

HUMEDALES CONSTRUIDOS CON PLANTAS ORNAMENTALES PARA EL TRATAMIENTO DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES CONTENIDOS EN AGUAS SERVIDAS*

CONSTRUCTED WETLANDS WITH ORNAMENTAL PLANTS FOR REMOVAL OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS CONTAINED IN SEWAGE

GABRIELA MORALES, DANIELA LÓPEZ, ISMAEL VERA Y GLADYS VIDAL

Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental, Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción, Chile
 Autor correspondencia: Dra. Gladys Vidal, Fax 41-2207076, Teléfono 41-2204067, glvidal@udeccl

RESUMEN

Los humedales construidos es una tecnología viable para tratar aguas servidas en el sector rural debido a su bajo costo de operación y simplicidad en el manejo tecnológico. Además es importante destacar que la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y nutrientes es de hasta 95% y 60%, respectivamente. Sin embargo, la mayoría de investigaciones se han centrado en la funcionalidad de plantas comunes tales como, *Phragmites* spp., *Typha* spp., *Schoenoplectus* spp. Pese al amplio uso de estas especies, es importante evaluar la utilización de especies ornamentales tales como, *Zantedeschia aethiopica*, *Canna* spp. e *Iris* spp. para aumentar a esta tecnología los beneficios ambientales y paisajísticos.

Debido a lo antes indicado, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica que muestre la factibilidad de usar humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con especies ornamentales para la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en las aguas servidas.

Preliminarmente es posible indicar que las plantas ornamentales han mostrado una eficiencia de eliminación de materia orgánica medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO_5) variando entre 70 y 93%, mientras que en el caso de los nutrientes, la eliminación de Nitrógeno Total (NT) varía entre 45 y 73% y de Fósforo Total (PT) entre 40 y 80%. Debido a estos valores de eliminación, es posible concluir que los humedales construidos con plantas ornamentales pueden realizar un tratamiento de las aguas servidas en condiciones similares a las presentadas por plantas comunes. Sin embargo, las plantas ornamentales entregan un valor estético al entorno, junto a un posible beneficio económico para la población usuaria del sistema.

Palabras clave: Aguas servidas, humedales construidos, materia orgánica, nutrientes, plantas ornamentales.

ABSTRACT

Constructed wetlands are a viable sewage treatment in rural areas because of its low cost of operation and simplicity in management technology. Moreover it is noteworthy that the efficiency of removal of organic matter and nutrients is up to 95% and 60%, respectively. However, most research has focused on the functionality of common plants such as *Phragmites* spp., *Typha* spp., *Schoenoplectus* spp. Despite the widespread use of these species, it is important to evaluate the use of ornamental species such as, *Zantedeschia aethiopica*, *Canna* spp. and *Iris* spp., because this technology to enhance the environmental and landscape benefits.

*AGRADECIMIENTOS: Este trabajo fue parcialmente financiado por el Proyecto INNOVA BIOBIO 13.3327-IN.IIP, CONICYT/FONDAP/15130015 y Red Doctoral REDOC.CTA, MINEDUC Proyecto UCO1202 de la Universidad de Concepción.

Due to this, the aim of this paper is to make a review that shows the feasibility of using subsurface flow constructed wetlands planted with ornamental species for the removal of organic matter and nutrients in sewage.

Preliminarily, it is possible to indicate that the ornamental plants have shown an efficiency of removal of organic matter measured as Biochemical Oxygen Demand after 5 days (BOD_5) varying between 70 and 93%, while in the case of nutrients, removal of Total Nitrogen (NT) varies between 45 and 73%, and Total Phosphorus (TP) between 40 and 80 %. Because of these, it can be concluded that the constructed wetlands with ornamental plants can treat a sewage in similar to those presented by common plant conditions. Moreover, ornamental plants delivered an aesthetic value to the environment, with potential economic benefit to the users of the system.

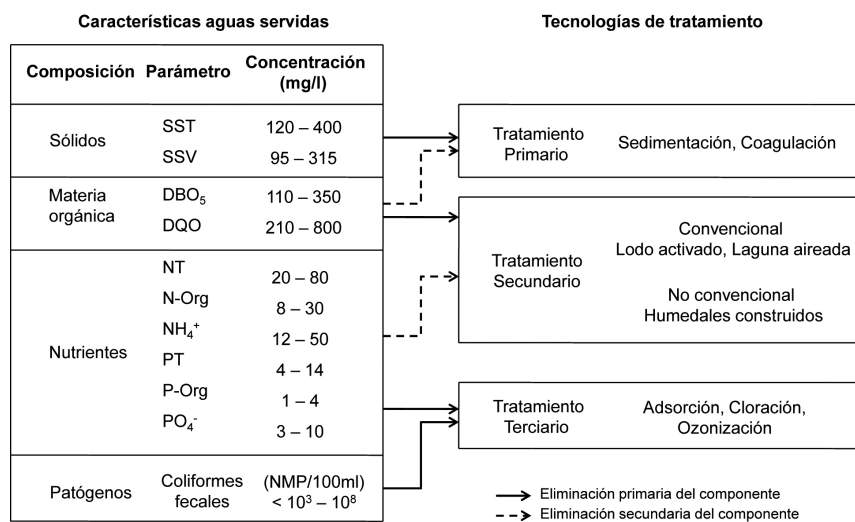
Keywords: Constructed wetlands, sewage, nutrients, organic matter, ornamental plants.

Recibido: 15.04.13. Revisado: 10.05.13. Aceptado: 05.07.13.

INTRODUCCIÓN

Las aguas servidas generadas por las comunidades contienen diversos compuestos entre los que se destacan la materia orgánica y los nutrientes. La descarga de estos compuestos contenidos en el agua servida genera efectos negativos en los ecosistemas acuáticos receptores (Habit *et al.*, 2005; Vera *et al.*, 2011; Vera *et al.*, 2013). Debido a lo anterior, la implementación de un sistema de tratamiento para su eliminación es necesaria. Al respec-

to, la Figura 1 muestra una relación entre las características de las aguas servidas y las tecnologías empleadas en las distintas etapas aplicadas al tratamiento. En Chile, para el tratamiento secundario de aguas servidas en zonas urbanas, se han utilizado tecnologías convencionales como los lodos activados (61%) y las lagunas aireadas (23%) (Barañaño y Tapia, 2004). Sin embargo, no existe una definición de tecnología para áreas de baja densidad poblacional o de población dispersa, como son las zonas rurales.



Donde: SST: Sólidos suspendidos totales, SSV: Sólidos suspendidos volátiles, DBO_5 : Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, DQO: Demanda Química de Oxígeno, NT: Nitrógeno total, N-Org: Nitrógeno orgánico, NH_4^+ : Amonio, PT: Fósforo total, P-Org: Fósforo orgánico, PO_4^- : Fosfato, NMP: Número más Probable.

Figura 1. Características y tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas servidas.

Al respecto, internacionalmente se ha recomendado el uso de tecnologías no convencionales o naturales como los humedales construidos. Esta es una tecnología de tratamiento de aguas residuales (entre las que se incluyen las aguas servidas) que consiste en lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con especies vegetales típicas de zonas húmedas (García y Corzo, 2008). En ellos, el tratamiento de las aguas servidas es el resultado de una serie de fenómenos fisicoquímicos y biológicos (Kadlec y Wallace, 2009; Vera *et al.*, 2011). Actualmente, la aplicación de estos sistemas se encuentra en crecimiento en todo el mundo debido a sus bajos costos de inversión (0,0035 M\$/hab), consumo energético mínimo (0,1 Kw-h/m³), simplicidad de operación, ya que requieren un poco tiempo de trabajo de operario (0,6 h/d), baja generación de lodos y la provisión de hábitat para la vida silvestre (García *et al.*, 2001; García *et al.*, 2004; Rojas, 2012; Tanner, 2006; Vymazal y Kröpfelová, 2008). Sin embargo, pueden necesitar hasta 10 veces más superficie (0,5-20 m²/hab) que un sistema de lodos activados (0,2-0,3 m²/hab). Por esta razón, su aplicación principal es para las zonas rurales (de baja densidad

poblacional), puesto que se tiene la disponibilidad de terreno a un precio asequible (García, 2004).

Estos sistemas se pueden clasificar de acuerdo a diversos criterios. La Figura 2 muestra una clasificación de humedales construidos para el tratamiento de aguas servidas basada en la circulación y dirección del flujo de agua. Además, la Figura 2 muestra los tipos de macrófitas (plantas) empleadas por cada tipo de humedal. De forma general se puede hablar de humedal sin medios de soporte (Humedales Superficiales, HS) y humedales con medios de soporte. Estos últimos se dividen en humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSS) y de flujo subsuperficial vertical (VSS). Los humedales con medios de soporte (HSS y HV) ofrecen dos ventajas respecto a los humedales sin medios (HS): a) evitar la exposición de agentes contaminantes durante el tratamiento, y b) funcionar bien en temperaturas ambientales de congelamiento (<4°C). En el caso de la vegetación, esta puede ser flotante, sumergida y emergente, y su aplicación cómo lo muestra la Figura 2, depende de la circulación del agua (Kadlec y Wallace, 2009).

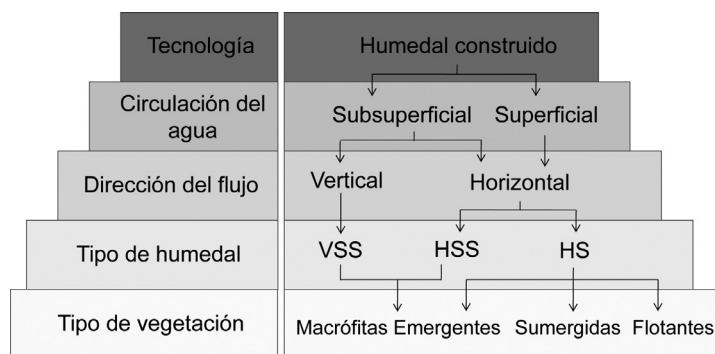


Figura 2. Clasificación de humedales construidos para el tratamiento de aguas servidas. Donde: HS: Humedal superficial, HSS: Humedal de flujo subsuperficial horizontal, VSS: Humedal de flujo subsuperficial vertical.

Tabla I. Características de tecnologías convencionales y no convencionales utilizadas en el tratamiento de aguas servidas.

Tecnología	Características de la Tecnología y parámetros de operación					Eficiencias de eliminación y concentraciones efluentes					Ref.	
	Área unitaria	Potencia instalada	TRH	Carga orgánica	DBO ₅	NT	PT	DBO ₅	NT	PT		
	(m ² /hab)	(W/hab)	(d)	(gDBO ₅ /m ² d)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		mg/l
L	0,2 – 0,3	0,13 – 2,8	0,1 – 0,6	0,25 – 0,7*	85 - 95	10 - 30	30 - 40	15 - 35	30 - 45	4 - 10	[3,6]	
LA	0,2 – 0,5	1,0 – 1,7	3 – 9	2,2 – 3,5	75 - 90	9 - 21	30 - 50	5 - 24	20 - 60	[3,5]		
HS	5 – 20	-	5 – 15	1 – 12	54 - 88	5 - 50	30 - 60	10 - 40	10 - 50	0,5 - 11	[1,2,6]	
VSS	0,8 – 5,5	-	1 – 2	10 – 25	30 - 95	5 - 100	35 - 55	35 - 75	10 - 60	4 - 12	[1,2,6]	
HSS	3 – 10	7800	2 – 10	3 – 15	75 - 95	6 - 60	30 - 60	10 - 80	10 - 60	2 - 12	[1,2,4,6]	

Referencias: [1] Brix *et al.* (2007), [2] Crites *et al.* (2006), [3] Metcalf y Eddy (2003), [4] Rojas (2012), [5] Von Sperling (2007), [6] Vymazal (2005). *(kgDBO₅/m³d). TRH: Tiempo de retención hidráulica, DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, NT: Nitrogeno total, PT: Fósforo total, L: Lodo activado convencional, LA: Laguna facultativa aireada, HS: Humedal superficial, HSS: Humedal de flujo subsuperficial horizontal, VSS: Humedal de flujo subsuperficial Vertical.

De otro lado, la Tabla I muestra el comportamiento comparativo de los diferentes tipos de humedales construidos (Figura 2), respecto a tecnologías convencionales de tratamiento (lodos activados y lagunas aireadas), en cuanto a algunas características de energía, carga orgánica y eficiencias de eliminación de materia orgánica (DBO_5) y nutrientes (NT y PT). De esta forma, los humedales construidos presentan eliminación de DBO_5 , NT y PT, que puede variar entre 30 y 95%, 30 y 60%, y entre 10 y 60%, respectivamente. Estos valores son comparativamente similares a los valores alcanzados por las tecnologías convencionales (lodos activos y laguna aireada) (Tabla I). Debido a esto, los humedales construidos se convierten en una alternativa eficaz en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en el agua servida.

Uno de los valores que diferencian a un humedal construido respecto a una tecnología convencional, es el valor estético dado por las plantas. Las plantas utilizadas comúnmente en humedales construidos, corresponde a especies típicas de humedales naturales, como espadaña (*Typha spp.*), caña (*Phragmites spp.*) y junco (*Schoenoplectus spp.*) (Belmont *et al.*, 2004). Sin embargo, estudios recientes han evaluado la posibilidad de sustituir estas especies por macrófitas ornamentales con un valor comercial de sus flores, como son *Zantedeschia aethiopica*, *Canna spp.* e *Iris spp.* (Zurita *et al.*, 2011).

Por lo expuesto, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión bibliográfica que muestre la factibilidad de usar humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con especies ornamentales para la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en las aguas servidas.

HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Los humedales de flujo subsuperficial son sistemas en los que el agua circula de manera subterránea, a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La Figura 3 muestra un cortel longitudinal de los tipos de humedales construidos de flujo subsuperficial. Como medio granular suele usarse desde arena gruesa ($D_{10}=2$ mm) hasta grava gruesa ($D_{10}=128$ mm) (Crites *et al.*, 2006). Adherida al medio de soporte y a las raíces y rizomas de las plantas se forma una biopelícula, que tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación (Stottmeister *et al.*, 2003).

En los VSS, la circulación del agua es de tipo vertical y su aplicación se realiza en pulsos, de manera que no están permanentemente inundados. La profundidad del medio granular varía entre 0,5 y 0,8 m. Operan con cargas superiores a los HSS (entre 10 y 25 $\text{gDBO}_5/\text{m}^2 \text{ d}$, Tabla I), pero son más susceptibles a la colmatación (García, 2004). Estos sistemas presentan tasas de transferencias de oxígeno entre 10 y 24 $\text{mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, las que son superiores a las de los sistemas HSS (2,1 – 5,7 $\text{mg O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$), produciendo efluentes más oxigenados (Crites *et al.*, 2006).

En los HSS, el agua circula horizontalmente a través del medio granular y las raíces de las plantas. La profundidad puede variar entre 0,3 y 1,0 m (Crites *et al.*, 2006). Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados, con una lámina de agua que se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie. Soportan cargas orgánicas que varían entre 3 y 15 $\text{gDBO}_5/\text{m}^2 \text{ d}$ (Tabla I), siendo comúnmente recomendadas cargas de alrededor de 6 $\text{gDBO}_5/\text{m}^2 \text{ d}$ (García y Corzo, 2008).

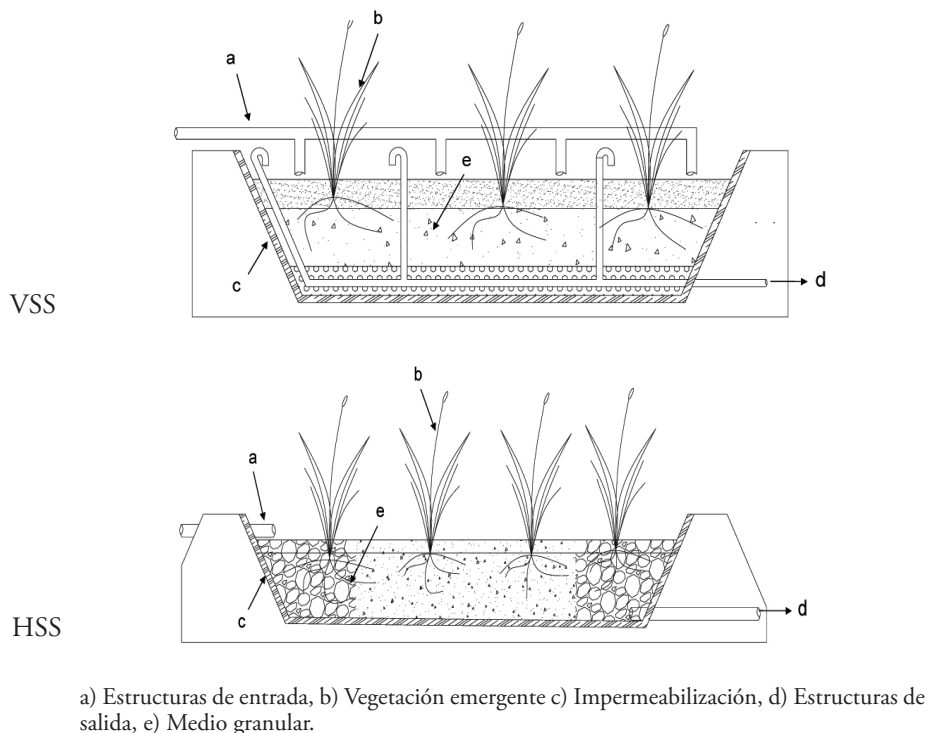


Figura 3. Corte de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical (VSS) y horizontal (HSS).
 a) Estructuras de entrada, b) Vegetación emergente c) Impermeabilización, d) Estructuras de salida, e) Medio granular.

ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES EN HUMEDALES CONSTRUIDOS

En los humedales construidos, la descontaminación se lleva a cabo mediante procesos físicos, químicos y biológicos que incluyen, sedimentación, adsorción, asimilación por las plantas y transformaciones microbianas (Stottmeister *et al.*, 2003).

En relación a la materia orgánica, ésta puede estar dividida en particulada y disuelta. La eliminación de la materia orgánica particulada, se produce por filtración, cerca de la entrada de los HSS y cerca de la

superficie en los VSS (Cooper *et al.*, 1996). En tanto que, la materia orgánica disuelta, es degradada por vías aeróbicas y anaeróbicas. La degradación aeróbica es llevada a cabo por bacterias heterótrofas aeróbicas y se produce cerca de las raíces de las plantas, debido a la disponibilidad de oxígeno allí existente (Aguirre, 2004). Por otro lado, de manera anaeróbica, bacterias fermentativas facultativas crecen originando substratos, que son degradados por microorganismos sulfatoreductores y metanogénicos (García y Corzo, 2008). Los valores de concentración efluente que se obtienen con humedales de tipo subsuperficial se resumen en la Tabla I.

Los mecanismos de eliminación, en el caso del nitrógeno, dependen de la forma en que éste se encuentre en el humedal, pudiendo presentarse como nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal (NH_4^+) o nitrógeno oxidado (NO_2^- y NO_3^-) (Aguirre, 2004). La mayor parte del nitrógeno, entre 60 y 90%, es eliminado por vía microbiana a través de la nitrificación-denitrificación (Plaza de los Reyes *et al.*, 2011). No obstante, también se incluyen procesos como, la volatilización de amonio, la adsorción de amonio, los procesos de Anammox (sigla del inglés “Anaerobic ammonium oxidation”) y la mineralización de nitrógeno orgánico (Vymazal, 2007). En cuanto a la asimilación por las plantas, esta varía entre 10 y 15%, cuando se tratan aguas servidas de concentración normal (Figura 1) (García *et al.*, 2004). La concentración de NT en el efluente tratado, generalmente es mayor a 10 mg/l, lo que corresponde a una eliminación de entre 40 y 60% (Tabla I) (Vymazal, 2007; Vera *et al.*, 2011).

En la eliminación del fósforo, los mecanismos bióticos incluyen la asimilación por las plantas y microorganismos. Los abióticos abarcan, la adsorción por el medio granular, precipitación, filtración y sedimentación (Vymazal, 2007; Kadlec y Wallace, 2009). El potencial de eliminación es limitado y está asociado a las propiedades fisicoquímicas e hidrológicas del medio de soporte, ya que el fósforo, es eliminado en hasta un 90% por adsorción (Brix *et al.*, 2001). La incorporación al tejido vegetal, representa entre 5 y 10% de la eliminación de PT (Vymazal, 2007; Wallace y Knight, 2006). En general, la eliminación del fósforo resulta compleja, debido a la escasa movilidad que presentan los compuestos que lo contienen. Así, no suele ser más de 60%, siendo común un valor inferior a 20% y

con una concentración efluente de 2 a 12 mg/l (Tabla I).

PLANTAS UTILIZADAS EN HUMEDALES CONSTRUIDOS

Las plantas son un componente esencial en el diseño y operación de un humedal construido (Konnerup *et al.*, 2009). Entre la diversidad de funciones que proveen, se cuentan: a) promover el asentamiento y la retención de sólidos en suspensión (Aguirre, 2004), b) proporcionar superficie para el desarrollo de biopelículas microbianas (Bécares, 2004), y c) transportar oxígeno a su zona radicular (Vymazal, 2011). Adicionalmente, generan una vinculación con la vida silvestre al proveer hábitats, y mejoran estéticamente los lugares donde se implantan (Tanner *et al.*, 2006). Para su utilización en humedales construidos, las plantas deben tener ciertas características, como son: a) ser tolerantes a altas cargas orgánicas (entre 3 y 25 gDBO₅/m²d), b) tener abundantes raíces y rizomas, y c) poseer biomasa aérea alta para asimilar nutrientes (Vymazal, 2011).

Una de las plantas más utilizada es *Phragmites australis* (Caña) (García y Corzo, 2008). Esta planta presenta distribución cosmopolita y rápidas tasas de propagación (hasta 10 m/año). Sus tallos alcanzan alturas de casi 5 m en etapa madura y desarrolla abundantes rizomas y raíces, penetrando hasta 1 m de profundidad. Debido al desarrollo del sistema radicular, se ha observado que esta especie presenta una elevada transferencia de oxígeno variando entre 0,02 y 12 g/m²d (Borin, 2003; Kadlec y Wallace, 2009; Vymazal, 2011; Wallace y Knight, 2006).

Asimismo, son empleadas, especies de los géneros *Typha* (Espadaña) y *Schoenoplectus* (Junco). Estas pueden crecer hasta profundidades de 0,6 m. Sus tallos alcanzan alturas de 3 m en etapa madura. Se propagan mediante rizomas con una tasa de 0,3 m/año, siendo capaces de desarrollarse a temperaturas entre 10 y 30°C (Borin, 2003; Wallace y Knight, 2006; USDA, 2012).

PLANTAS ORNAMENTALES UTILIZADAS EN HUMEDALES CONSTRUIDOS

Además de las plantas antes mencionadas, en la actualidad, se ha recomendado la utilización de especies ornamentales para humedales construidos. Esto se debe a que las plantas ornamentales pueden mejorar la infraestructura del sistema de tratamiento, dándole mayor realce estético, y posiblemente otorgar beneficios económicos a la comunidad a través de la producción de flores de corte para su comercialización. Este beneficio económico permitiría recuperar parte de los recursos invertidos en la construcción y mantenimiento del sistema (Belmont *et al.*, 2004). Así, se ha documentado la utilización de más de 60 especies ornamentales y locales (Vymazal, 2011). Dentro de las plantas estudiadas en sistemas subsuperficiales se encuentran:

a) *Zantedeschia aethiopica*: de nombre común Cala, es una planta herbácea perenne. Crece en áreas con abundante agua. Se distribuye en todas las regiones subtropicales del mundo, con temperaturas entre 12 y 25 °C, aunque soporta las heladas. Alcanza los 1,5 m de altura y produce de 2 a 3 flores blancas por cada bulbo (Sacoto, 2010).

b) *Canna* spp.: denominadas Achiras, son plantas de rizoma corto y robusto que pueden alcanzar los 3 m de altura. Se distribuyen a lo largo de regiones subtropicales, desde Estados Unidos hasta Argentina. Se

han cultivado para la decoración ya que poseen flores de color rojo oscuro a amarillo (Maas-Van de Kamer y Maas, 2008).

c) *Iris* spp.: comúnmente llamadas Lirios. *Iris pseudacorus* (Lirio amarillo), es una de la más utilizadas. Es una hierba perenne de hasta 1,5 m de altura, con un rizoma robusto. Se encuentra en cuerpos de agua de toda Europa, en el Medio Oriente y África norte. Las especies, *Iris versicolor* e *Iris sibirica* también son utilizadas en humedales construidos en América del Norte y en Europa, respectivamente (Vymazal, 2011).

La Tabla II muestra una caracterización de plantas comunes y ornamentales utilizadas en humedales construidos de flujo subsuperficial. Dichas plantas poseen características propias de su especie, las que son necesarias a considerar para su utilización en humedales construidos. En relación a las tasas de propagación, las especies que colonizan lentamente, como *Iris pseudacorus* (0,06 m/año), precisan mantener un mayor stock de plantas. La profundidad de penetración de plantas ornamentales varía entre 10 y 20 cm, la que es menor a la de macrófitas como *Phragmites australis*, cuyas raíces pueden llegar hasta 1 m de profundidad. Por otro lado, la altura máxima alcanzada por plantas ornamentales, de entre 1,2 y 3 m, es inferior a la de macrófitas comunes, que varían entre 3 y 5 m. Respecto a la calidad del agua, plantas ornamentales toleran bajas concentraciones de salinidad (0-0,5 ppt), en relación a las especies comúnmente utilizadas (0-20 ppt).

La Tabla III presenta las eficiencias de eliminación alcanzadas para humedales subsuperficiales que emplearon especies ornamentales. Considerando que sistemas plantados con *Phragmites* spp., *Typha* spp. y *Schoenoplectus* spp., presentan valores de eliminación promedio entre 30 y 95% para DBO₅, y entre 10 y 60% para nutrientes (NT y PT). La Tabla III muestra como

Tabla II. Caracterización de plantas comunes y ornamentales utilizadas en humedales construidos de flujo subsuperficial.

Planta ornamental		Características							
Familia	Nombre científico	Nombre común	Método de propagación	Tasa de propagación (m/año)	Profundidad implantación (cm)	Rango de salinidad (ppt)	Rango de temperatura (°C)	Altura máxima (m)	Ref
Comunes									
<i>Poaceae</i>	<i>Phragmites</i> spp.	Carrizo	Rizoma	Rápida	60 - 100	0 - 20	12 - 33	5	[1,6,7,8]
<i>Typhaceae</i>	<i>Typha</i> spp.	Espadaña	Rizoma	Muy Rápida (> 30)	30 - 40	0 - 0,5	10 - 30	3	[1,6,7,8]
<i>Cyperaceae</i>	<i>Schoenoplectus</i> spp.	Junco	Rizoma	Moderada (0,15)	70 - 80	0 - 5	16 - 27	3	[1,6,7,8]
Ornamentales									
<i>Araceae</i>	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Cala	Rizoma	Lenta	10 - 15		12 - 25	1,5	[4]
<i>Canaceae</i>	<i>Canna</i> spp.	Achira	Rizoma	Rápida	20	0	10 - 25	3	[1,3,8]
<i>Iridaceae</i>	<i>Iris</i> spp.	Lirio	Rizoma	Lenta (0,06)	15	0 - 0,5	10 - 20	1,2	[1,8]
<i>Cyperaceae</i>	<i>Cyperus</i> spp.	Papiro	Rizoma	Rápida	30	0 - 18	18 - 33	1,8	[1,2,5,8]

Referencias: [1] Borin (2003); [2] Heers (2006); [3] Maas-Van de Kamer y Maas (2008); [4] Sacoto (2010), [5] Tanner (2006), [6] USDA (2012), [7] Vymazal (2011), [8] Wallace y Knight (2006).

Tabla III. Eficiencias de eliminación de humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con especies ornamentales para tratamiento de aguas servidas.

Tipo y parámetros de operación del humedal		Eficiencias de eliminación y concentraciones efluentes						Referencia
Tipo	Plantas	TRH (d)	DBO ₅		NT		PT	
			(%)	mg/l	(%)	mg/l	(%)	
HSS	<i>Cannahybrids</i>	4			31 -43	15.4 - 18.6	26 - 44	Konnerup <i>et al.</i> , 2009
	<i>Heliconia pittacorom</i>				6 - 22	8 - 9	4 - 22	
HSS	<i>Strelitzia reginae</i>	4	70 - 78	11 - 15	70 - 76	12 - 15	69 - 73	Zurita <i>et al.</i> , 2006
	<i>Zantedeschia aethiopica</i>		77 - 81	10 - 12	80 - 82	9 - 10	75 - 82	
	<i>Canna hybrids</i>		78 - 83	9 - 11	74 - 82	9 - 13	75 - 81	
	<i>Agapanthus africanus</i>		60 - 71	15 - 20	61 - 73	13 - 19	70 - 74	
	<i>Hemerocallis dumortieri</i>		63 - 74	13 - 19	74 - 78	11 - 13	69 - 73	
HSS	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	4	76 - 82	21 - 28	48 - 61	11 - 15	45 - 54	Zurita <i>et al.</i> , 2008
VSS			75 - 86	16 - 28	43 - 53	13 - 16	46 - 60	
HSS	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	4	73 - 79	21 - 28	48 - 60	11 - 15	41 - 48	Zurita <i>et al.</i> , 2009
VSS			78 - 83	16 - 28	42 - 54	13 - 16	46 - 53	
HSS	<i>S. reginae, A. africanus,</i>	4	77 - 83	18 - 25	46 - 58	12 - 15	33 - 39	Zurita <i>et al.</i> , 2009
VSS	<i>Anthuriumandreaanum</i>		80 - 86	14 - 23	44 - 57	13 - 16	47 - 54	

Donde: TRH: Tiempo de Retención Hidráulico, DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días, NT: Nitrógeno total, PT: Fósforo total, HSS: Humedal de flujo Subsuperficial horizontal, VSS: Humedal de flujo subsuperficial Vertic

sistemas de humedales subsuperficiales plantados con especies ornamentales pueden alcanzar eficiencias similares, pese a las diferentes características descritas en el párrafo anterior y resumidas en la Tabla II (Konnerup, 2009, Zurita *et al.*, 2006).

Las especies ornamentales *Zantedeschia aethiopica* (Cala), *Strelitzia reginae* (Ave del paraíso), *Anthurium adraenum* (Flor de flamenco), *Agapanthus africanus* (Agapanto) y *Hemnerocallis dumortieri* (Lirio de día) fueron estudiadas en sistemas HSS y VSS a escala de laboratorio. Al respecto, la eliminación de materia orgánica (DBO_5) y nutrientes (NT y PT) fue superior al 70%. Comparativamente, las especies *Z. aethiopica* y *C. hybrids* mostraron una mejor tasa de crecimiento respecto de las otras tres especies. Lo anterior se manifestó en la producción del número de flores y brotes por planta, siendo más alta en *Z. aethiopica*, con alrededor de 6 brotes y 10 flores producidas. En tanto, *C. hybrids*, produjo hasta 3 flores y 4 brotes por planta (Zurita *et al.*, 2006). Asimismo, en sistemas HSS y VSS a escala piloto que utilizaron tres de estas especies, las eliminaciones promedio fueron de hasta 80,52 y 50%, para DBO_5 , NT y PT, respectivamente (Zurita *et al.*, 2009).

La especie *Z. aethiopica* fue estudiada de forma independiente en sistemas VSS y HSS a escala piloto alimentados con aguas servidas. Los valores efluentes promedio que se obtuvieron fueron de 23, 14 y 4 mg/l para DBO_5 , NT y PT, respectivamente. Estos valores son similares a los alcanzados por sistemas con especies comunes y muestran la factibilidad de usar esta especie en los dos tipos de humedales subsuperficiales (Zurita *et al.*, 2008).

Además, se documentó que las especies *Heliconia psittacorum* (Platanillo) y *Canna generalis*, tuvieron un buen desarrollo durante el tratamiento de aguas servidas también a escala piloto. La eliminación de nutrientes, en sistemas con *Canna generalis*,

varió entre 31 y 43%, y entre 26 y 44% para NT y PT, respectivamente. En comparación con sistemas de humedales que usaron *H. psittacorum*, que mostraron eficiencias de hasta 22% para NT y PT, podría concluirse que la especie *C. generalis* presenta un mejor comportamiento depurativo (Konnerup *et al.*, 2009).

Debido a los buenos resultados a escala piloto y laboratorio, existen reportes recientes del uso de especies ornamentales en sistemas de humedales construidos (HS, VSS y HSS) a escala real, obteniéndose como principal ventaja el mejoramiento paisajístico. En este sentido, las macrófitas, *Canna*, *Heliconia* y *Papyrus*, empleadas en estos escalamientos reales, han registrado valores de efluentes de 25 mg/l para DBO_5 y 11 mg/l para PT (Brix *et al.*, 2011). De igual manera, humedales del tipo VSS a escala real fueron plantados con una mezcla entre especies comunes y ornamentales (*I. pseudacorus*), alcanzando eliminaciones de hasta 20 y 44% para NT y PT, respectivamente (Xie *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los diferentes estudios revisados se puede concluir que es posible sustituir las plantas comunes (*Phragmites* spp., *Typha* spp., *Schoenoplectus* spp.) por especies ornamentales como *Zantedeschia*, *Canna* spp. e *Iris* spp., en humedales construidos, sin afectar las eficiencias de eliminación para materia orgánica y nutrientes de hasta 86 y 80% para DBO_5 y nutrientes (NT y PT), respectivamente. Así, los humedales construidos de flujo subsuperficial plantados con especies ornamentales, podrían ser implementados en zonas rurales y de baja densidad poblacional, de Chile o cualquier país en vía de desarrollo. Estos sistemas de humedales subsuperficiales plantados con especies ornamentales, proporcionan como

principal valor un mejoramiento estético del entorno. Además, presentan la posibilidad de obtener un beneficio económico para la mantención del sistema, si se utilizan especies ornamentales que permitan la producción de flores de corte comercializables.

BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE, P. (2004), Mecanismos de eliminación de la materia orgánica y de los nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial. En: GARCÍA J, MORATÓ J, BAYONA J (eds). (2004), Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Barcelona: CPET, pp 17-30.
- BARAÑAO, P., TAPIA, L. (2004), Tratamiento de las aguas servidas: Situación en Chile. *Ciencia y Trabajo* 6:111-117.
- BÉCARES, E. (2004), Función de la vegetación y procesos de diseño de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal y flujo superficial. En: GARCÍA J, MORATÓ J, BAYONA J (eds). Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Barcelona: CPET, pp 51-62.
- BELMONT, M., CANTELLANO, E., THOMPS, S., WILLIAMSON, M., SÁNCHEZ, A., METCALFE, C. (2004), Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico. *Ecological Engineering* 23:299-311.
- BORIN, M. (2003), Fitodepurazione: Soluzioni per il trattamento dei relui con le piante, Bologna: Edagricole, pp 197.
- BRIX, H., ARIAS, C., BUBBA, M. (2001), Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* 44:47-54.
- BRIX, H., SCHIERUP, H., ARIAS, C. (2007), Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – what did we learn?. *Water Science and Technology* 56:63-68.
- BRIX, H., KOOTTATEP, T., FRYD, O., LAUGESSEN, C. (2011), The flower and the butterfly constructed wetland system at Koh Phi Phi—System design and lessons learned during implementation and operation. *Ecological Engineering* 37:729-735.
- CRITES, R.; MIDDLEBROOKS, J.; REED, S. (2006), Natural wastewater treatment systems. Boca Raton: Taylor & Francis Group, pp 537.
- GARCÍA, J. MUJERIEGO, R., OBIS J., BOU, J. (2001), Wastewater treatment for small communities in Catalonia (Mediterranean region). *Water Policy* 3:341-350.
- GARCÍA, J. (2004), Humedales construidos para controlar la contaminación: perspectiva sobre una tecnología en expansión. En: GARCÍA J, MORATÓ J, BAYONA J (eds). Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Barcelona: CPET, pp 7-16.
- GARCÍA, J., AGUIRRE, P., MUJERIEGO, R., HUANG, Y., ORTIZ, L., BAYONA, J. (2004), Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Water Research* 38:1669-1678.
- GARCÍA, J., CORZO A. (2008), Depuración con humedales construidos: Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya, pp 108.
- HABIT, E., PARRA, O., VALDOVINOS, C. (2005), Ictiofauna de un sistema fluvial receptor de aguas servidas: Respuestas a una planta de tratamiento (Río Quinchilca, Chile). *Gayana* 69:94-103.
- HEERS, M., (2006), Constructed wetlands under different geographic conditions: Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species. Master thesis Department of Environmental Engineering, Faculty of Life Sciences, Hamburg University of Applied Sciences, Germany, pp 166.
- KADLEC, R., WALLACE, S. (2009), Treatment Wetlands. Boca Raton: Taylor & Francis Group, pp 1016.
- KONNERUP, D., KOOTTATEP, T., BRIX,

- H. (2009), Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with *Canna* and *Heliconia*. *Ecological Engineering* 35: 248–257.
- MAAS-VAN DE KAMER, H., MAAS, P. (2008), The Cannaceae of the world. *Blumea* 53:247–318.
- METCALF, L., EDDY, H. (2003), *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th Edition, New York: McGraw-Hill, pp 1819.
- PLAZA DE LOS REYES, C., VERA, I., SALVATO, M., BORIN, M. Y VIDAL, G. (2011), Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales. *Tecnología del Agua* 330:40–49.
- ROJAS, K. (2012), Puesta en marcha de un sistema piloto de humedales construidos de flujo subsuperficial para la depuración de aguas servidas rurales: Consideración de indicadores de sustentabilidad. Tesis Ingeniería Ambiental, Universidad de Concepción, pp 114.
- SACOTO, G. (2010), Respuesta fitotécnica de tres variedades de *Zantedeschia aethiopica* L. Spreng, a la aplicación de ácido giberélico y fertilización orgánica, en el Quinche, Provincia de Pichincha. Tesis Ingeniería Agronómica, Universidad Estatal de Bolívar, Venezuela, pp 144.
- STOTTMEISTER U., WIEßNER, A., KUSCHK, P., KAPPELMEYER, U., KÜSTNER, M., BEDERSKI, O., MÜLLER, R., MOORMANN, H. (2003), Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances* 22:93–17.
- TANNER, C., CHAMPION, P., KLOOSTERMAN, V. (2006), New Zealand constructed wetland planting guidelines. National Institute of Water and Atmospheric Research report published in association with the New Zealand Water & Wastes Association, pp 26.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA) (2012), Plant Database. Disponible en: <http://plants.usda.gov/classification.html>.
- VERA, I., GARCÍA, J., SÁEZ, K., MORAGA, L., VIDAL, G. (2011), Performance evaluation of eight years experience from constructed wetlands systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. *Ecological Engineering* 37:364–371.
- VERA, I., SÁEZ, K., VIDAL, G. (2013), Performance of 14 full-scale sewage treatment plants: Comparison between four aerobic technologies regarding effluent quality, sludge production and energy consumption. *Environmental Technology* 34:2267–2275.
- VON SPERLING, M. (2007), Basic principles of wastewater treatment. London: IWA Publishing, pp 212.
- VYMAZAL, J. (2005), Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* 25:478–490.
- VYMAZAL, J. (2007), Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 380:48–65.
- VYMAZAL, J., Y KRÖPFELOVÁ, L. (2008), Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. *Environmental Pollution* 14. Springer, Heidelberg: Springer, pp 566.
- VYMAZAL, J. (2011), Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review. *Hydrobiologia* 674:133–156.
- WALLACE, S., KNIGHT, R., (2006), Small-scale constructed wetland treatment systems: Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements, Water Environment Research Foundation: Alexandria, Virginia, pp 350.
- XIE, X., HE, F., XU, D., DONG, J., CHENG, S., WU, Z. (2011), Application of large-scale integrated vertical-flow constructed wetland in Beijing Olympic forest park: design, operation and performance. *Water and Environmental Journal* 26:100–107.
- ZURITA, F., DE ANDA, J., BELMONT, M. (2006), Performance of laboratory-scale wetlands planted with tropical ornamental plants to treat domestic wastewater. *Water Quality Research Journal of Canada* 41:410–417.
- ZURITA, F., BELMONT, M., DE ANDA,

- J., CERVANTES-MARTINEZ, J. (2008), Stress detection by laser-induced fluorescence in *Zantedeschia aethiopica* planted in subsurface-flow treatment wetlands. *Ecological Engineering* 33:110-118.
- ZURITA, F. DE ANDA, J., BELMONT, M. (2009), Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 35:861–869.
- ZURITA, F. BELMONT, M., DE ANDA, J., WHITE J. (2011), Seeking a way to promote the use of constructed wetlands for domestic wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology* 63:654-659.