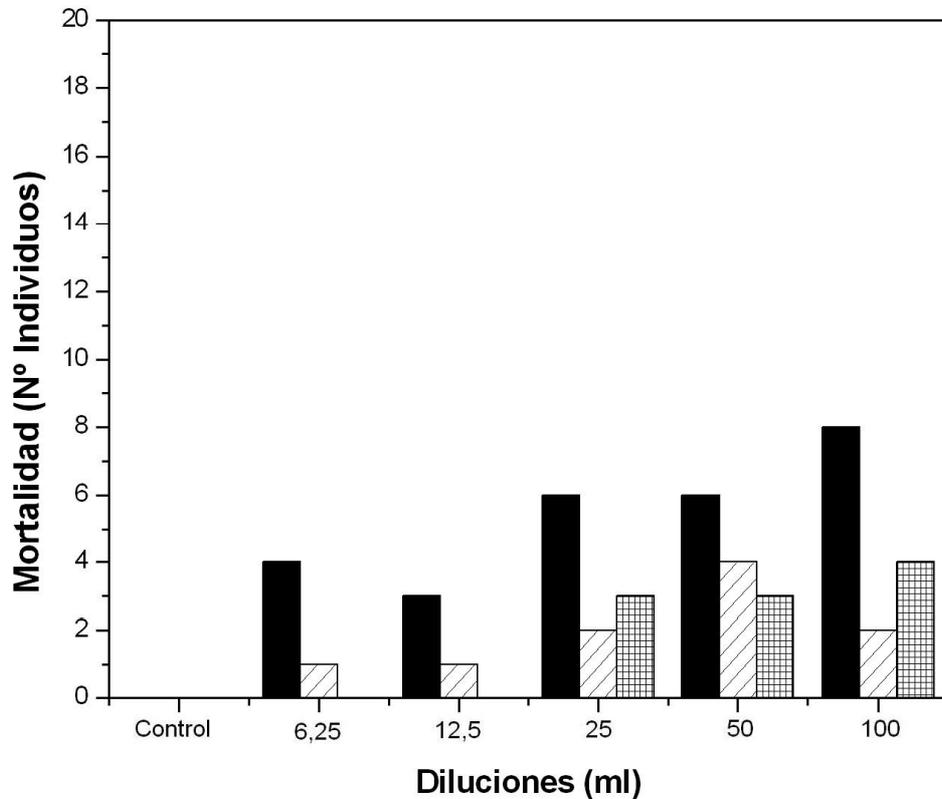


Figura 23. Bioensayo agudo mediante *Daphnia magna* a las 48 horas de exposición [influyente (■), efluente con planta (▨), efluente sin planta (▩)]

4.3 Evolución de las plantas

Se realizó la medición longitudinal de las plantas acuáticas presentes en cada mesocosmos, a través de sus diferencias en el crecimiento registrado cada semana durante el período de operación de 98 días, a distintas VCO (Figura 24). En la Figura 25, se observa en los mesocosmos alimentados con efluente de eucalipto un mayor crecimiento de las plantas, cuyo valor medio fue $20,33 \text{ cm} \pm 11,77$ y en los mesocosmos alimentados con efluente de pino, cuyo valor medio fue $10,12 \text{ cm} \pm 8,85$.

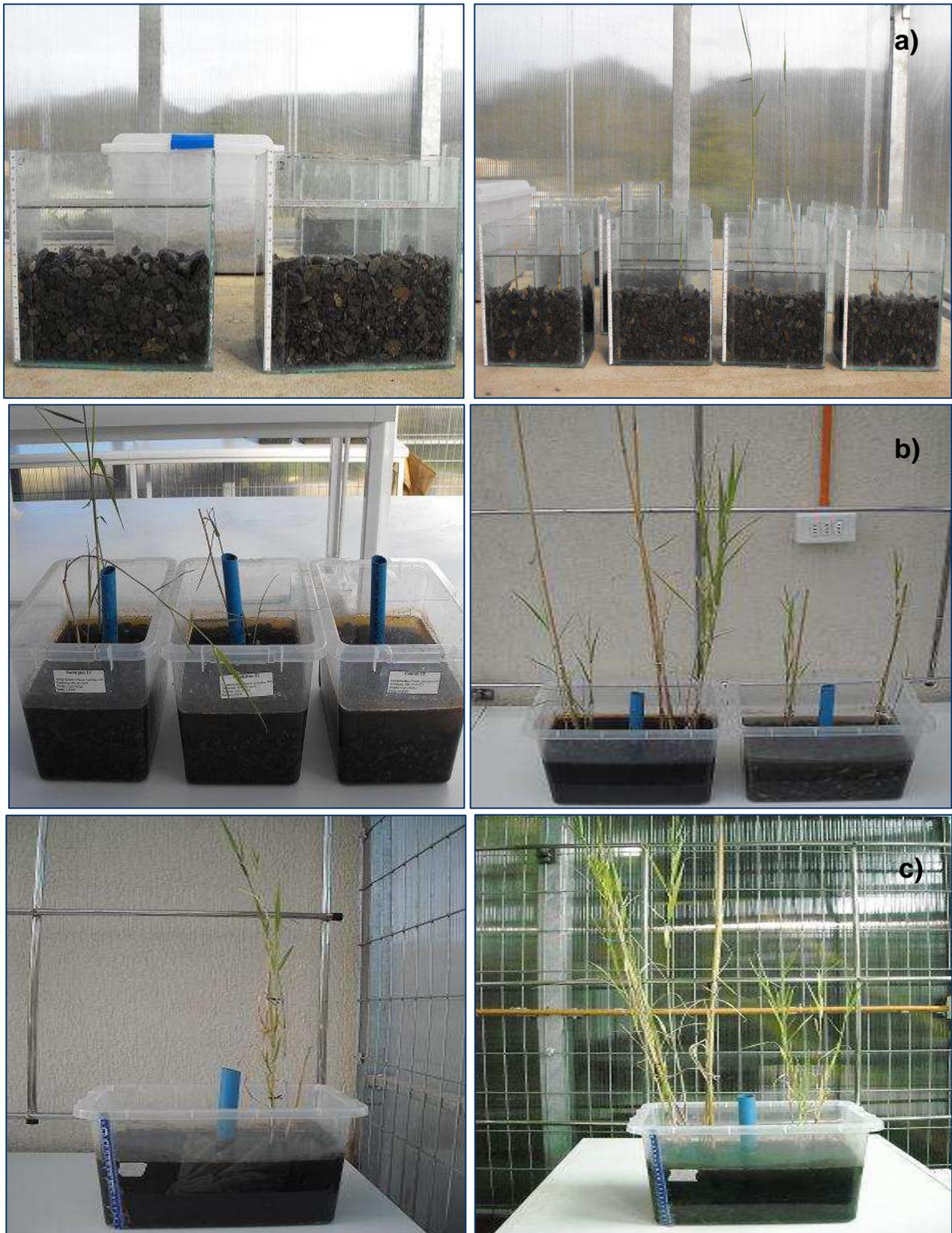


Figura 24. Evolución del humedal a través del tiempo a) 0 día, b) 56 días, c) 98 días

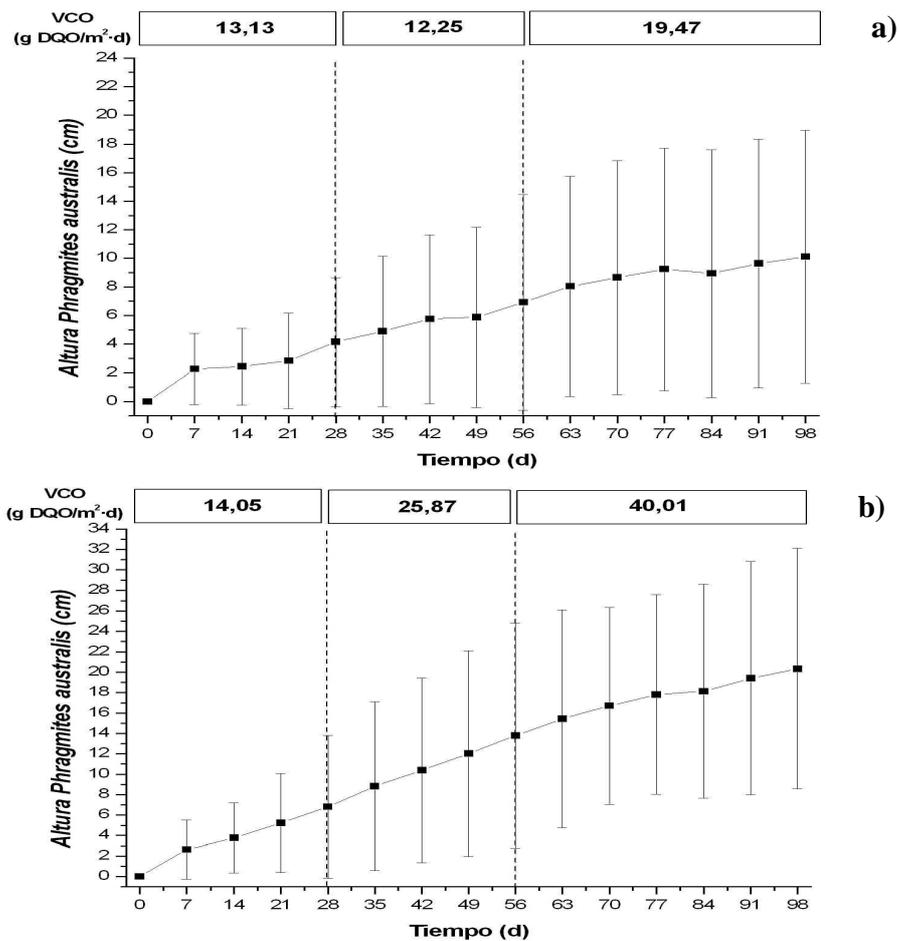


Figura 25. Altura de *Phragmites australis* durante el período de operación a) Efluente de *Pinus radiata* (n=13) b) Efluente de *Eucalyptus globulus* (n=21). La desviación Standard indica diferencias en crecimiento de las plantas en cada mesocosmo y n: número de plantas en cada mesocosmo que fueron evaluadas.

4.4 Evolución de la actividad de la biomasa

Según la Tabla 4 y 5, la concentración de la biomasa varió en un rango de 0,02 a 1 g SSV/L durante el período de operación. La actividad de la biomasa se midió a través de la técnica de respirometría (Tabla 4 y 5) que muestra la actividad de los microorganismos en función de la VCO. Se observa una disminución en la actividad heterotrófica cuyos valores van en el rango de 0,5-2,5 mgO₂/gSSV·min y 0,06-0,1 mgO₂/gSSV·min a lo largo del tiempo en ambos sistemas de tratamiento con y sin planta.

Tabla 4. Velocidad de consumo de utilización de la biomasa y velocidad de utilización específica por microorganismos en función de la VCO, en humedales artificiales con efluente de *Pinus radiata*

Tiempo (d)	Humedal artificial con planta				Humedal artificial sin planta		
	VCO (g DQO/m ² ·d)	Biomasa (g SSV/L)	VUO (mgO ₂ /L·min)	Act. Heterotrófica (mgO ₂ /gSSV·min)	Biomasa (g SSV/L)	VUO (mgO ₂ /L·min)	Act. Heterotrófica (mgO ₂ /gSSV·min)
28	13,13	0,020	0,009	0,45	0,009	0,023	2,55
56	12,25	0,145	0,018	0,124	0,104	0,016	0,154
98	19,47	0,96	0,067	0,069	0,63	0,079	0,125

Tabla 5. Velocidad de utilización de oxígeno de la biomasa y velocidad de utilización específica por microorganismos en función de la VCO, en humedales artificiales con efluente de *Eucalyptus globulus*

Tiempo (d)	Humedal artificial con planta				Humedal artificial sin planta		
	VCO	Biomasa	VUO	Act. Heterotrófica	Biomasa	VUO	Act. Heterotrófica
	(g DQO/m ² ·d)	(g SSV/L)	(mgO ₂ /L·min)	(mgO ₂ /gSSV·min)	(g SSV/L)	(mgO ₂ /L·min)	(mgO ₂ /gSSV·min)
28	14,05	0,046	0,025	0,543	0,017	0,039	2,290
56	25,87	0,13	0,016	0,123	0,145	0,048	0,331
98	40,01	0,69	0,041	0,059	1,01	0,097	0,096

5 DISCUSIÓN

5.1 Caracterización fisicoquímica de influente de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*

La caracterización fisicoquímica del influente de pino y eucalipto proveniente de la industria del aserrío evidenció una alta (0,5-1 g DQO/L y 100-200 mg DBO₅/L) cantidad de materia orgánica, presencia de compuestos fenólicos y compuestos específicos. En cuanto a los nutrientes, son bajas las concentraciones (1 mg/L de NT y 1-4 mg/L PT), y tienen un pH bajo (Tabla 1). Estos resultados se relacionan con los encontrados en efluentes derivados de residuos de la madera y aserraderos con valores altos de materia orgánica (300-2000 mg/L de DBO₅ y 1,5-10 g/L de DQO), presencia de taninos y ligninas (900-3000 mg/L), fenoles (1-30 mg/L), ácidos grasos (1-2 g/L), pobre en nutrientes (1-3 mg/L de NT y 3-4 mg/L de PT) y bajo pH del orden de 3-5 (Hedmark y Scholz, 2008).

La caracterización fisicoquímica del influente de pino y eucalipto proveniente de la industria del aserrío evidenció no ser totalmente biodegradable, como lo demuestra el índice de biodegradabilidad cuyo valor corresponde a la razón DBO₅/DQO, con valores de 0,30 y 0,26, respectivamente. El valor de la DBO₅ es indicativo de los compuestos fácilmente biodegradables, compuestos como carbohidratos y ácidos orgánicos. Los bajos niveles de DBO₅ indican poca presencia de compuestos orgánicos de bajo peso molecular. Los compuestos con alto peso molecular como la lignina no causan DBO₅ pero si una alta DQO.

Esta caracterización se debe a que estos influentes presentan compuestos extraíbles que son constituyentes naturales en la madera, pero que pueden tener impactos adversos en la naturaleza. Al comparar ambos influentes, el influente de eucalipto presenta ácidos grasos, hidrocarburos de larga cadena, compuestos aromáticos y una alta abundancia de compuestos fenólicos que causan la coloración de éste. Por otra parte, el influente de pino presenta una amplia gama de compuestos, muchos más que en el influente de eucalipto, como esteroides, terpenos, ácidos grasos, compuestos aromáticos y ácidos resínicos. La abundancia de compuestos presentes en el influente de pino, en especial de ácidos resínicos, se les atribuye la toxicidad aguda encontrada en éste, a través de las pruebas de toxicidad (Figura 15).

5.2 Comportamiento de la operación de los mesocosmos

Los resultados generales muestran que existe similitud en el comportamiento de los mesocosmos alimentados con influentes de pino y eucalipto, observando una mayor eficiencia de eliminación en los humedales artificiales sin planta, para la DQO, DBO₅, compuestos fenólicos y compuestos específicos. Según Imfeld *et al.* (2009), los procesos que ayudan a

una mayor eficiencia de eliminación en los sistemas sin plantas es la volatilización, la sorción y la sedimentación, sin embargo, no hay grandes diferencias en los porcentajes de eliminación en un sistema u otro. Baptista *et al.* (2003), muestra que los humedales artificiales sin planta presentan una alta eliminación de carbono (medida como DQO y DBO₅) que los sistemas con plantas de 63 % y 51 %, respectivamente. Además argumenta, que en los sedimentos ricos en materia orgánica, el oxígeno está disponible en los milímetros cercanos a la superficie y cerca de las raíces de las plantas, por lo que la mayoría de la mineralización de la materia orgánica se lleva a cabo anaeróbicamente.

Cuando se aplican VCO mayores al sistema, ocurre una disminución de la eficiencia de eliminación de ambos efluentes en ambos mesocosmos, con y sin plantas. Sin embargo, al comparar los mesocosmos alimentados con influente de pino, éstos presentan una mayor eficiencia de eliminación de materia orgánica (70 % de DQO y 85 % de DBO₅) y un 60 % de compuestos específicos, mientras que en los alimentados con influente de eucalipto, presentan valores de materia orgánica en un rango de 65 % de DQO, 82 % de DBO₅ y entre un 40 % y 55 % de compuestos específicos. Autores como Zhang *et al.* (2009) especifican que una alta eficiencia de eliminación para DBO₅ y DQO son causada por sedimentación de los sólidos suspendidos y por el rápido proceso de descomposición en el agua y en las capas superiores del suelo. La materia orgánica es consumida y reducida por bacterias y otros microorganismos aeróbicamente y anaeróbicamente. Reporta además, que no hay diferencias significativas en la eliminación de la materia orgánica entre humedales artificiales con y sin plantas. Las plantas juegan un rol insignificante en la eliminación de DQO. Aparentemente, a pesar del hecho que la eliminación de DBO₅ y DQO en humedales son mediadas a través de degradación biológica de la materia orgánica, parecería que en muchos casos, la descomposición anaeróbica juega un rol principal o alternativamente la aireación a lo largo del sustrato es suficiente a la demanda de oxígeno para la eliminación orgánica.

Según estudios de Hedmark y Scholz (2008) a través de este sistema de tratamiento se obtuvieron porcentajes de eliminación para DQO, DBO₅, ácidos grasos de cadena larga, taninos y lignina de aproximadamente 60 %, 50 %, 69 % y 42 %, respectivamente. Además, Masbough *et al.* (2005) en sus estudios a través de este sistema de tratamiento obtuvo los siguientes porcentajes de reducción de DQO, DBO₅, ácidos grasos de cadena larga, taninos y lignina de 50 %, 60 %, 69 % y 42 %, respectivamente. Argumentando así que una gran proporción de la DBO fue removida comparada con la DQO. Esto se explica debido a que los materiales biodegradables son fácilmente usados por las comunidades microorganismos más rápido que los materiales recalcitrantes. Por lo que los microorganismos utilizan la fuente de

carbono biodegradable, la DBO decrece más rápido. Hubo una gran eliminación de DBO dentro de los humedales y que una porción más recalcitrante de DQO pasa a través del sistema.

Las sustancias químicamente y biológicamente no son fácilmente alterada o removida y entonces ellos pasan a través del sistema. Esto demuestra que los microorganismos que se desarrollan en el sustrato (agua y sedimento) de los humedales sin plantas fueron capaces de su degradación. Aunque en algunas ocasiones fue ligeramente mayor en efluente comparado con influente debido a que contienen larga moléculas recalcitrantes que no son fácilmente biodegradables. Esta es la razón de que una fracción de la DQO permanezca en el efluente.

Comparando estos sistemas con otras tecnologías para el tratamiento de estos efluentes se obtienen porcentajes de eliminación similares del orden de 90 % para DBO₅ y 60 % para DQO a través de un tratamiento biológico en un bioreactor convencional (Liao y Duff, 2006).

Durante este estudio, los mesocosmos fueron capaces de aumentar el pH en 2 unidades. Las plantas acuáticas activas fotosintéticamente generan oxígeno y los sedimentos en contacto con la atmósfera captan oxígeno por reaireación, lo que ambos ayudan a remover el CO₂ desde el agua causando un aumento del pH de la columna de agua (Masbough *et al.*, 2005).

En el caso de los mesocosmos alimentados con influente de pino, los resultados sugieren una toxicidad de éste (figura). Esto podría deberse a las diferencias que existen en los compuestos extractivos que posee cada tipo de influente, atribuyendo la toxicidad aguda del pino (48 h) a la concentración de ácidos resínicos presentes en la muestra, y demostrado en las pruebas de toxicidad. Orban *et al.* (2002), atribuyen esto a los extractivos orgánicos derivados de las maderas como pino, los taninos, ligninas, fenoles, tropolones y ácidos resínicos son los que más contribuyen en la toxicidad de los efluentes, corroborando así estos resultados.

5.3 Evolución de las plantas

Los resultados de la Figura 24 acerca de la evolución de las plantas en el comportamiento de los humedales evidenciaron que las plantas expuestas a influente de pino, presentan un menor crecimiento longitudinal que las plantas expuestas a influente de eucalipto, debido a la toxicidad aguda detectada por las pruebas de toxicidad en el influente de pino.

A medida que se aumenta la VCO, se observa una disminución en las diferencias en el crecimiento de las plantas entre cada intervalo. Al comienzo con VCO bajas se observa un crecimiento lineal para ambos sistemas (diferencia de crecimiento de 5 cm en los sistemas con pino y 8 cm en los sistemas con eucalipto), mientras a VCO altas se refleja un estado

estacionario en el crecimiento (diferencia de crecimiento de 1 cm en los sistemas con pino y 5 cm en los sistemas con eucalipto). Esto muestra que en este caso las plantas no tendrían un rol principal en la degradación y eliminación de la materia orgánica y compuestos específicos presente en los influentes para ambos casos (Baptista *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2009). Las plantas presentes en los mesocosmos alimentados con influente de eucalipto, presentan un mayor crecimiento y desarrollo que las plantas presentes en los mesocosmos alimentados con influente de pino. Esto podría deberse al grado de toxicidad aguda que presentan los influentes de pino, que se muestran en las pruebas de toxicidad (Figura 15).

5.4 Evolución de la actividad de la biomasa

Los resultados arrojados mediante la respirometría, evidenciaron que la actividad heterotrófica de los microorganismos disminuye de 0,5 a 0,06 mgO₂/gSSV·min en sistemas con plantas y de 2,5 a 0,1 mgO₂/gSSV·min en sistemas sin plantas, al aumentar VCO en mesocosmos alimentados con pino y eucalipto.

Según estudios de Chamorro (2005), la actividad heterotrófica de los microorganismos aumenta de 1,72 a 32 mgO₂/gSSV·min, con las distintas VCO en un sistema de laguna aireada. Además, Baptista *et al.* (2003) argumenta que la degradación microbiana es uno de los mecanismos más importantes en la eliminación de contaminantes desde el agua y que la mineralización de la materia orgánica es llevada a cabo por procesos anaeróbicos.

Al comparar una tecnología de degradación aeróbica como lo es una laguna aireada con los sistemas de humedales artificiales, se observa que la cantidad de biomasa en el sistema aumenta, pero al aumentar las VCO disminuye la actividad heterotrófica (Tabla 4 y 5), lo que indica que la biomasa desarrollada en los humedales con y sin plantas alimentados con pino y eucalipto no refleja que sea aeróbica, sino que más bien se trataría de una degradación de tipo anaeróbica.

6 CONCLUSIONES

- Los influentes de pino y eucalipto proveniente de la industria del aserrío evidenciaron una alta cantidad de materia orgánica, presencia de compuestos fenólicos y compuestos específicos, un pH bajo y pobre en nutrientes.
- Los mesocosmos alimentados con influentes de pino y eucalipto presentan comportamientos similares. Sin embargo, los sistemas sin plantas presentaron mayor eficiencia de eliminación de compuestos específicos y parámetros globales.
- Los humedales artificiales indistintamente, con o sin plantas, actúan como estabilizador del pH. Entregando efluentes más estables para el medio ambiente a pH neutros.
- Respecto a la toxicidad de los influentes, se pudo demostrar que los humedales artificiales fueron capaces de reducir la toxicidad aguda registrada en el influente de pino atribuible a la concentración de ácidos resínicos presentes en la muestra.
- Las plantas no tendrían un rol principal en la degradación y eliminación de la materia orgánica y compuestos específicos presente en los influentes para ambos casos, relegando los beneficios de las plantas a un valor ornamental, estético y de aislamiento térmico.
- Respecto al desarrollo de la biomasa, se pudo constatar que los consorcios bacterianos aeróbicos evaluados en los humedales con y sin plantas alimentados con pino y eucalipto, decrecen en el tiempo.
- De acuerdo a todo lo antes indicado, se aprueba la hipótesis de trabajo y se puede indicar que los humedales artificiales son una alternativa viable para eliminar compuestos contenidos en los efluentes de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* provenientes de la industria del aserrío mediante el uso de humedales artificiales.

7 REFERENCIAS

APHA-AWWA-WPCF (1985) Standard methods for examination of water and wastewater, 16th ed, Washington.

Arimoro, F. Ikomi, R. and Osalor, E. (2007). The impact of sawmill wood wastes on the water quality and fish communities of Benin river, Niger Delta area, Nigeria. *International Journal of Science and Technology* 1: 1-12.

Baptista, J. Donnelly, T. Rayne, D. and Davenport, R. (2003) Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. *Water Science and Technology* 48 (5): 127-134.

Belmonte, M. Xavier, C. Decap, J. Martinez, M. Sierra-Alvarez, R. and Vidal, G. (2006a). Improved aerobic biodegradation of abietic acid in ECF bleached kraft mill effluent due to biomass adaptation. *Journal of Hazardous Materials* 135: 256-263.

Belmonte, M. Decap, J. Martinez, M. and Vidal, G. (2006b). Effect of Aerobic Sludge with Increasing Level of Adaptation on Abietic Acid Biodegradation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 77: 861-867.

Belmonte, M. Xavier, C. Decap, J. and Vidal, G. (2008). Tratamiento de ácidos resínicos presentes en efluentes de la industria de celulosa kraft mediante laguna aireada. *Ingeniería Química* 33: 14-21.

Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. *Water Science and Technology* 35: 11-17.

Çeçen, F. (2003). The use of uv-vis measurements in the determination of biological treatability of pulp bleaching effluents. *7th International Water Association Symposium on Forest Industry Wastewaters*. Seattle (USA), 1-4: 135-142.

Chamorro, S. (2005) Eliminación de fitoesteroles a través de una laguna aireada y evaluación toxicológica mediante *Daphnia magna*. Tesis para optar al título de Biólogo, Universidad de Concepción, Chile, 67p.

Corporación Chilena de la Madera (CORMA) 2008. Recurso Forestal/Industria Forestal. http://www.corma.cl/portal/menu/recurso_forestal/industria_forestal.

Dahab, M. and Surampalli, R. (2001). Subsurface-flow constructed wetlands treatment in the plains: Five years of experience. *Water Science and Technology* 44: 375-380.

- De Boever, P., Demaré, W., Vanderperren, E., Cooreman, K., Bossier, P. and Verstraete, W. (2001). Optimization of a yeast estrogen screen and its applicability to study the release of estrogenic isoflavones from a soygerm powder. *Environmental Health Perspectives* 109: 691-697.
- De la Maza, C. González, J. and Alexandroff, M. (1998). Indicadores de contaminación generados por la industria forestal en Chile. *Revista Ciencias Forestales, Universidad de Chile* 13: 64-75.
- EPA. 1993. Systematics, ecology, life history and culture methods *Daphnia* (*D. pulex* and *Ceriodaphnia*). 131-147.
- Fernández, B. García, M. Cadahía, E. Arrabal, C. and Cortijo, M. (2001). Analysis of lipophilic compounds in needles of *Pinus pinea* L. *Sciences* 58: 449-454.
- Fernández, J. 2006. La fitodepuración mediante humedales artificiales. <http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp>.
- Gutiérrez, A. Del Río, J.C. González-Vila, F.J. and Martín, F. (1999). Chemical composition of lipophilic extractives from *Eucalyptus globulus* Labill. Wood. *Holzforschung* 53: 481-486.
- Hedmark, A. and Scholz, M. (2008). Review of environmental effects and treatment of runoff from storage and handling of wood. *Bioresource Technology* 99: 5997-6009.
- Huebert, D. 2000. Water Plants 101 - An Introduction to the Physiology and Ecology of Aquatic Plants. Botánica, Universidad de Manitoba. <http://www.geocities.com/aquamundo2000/pl101.html>.
- Imfeld, G. Braeckevelt, M. Kuschik, P. and Richnow, H. (2009) Monitoring and assessing processes of organic chemicals removal in constructed wetlands. *Chemosphere* 74: 349-362.
- Instituto Forestal (INFOR). 2006. Disponibilidad de residuos madereros provenientes de la industria de la madera entre la IV y XII región para uso energético. <http://www.infor.cl/>.
- Instituto Forestal (INFOR). 2007. http://www.infor.cl/estadisticas_mercado/sistema_exportaciones/doc/exportaciones_marzo_2007.pdf.
- Jordan, M. Wilken, A. Gerth, A. and Muñoz, O. (2008). Effect of cellulose wastes upon the growth of *Phragmites australis*. *International Journal of Phytoremediation* 10: 197-209.

- Kukkonen, J. Punta, E. Koponen, P. Paranko, J. Leppänen, H. Holopainen, I. and Hyvärinen, H. (1999). Biomarker responses by crucian carp (*Carassius carassius*) living in a pond of secondary treated pulp mill effluent. *Water Science and Technology* 40: 123-130.
- Larrain, A. (1995). Criterios ecotoxicológicos para evaluar alteraciones ambientales y establecer parámetros de control: importancia de los bioensayos de toxicidad. *Ciencia y Tecnología Marina. CONAMA* (Nº Especial), 39-47.
- Liao, C. Finnbogason, and T. Duff, S. (2008) Treatment of Log Yard Run Off with a Continuous Fixed Film Bioreactor. *Journal of Environmental Engineering and Science* 7 (4): 327-333.
- Lopez, D. (2008). Detección de actividad estrógenica en compuestos presentes en efluentes de celulosa kraft usando *Daphnia magna* como bioindicador. Tesis para optar al título de Biólogo Marino, Universidad de Concepción, Chile, 61p.
- Masbough, A. Frankowski, K. Hall, K. and Duff, S. (2005). The effectiveness of constructed wetland for treatment of woodwaste leachate. *Ecological Engineering* 25: 552-566.
- Orban, J. Kozak, R. Sidle, R. and Duff, S. (2002) Assessment of relative environmental risk from logyard run-off in British Columbia. *The Forestry Chronicle* 78 (1): 146-151.
- Prabu, P.C. and Udayasoorian, C. (2007). Treatment of pulp and paper mill effluent using constructed wetland. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry* 6: 1689-1701.
- Rodríguez, R. and Dellarossa, V. (1998). Plantas vasculares acuáticas en la región del Bío Bío. *Ediciones Universidad de Concepción*. Concepción, 40p.
- Silva, J. P. (2002). Humedales construidos. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Universidad de Valle, Colombia. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/humedales.pdf>.
- Valdés, I. Curt, M. y Fernández, J. (2005). Tolerancia de *Phragmites australis* (Cav.) Trin. y *Typha domingensis* (Pers.) Steudel a la contaminación del agua por efluentes municipales en Noblejas (Toledo). *International Meeting on Phytodepuration*, Murcia, España. 7p.
- Vera, A. Núñez, M. Andrade, C. and Morales, E. (2007). Estudio de la relación entre el crecimiento de la macrófita *Typha domingensis* y la remoción de nitrógeno, fósforo y

materia orgánica en un humedal construido. *Revista Facultad Agronomía Universidad del Zulia* 1: 300-304.

Walthall, W. and Stark, J. (1997). A comparison of acute mortality and population growth rate as endpoints of toxicological effect. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 37: 45-52.

Zhang, D. Gersberg, R. and Keat, T. (2009) Constructed wetlands in China. *Ecological Engineering* 35: 1367-1378.