

Influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus* en la eliminación de materia orgánica y nutrientes contenidos en aguas servidas durante la operación de puesta en marcha de humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial

Influence of season and species *Phragmites australis* and *Schoenoplectus californicus* on the removal of organic matter and nutrients contained in sewage wastewater during the start up operation of the horizontal subsurface flow constructed wetland

*Karen Rojas, Ismael Vera, Gladys Vidal**

Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental. Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile. Universidad de Concepción. Barrio Universitarios s/n. Casilla 160-C. Concepción, Chile.

(Recibido el 24 de julio de 2012. Aceptado el 11 de octubre de 2013)

Resumen

Las plantas de tratamiento de aguas servidas basadas en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (HSS), logran su etapa de madurez después de dos años de operación. La eficiencia de operación de los sistemas depende de la estacionalidad, tipo de plantas y periodo de madurez del sistema. El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*, en la eficiencia de depuración en materia orgánica y nutrientes de unidades de HSS, durante la etapa operativa de puesta en marcha. Con esta finalidad, se implementaron cuatro unidades de HSS bajo condiciones climáticas mediterráneas australes. Dos unidades fueron plantadas con *Phragmites australis* y las otras dos, con *Schoenoplectus californicus*. En este trabajo se presentan los resultados de la etapa de puesta en marcha, que cubre los primeros 193 días de operación. Se evaluó la influencia de la especie de planta y la estación (invierno y

* Autor de correspondencia: teléfono: + 56 + 41 + 2204067, fax: + 56 + 41 + 2207076, correo electrónico: glvidal@udec.cl. (G. Vidal)

primavera), en la eficiencia de depuración de materia orgánica (Demanda Biológica de Oxígeno, DBO_5 , y Demanda Química de Oxígeno, DQO) y nutrientes (nitrógeno ($N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$ y NT) y fósforo ($P-PO_4^{3-}$ y PT)). Las unidades de HSS plantadas con *Phragmites australis* mostraron mejor adaptación temprana que las unidades de HSS plantadas con *Schoenoplectus californicus*. Sin embargo, las eficiencias de eliminación fueron similares en todas las unidades. Estacionalmente, se pudo evidenciar una diferencia de eliminación para DQO (invierno: 18 a 30%, primavera: 45 a 55%) y NT (invierno: 25 a 65%, primavera: 25 a 35%)

Palabras clave: Aguas servidas, humedal construido de flujo horizontal subsuperficial, *Phragmites australis*, puesta en marcha, *Schoenoplectus californicus*

Abstract

The Wastewater Treatment Plant (WWTP) based on horizontal subsurface flow constructed wetland (HSS) achieved its full operation after two years of implantation. Removal efficiency of this WWTP is function of seasonality, type of species plant and maturity period of the system. The objective of this work is evaluating of the influence of season and plant species *Phragmites australis* and *Schoenoplectus californicus* in removal of organic matter and nutrients in HSS units during start up operation phase. To this end, four HSS units were implemented in Mediterranean Austral weather conditions. Two HSS units were planted with *Phragmites australis*, and the other two HSS units were planted with *Schoenoplectus californicus*. This paper shows results from start up operation phase which cover the first 193 days. It was evaluated the influence of plant species and season (winter and spring), in the removal efficiency of organic matter (5-day Biological Oxygen Demand, BOD_5 , and Chemical Oxygen Demand, COD) and nutrients (nitrogen (NH_4^+-N , NO_3^- -N and TN) and phosphorus ($PO_4^{3-}-P$ and TP)). The HSS units planted with *Phragmites australis* showed better early adaptation than HSS units planted with *Schoenoplectus californicus*. However, removal efficiencies were similar in all units. Seasonality, it can evidence differences for COD (winter: 18 to 30%, spring: 45 to 55%) and TN (winter: 25 to 65%, spring: 25 to 35%).

Keywords: Sewage wastewater, horizontal subsurface flow constructed wetland, *Phragmites australis*, start up operation, *Schoenoplectus californicus*

Introducción

Las Plantas de tratamiento basadas en humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial (HSS), han resultado ser una solución atractiva para el tratamiento de aguas servidas de comunidades rurales [1]. En estos sistemas, el

agua servida es distribuida por un sistema de entrada en un extremo del lecho, se infiltra por un medio granular de relleno y entre las raíces de la vegetación, fluyendo en sentido horizontal, y siendo evacuada en el extremo opuesto del lecho, por medio de tuberías o vertederos [2]. La profundidad del HSS puede variar entre 0,3 y 1,0

m [3]. Se utiliza como material de relleno desde arena gruesa ($d_{10} = 2$ mm) hasta grava gruesa ($d_{10} = 128$ mm) [4]. Por otra parte, la aplicación de agua servida es variable con cargas hidráulicas (CH) entre 10 y 100 mm/d [5]. Los Tiempos de Retención Hidráulico (TRH) varían entre 2,0 y 10,0 d [5,6]. En el caso de la vegetación, *Phragmites spp.* ha sido la especie más empleada en Europa [3]. Sin embargo, *Phragmites spp.* es considerada una especie invasora y es por esto, que se propone el uso de especies nativas como *Typha spp.* y *Schoenoplectus spp.* que resultan ser altamente atractivas y ventajosas [2]. En este sentido, estudios indican que en HSS existen diversidad de resultados relacionados con el uso de especies vegetales, variando desde ningún aporte a la eliminación de materia orgánica y nutrientes, hasta incrementos de eliminación por una especie sobre otra [7].

Para la puesta en marcha de HSS plantados con *Phragmites spp.* se ha obtenido eliminación de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) entre 50 y 60%, mientras que, para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) las eliminaciones variaron entre 60% y 70% [5]. En el caso de los nutrientes, la eliminación de amonio (NH_4^+) alcanzó solo un 30%, y la eliminación de fosfato (PO_4^{3-}) fue inferior a 10%. Además, identificó que procesos anaeróbicos (Potenciales de oxidorreducción (POR) menores a -100 mV [8]), son los responsables de la eliminación. Sin embargo, no presenta resultados por estación. Por otra parte, para HSS con más de 4 años de operación, plantados con *Phragmites spp.* se han obtenido para la DBO_5 eliminaciones sobre 70%, tanto en verano, como en invierno [9]). Más aún, [1] reporta eficiencias de eliminación de DBO_5 , DQO y Sólidos Suspendidos Totales (SST), superiores al 75%, y eliminación de Nitrógeno total (NT) y Fósforo total (PT), entre 30 y 60%. Sin embargo, no identifican valores por estación.

Evaluaciones previas [10] mostró que la puesta en marcha de HSS plantados con *Schoenoplectus spp.*, encontrando eliminaciones de DQO y NH_4^+ entre 60 y 80%, para la estación de verano. Por otra parte, [11] han encontrado que *Schoenoplectus spp.* aún en condiciones invernales puede alcanzar condiciones de eliminación para DQO superiores al 80%. Por otra parte, resulta importante conocer y analizar resultados de la influencia de la estación y la evolución de la vegetación, sobre las eficiencias de eliminación de HSS durante el proceso operativo de puesta en marcha. La puesta en marcha, es el período de tiempo desde el inicio de operación hasta que se alcanzan coberturas vegetales entre 60% y 80% [12]. Para un sistema de HSS, la puesta en marcha puede tardar 2 años, y en el peor de los casos, en climas muy fríos, de 3 a 4 años [12]. Durante este período se monitorea el crecimiento y estado de las plantas, el funcionamiento hidráulico, y variaciones de la calidad del agua, proporcionando datos para identificar problemas operacionales [3]. Debido a lo antes indicado, el objetivo de este trabajo es evaluar la influencia de la estación y de las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*, en la eficiencia de depuración en materia orgánica y nutrientes de unidades de HSS, durante la operación de puesta en marcha.

Materiales y métodos

Sistema piloto

Se implementó una planta piloto constituida por cuatro unidades de HSS, como lo muestra la figura 1, y con las características especificadas en la tabla 1. Cada unidad de HSS está plantada con 18 ejemplares: HSS-Ph1 y HSS-Ph2, con *Phragmites australis*, y, HSS-Sc1 y HSS-Sc2 con *Schoenoplectus californicus*.

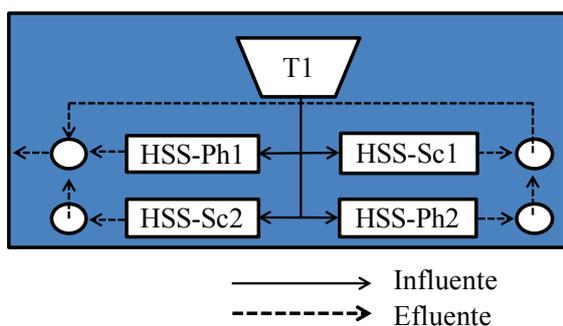


Figura 1 Configuración del sistema piloto. HSS-Ph1 y HSS-Ph2: unidades plantadas con *Phragmites australis*; HSS-Sc1 y HSS-Sc2: unidades plantadas con *Schoenoplectus californicus*. T1: Tanque de almacenamiento del influente

Tabla 1 Características de cada unidad de HSS

Características Físicas	Unidad	Valor
Material		
Tipo	-	Grava
Tamaño	mm	19 - 25
Porosidad	-	0,4
Geométricas		
Área Superficial	m ²	4,5
Relación Largo/Ancho	-	2
Altura Promedio Celda	m	0,57
Altura lamina de agua	m	0,4
Pendiente de Fondo	m/m	0,05
Volumen Total	m ³	1,28

El clima de la zona de implantación, localizada a los 36°59'26.93" de la latitud sur, y 72°56'47.23" de longitud Oeste, es templado lluvioso con influencia mediterránea. Presenta precipitaciones de 1.100 mm anuales y temperaturas medias inferiores a 13°C, con 12°C de amplitud térmica anual. La operación se llevó a cabo por 193 días, lo que incluye las estaciones de invierno (22 junio a 21 de septiembre) y primavera (22 de septiembre a 21 de diciembre). La alimentación de las 4 unidades de HSS se realizó con agua servida, influente a una planta de tratamiento que sirve

a una comunidad rural, con cobertura a 20.000 habitantes. La extracción se realizó con una bomba para aguas negras marca Pedrollo modelo Vxm8/35, después del pre-tratamiento (cámara de rejillas de 40 mm de abertura y desarenador). Posteriormente, es almacenada en un estanque de 650 l, que alimenta por presión a cada una de las 4 unidades de HSS.

El seguimiento se realizó tomando los datos: horas de operación (t), altura de la columna de agua (m), volumen de agua aplicado (m³). Además, dentro de cada unidad de HSS, se instalaron 3 puntos de muestreo (en cada tercio del HSS siguiendo el flujo de agua) donde se midieron los parámetros in-situ: pH, Temperatura (T), Oxígeno Disuelto (OD) y Potencial de Óxido-Reducción (POR), cada 15 días.

El comportamiento del sistema se evaluó a través del monitoreo de influentes y efluentes, de cada unidad de HSS, midiendo los siguientes parámetros: DQO, DBO₅, SST, Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV), nitrógeno del amonio (N-NH₄⁺), nitrógeno del nitrato (N-NO₃⁻), NT, fósforo del fosfato (P-PO₄⁻³) y PT. Los parámetros DQO, SST, SSV, N-NO₃⁻, N-NH₄⁺ y P-PO₄⁻³ se midieron cada 15 días, mientras que, la DBO₅, NT y PT se midieron cada 30 días. *Phragmites australis* y *Schoneoplectus californicus* fueron monitoreadas semanalmente, evaluando: sobrevivencia, número de brotes, y altura.

Métodos analíticos

Con los valores de operación se calcularon los parámetros hidráulicos: Carga Hidráulica (CH) y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), para cada unidad de HSS, de acuerdo a [2]. Los parámetros in-situ tomados en cada unidad de HSS, fueron medidos con electrodo empleando el multiparamétrico portátil OAKTON (PC650-480485). El OD fue tomado con medidor portátil Hanna oxi 330i/set HI 9146-04. La DQO, DBO₅, SST, SSV, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y P-PO₄⁻³ fueron medidos de acuerdo a los protocolos descritos en [13]. El PT y NT fueron medidos por Kit Merck Spectroquant -Nova 60. Todas las muestras fueron filtradas por membranas Wathman de 0,45 µm de tamaño de poro. Los monitoreos de

Phragmites australis y *Schoenoplectus californicus* fueron realizados de forma análoga a los llevados a cabo por [14].

Resultados y Discusión

Caracterización del influente

La tabla 2 muestra la caracterización fisicoquímica del influente para las estaciones de invierno y primavera. Las concentraciones de los parámetros DBO₅, DQO, SST, SSV, N-NH₄⁺ y NT aumentaron más de 40% en la estación de primavera, respecto a la estación de invierno. Por otra parte, PT y P-PO₄⁻³ aumentaron en promedio 2 mg/l. El influente presenta desviaciones estándar entre 10 y 40% en invierno, y de 20 a 60% en primavera (respecto a la media) para todos los parámetros evaluados.

Tabla 2 Caracterización del influente

Parámetro	Concentración (mg/l)	
	Invierno	Primavera
pH ^a	7,61 ± 0,48	7,45 ± 0,48
DBO ₅	184,00 ± 38,57	236,00 ± 43,79
DQO	287,59 ± 24,98	425,17 ± 350,59
SST	216,57 ± 87,66	449,17 ± 272,33
SSV	123,75 ± 85,87	297,50 ± 142,56
N-NH ₄ ⁺	39,45 ± 13,15	100,25 ± 38,61
N-NO ₃ ⁻	ND	ND
NT	54,57 ± 17,33	117,67 ± 15,37
P-PO ₄ ⁻³	8,18 ± 2,47	10,68 ± 0,75
PT	14,07 ± 3,18	16,43 ± 4,33

^aEn unidades de pH. ND: No detectado. n = 6 para pH, DQO, SST, SSV, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y P-PO₄⁻³. n = 3 para DBO₅, NT y PT. Los n son iguales para cada estación

Comportamiento hidráulico

La figura 2 muestra los parámetros CH y TRH para HSS-Ph1, HSS-Ph2, HSS-Sc1 y HSS-Sc2,

en las estaciones de invierno y primavera. Las CH aplicadas variaron entre 15 y 40 mm/d en invierno. Debido a que el pre-tratamiento para el influente de agua servida cruda es básicamente un cribado precario, se produjo el ingreso de grasas y sólidos menores a 40 mm a la zona de entrada de cada unidad de HSS. Como consecuencia, se observó el fenómeno de “clogging”, en los primeros 0,20 m. El “clogging” ocurre por la acumulación de sólidos, generando la obstrucción del medio poroso e impidiendo la correcta circulación del agua [2]. Para mitigar el problema, se redujo la CH a valores entre 10 y 25 mm/d para la primavera (reduciendo también la carga de sólidos) y se procedió a remover el material granular superficial de la zona de entrada cada 45 días. Se recomienda que la CH sea menor a 40 mm/d, acorde con la operación de las unidades de HSS [15]. Respecto a los TRH medios, éstos variaron entre 5 y 10 d en invierno, mientras que en primavera, variaron entre 8 y 14 d, siendo acordes a lo planteado por [15, 16], quienes indican que en HSS los TRH varían entre 2 y 10 d, siendo preferente TRH mayores a 5 d.

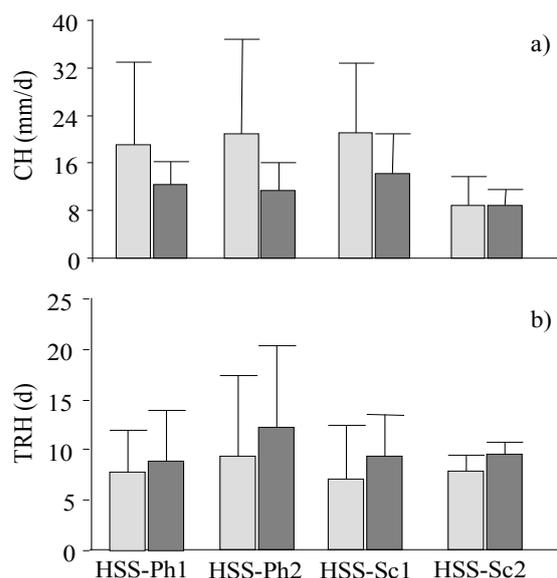


Figura 2 (a) Cargas Hidráulicas (CH) y b) Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) para HSS-Ph1, HSS-Ph2, HSS-Sc1 y HSS-Sc2. (□) Invierno; (■) Primavera

Parámetros in situ

La tabla 3 muestra los parámetros in-situ medidos en HSS-Ph1, HSS-Ph2, HSS-Sc1 y HSS-Sc2, para las estaciones de invierno y primavera. El OD medido en las 4 unidades de HSS, es inferior a 0,6 mg/l. [5] muestran que durante la puesta en marcha de un HSS para tratar aguas servidas, las concentraciones de OD variaron entre 0,1 y 0,2 mg/l, similares a las obtenidas en este trabajo. Por otra parte, Vymazal y Kröpfelová [16] indican que HSS con OD menores a 2 mg/l, se consideran como sistemas anaeróbicos. El POR para las 4 unidades de HSS fue inferior a -180 mV,

tanto en invierno, como en primavera. Valores similares fueron reportados por García *et al.* [5]. Por su parte, Faulwetter *et al.* [8] indicaron que valores de POR entre -100 y -350 mV corresponden a condiciones anaeróbicas. El pH no presenta cambios entre la estación de invierno y primavera, con variaciones entre 6,9 y 7,2, en las 4 unidades de HSS. Similares valores (7,0 y 7,4) fueron obtenidos por Marecos do Monte y Albuquerque [15]. La temperatura presentó un máximo de 25,1°C en primavera, y de 15,5°C en invierno, llegando a mínimas de 9,1°C. Sin embargo, García *et al.* [5] no reporta mejoras en la eficiencia de eliminación cuando la temperatura varía entre 18 y 24 °C.

Tabla 3 Parámetros in-situ medidos en cada unidad de HSS por estación

<i>Parámetro</i>	<i>Estación</i>	<i>HSS-Ph1</i>	<i>HSS-Ph2</i>	<i>HSS-Sc1</i>	<i>HSS-Sc2</i>
POR (mV)	I	-182,0±36,4	-191,7±120,3	-207,1±57,8	-219,9±56,0
	P	-233,9±18,3	-251,6±27,9	-248,4±22,3	-257,3±32,1
pH	I	7,0±0,2	7,0±0,4	6,9±0,4	7,1±0,4
	P	6,9±0,2	7,1±0,2	7,1±0,2	7,2±0,1
T (°C)	I	11,2±2,6	11,2±2,4	11,2±2,3	11,6±2,0
	P	20,2±3,8	21,2±3,3	21,0±3,5	21,6±3,3
OD (mg/l)	I	0,5±0,3	0,6±0,2	0,5±0,3	0,4±0,2
	P	0,4±0,3	0,5±0,2	0,5±0,1	0,3±0,1

HSS-Ph1 y HSS-Ph2: HSS plantados con *Phragmites australis*. HSS-Sc1 y HSS-Sc2: HSS plantados con *Schoenoplectus californicus*. I: Invierno. P: Primavera. POR: Potencial de oxido reducción. T: Temperatura. OD: Oxígeno disuelto. n=6, por estación.

Concentraciones efluentes y eficiencias de eliminación

La figura 3 muestra las concentraciones efluentes a HSS-Ph1, HSS-Ph2, HSS-Sc1 y HSS-Sc2, para

la DBO₅, DQO, SST, SSV, N-NH₄⁺ y P-PO₄⁻³. Mientras que la tabla 4 muestra las eficiencias de eliminación promedio obtenidas para todos los parámetros evaluados.

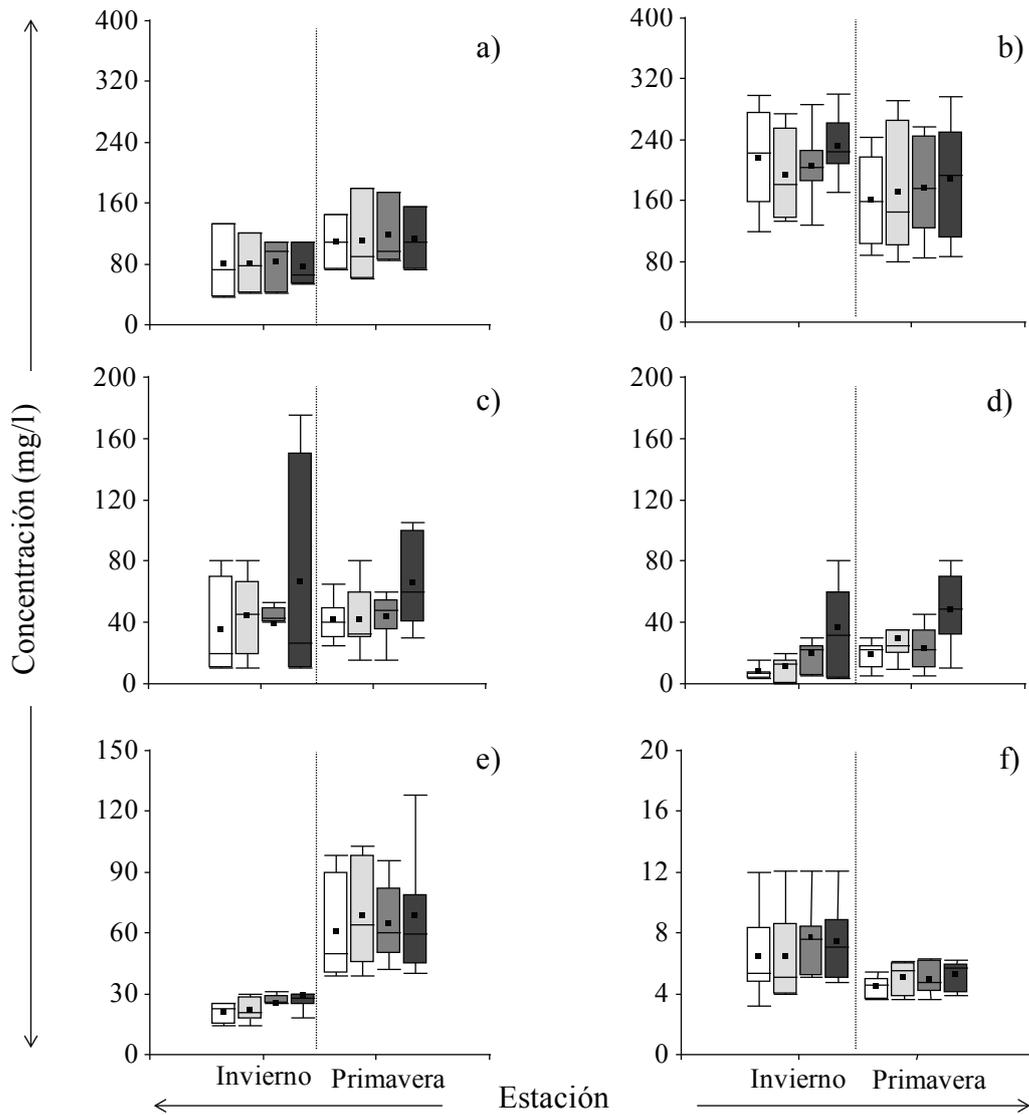


Figura 3 Concentraciones efluentes. a) DBO₅, b) DQO, c) SST, d) SSV, e) N-NH₄⁺, f) P-PO₄⁻³. (□) HSS-Ph1; (▒) HSS-Ph2; (■) HSS-Sc1; (■) HSS-Sc2

Tabla 4 Eficiencias de eliminación para cada unidad de HSS por estación

Parámetro	Estación	Eficiencia (%)			
		HSS-Ph1	HSS-Ph2	HSS-Sc1	HSS-Sc2
DBO ₅	I	58,7±17,5	58,0±13,4	55,4±18,4	59,4±7,8
	P	54,6±12,2	54,6±21,2	50,9±15,1	53,1±14,0
DQO	I	26,6±17,7	32,4±19,8	27,8±17,1	18,7±14,9
	P	54,8±16,7	53,0±24,5	50,1±19,1	46,2±25,1
SST	I	83,1±13,4	68,7±31,8	76,1±12,0	72,6±28,6
	P	80,8±9,5	86,4±7,7	82,7±12,8	72,8±20,8
SSV	I	88,9±14,9	80,5±27,9	71,9±18,1	72,2±26,4
	P	84,3±10,2	79,1±19,7	73,1±37,7	72,5±12,1
N-NH ₄ ⁺	I	45,8±17,0	41,7±18,4	34,6±15,0	25,8±13,4
	P	35,2±12,0	26,8±10,3	28,7±13,5	36,8±16,7
NT	I	52,8±12,5	52,1±15,7	27,7±2,0	63,1±0,3
	P	33,6±13,3	27,8±10,6	27,0±2,3	28,6±2,7
P-PO ₄ ⁻³	I	14,5±7,8	14,2±1,1	9,8±4,6	18,4±3,4
	P	17,0±2,1	19,3±5,3	20,0±2,2	16,1±2,5
PT	I	22,5±10,1	19,0±1,1	4,4±0,6	11,8±6,3
	P	6,6±2,9	4,8±2,2	14,5±4,5	10,8±5,1

HSS-Ph1 y HSS-Ph2: HSS plantados con *Phragmites australis*. HSS-Sc1 y HSS-Sc2: HSS plantados con *Schoenoplectus californicus*. I: Invierno. P: Primavera. n=6 para DQO, SST, SSV, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ y P-PO₄⁻³. n = 3 para DBO₅, NT y PT. Los n son iguales para cada estación. N-NO₃⁻ no fue detectado en influente ni efluentes.

Materia orgánica y sólidos

Las concentraciones efluentes obtenidas por las 4 unidades de HSS para DBO₅ muestran valores medios que variaron entre 80 y 120 mg/l, y eficiencias de eliminación cercanas al 50%, sin diferencias por vegetación o por estación. De acuerdo a García *et al.* [5,6] las concentraciones de DBO₅ en el efluente de un HSS son inferiores a 20 mg/l, y presentan eficiencias de eliminación mayores a 75%. En el caso de la DQO se obtuvieron concentraciones medias entre 160 y 240 mg/l, con eficiencias bajo 30% en invierno, y bajo 55% en primavera, sin diferencias por vegetación. Más aún, García y Corzo [3] plantean que para DQO las concentraciones efluentes a HSS deben ser menores a 60 mg/l, con eficiencias de eliminación de hasta 86%. Por tanto, existen diferencias de 25% en promedio para DBO₅ y DQO, entre este trabajo y otros encontrados en investigaciones anteriores [3,5,6]. Esto se debe a la fase operativa de puesta en marcha, donde

no hay un completo desarrollo de las poblaciones bacterianas responsables de la eliminación de los contaminantes [3]. Además, es posible que las diferencias también se expliquen, por la existencia de un incremento de hasta 50% entre los valores de carga orgánica aplicada en este trabajo (2,5 a 3,0 gDBO₅/m²·d, para los dos estaciones), respecto a la recomendación realizada por [5] de 2,0 gDBO₅/m²·d.

Por otra lado, los SST efluentes a HSS-Ph1, HSS-Ph2, HSS-Sc1 y HSS-Sc2, muestran concentraciones medias que variaron entre 30 y 70 mg/l, con eficiencias de eliminación entre 74 y 84%, sin diferencias entre invierno y primavera. En este sentido, [16] han encontrado concentraciones de SST inferiores a 22 mg/l y eficiencias de eliminación entre 65% y 85%. Las diferencias entre las concentraciones obtenidas en este trabajo y [16], pueden estar relacionadas con los valores de SST influentes (medias,

invierno: 216 mg/l, primavera: 449 mg/l), que duplican el valor de SST influente encontrado por éstos autores (116 mg/L). En el caso de los SSV, todas las concentraciones medias son inferiores a 50 mg/l, con eficiencias de eliminación cercanas a 75%, las que son independientes de la estación y de la especie vegetal.

Nutrientes

De las formas de nitrógeno evaluadas, el NT y el N-NH_4^+ (representa más del 60% del NT [17]), presentan un comportamiento similar. Ambos parámetros, en las 4 unidades de HSS, durante el invierno, presentaron eliminaciones inferiores a 65% para NT y a 44% para N-NH_4^+ (concentraciones medias, NT: 16-30 mg/L, N-NH_4^+ : <30 mg/L). Para la primavera, las eliminaciones de ambos parámetros en las 4 unidades estudiadas disminuyeron a valores menores a 35% (concentraciones medias, NT: 50-83 mg/L, N-NH_4^+ : 60-70 mg/L). Estas eliminaciones de NT y N-NH_4^+ son similares a los valores propuestos por [1] y [16] (20 y 60%). Comparativamente, las dos estaciones no presentan diferencias por tipo de vegetación. Pese a esto, las diferencias entre las eliminaciones y concentraciones de invierno y primavera, se atribuyen a la concentración de NT en el influente (tabla 2), que aumenta hasta un 40% durante la primavera. Sin embargo, la cantidad de NT removida durante las dos estaciones evaluadas se mantiene estable, y varía en un rango de 0,3 a 0,5 gNT/m²•d. Pese a ésta estabilidad, el rango de NT removido es inferior en máximo un 40% al propuesto por [18] de 0,5 a 0,7 gNT/m²•d para HSS, que presentan cargas aplicadas entre 0,8 y 1,0 gNT/m²•d (similares a las de este trabajo). Esta diferencia puede explicarse, por la etapa operativa de puesta en marcha en que se encuentra el sistema, que no le da la madurez suficiente al HSS para asimilar y/o transformar el nitrógeno [16]. La otra forma de nitrógeno evaluada corresponde al N-NO_3^- , él que no fue detectado en los influentes y/o efluentes de las 4 unidades de HSS. Esto se corresponde con la identificación de condiciones anaeróbicas en las dos estaciones evaluadas, y se relaciona con eliminaciones inferiores a 50% para

el N-NH_4^+ (limitación de la nitrificación [16]), y, por tanto, reducciones inferiores a 50% para NT.

Por otra parte, el P-PO_4^{3-} (representa más del 60% del PT en el agua servida [17]), mostró un comportamiento similar al PT. Ambos parámetros presentan eliminaciones medias que variaron entre 5 y 21%, sin diferencias por estación ni por tipo de vegetación. Estos resultados son similares a los encontrados por [6], quienes habían reportado eliminaciones inferiores a 15%.

Evolución de la vegetación

La figura 4 presenta los resultados de crecimiento de *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*. Las 18 plantas iniciales inoculadas en cada unidad de HSS germinaron en invierno (día 26 de operación), aumentando su actividad en la primavera, día 77 de operación (Figura 4). En HSS-Ph1 y HSS-Ph2, germinaron 17 y 13 plantas respectivamente (cobertura entre 30 % y 40%, al día 193 de operación), con un máximo de 190 plántulas. Por otra parte, en HSS-Sc1 y HSS-Sc2 germinaron entre 12 y 9 plantas respectivamente (cobertura de 15% a 25% al día 193 de operación), con un máximo de 110 plántulas. Al respecto, [2] indican que HSS plantados con coberturas inferiores al 5% pueden llegar a alcanzar una cobertura del 100% en menos de tres años. En este sentido, se establece que los HSS pueden comenzar su fase de operación cuando la cobertura vegetal alcanza entre el 60 y 80% [12]. En el periodo de puesta en marcha, las 4 unidades HSS no han alcanzado dicha cobertura vegetal. Esto se debe a que el período de evaluación de 193 días (medio año), es inferior al propuesto (2 años) para tener coberturas de plena operación [12]. En el caso de HSS-Ph1 y HSS-Ph2, plantados con *Phragmites australis*, las plantas presentan alturas promedio de 1,1 m al finalizar los 193 días de monitoreo. En el caso de HSS-Sc1 y HSS-Sc2, plantadas con *Schoenoplectus californicus*, las alturas fueron en promedio de 0,90 m. Estas diferencias indican, que para una etapa inicial de la puesta en marcha de un HSS, *Phragmites australis* presenta una mejor adaptación temprana.

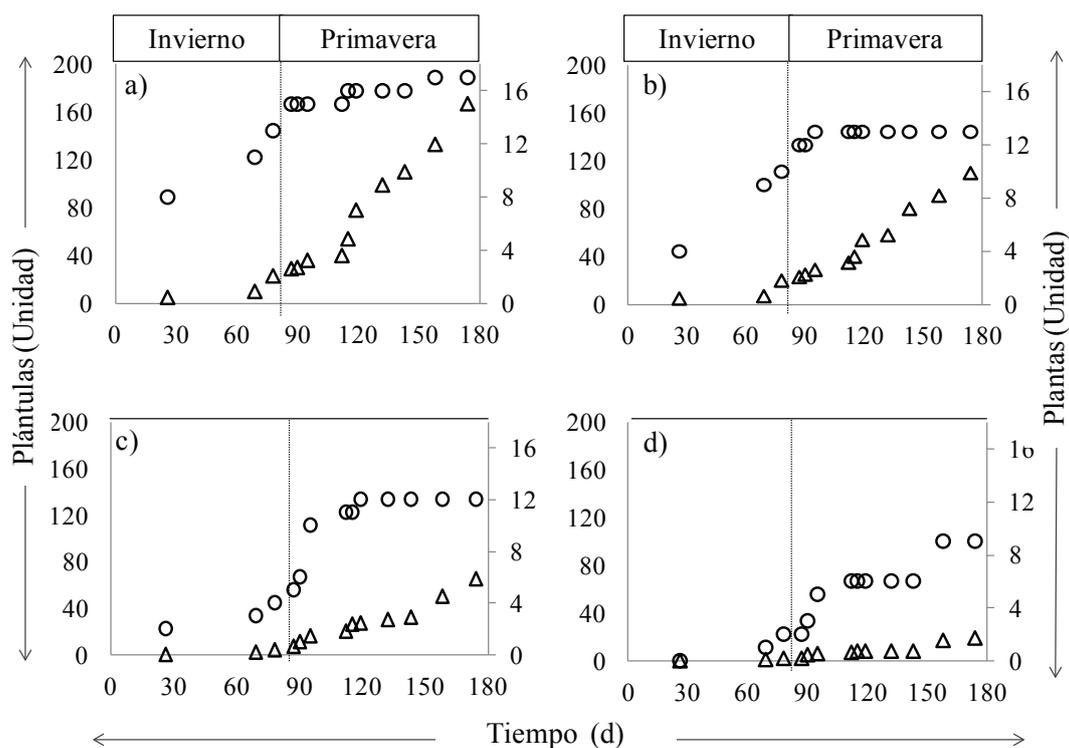


Figure 4 Crecimiento de la vegetación. a) HSS-Ph1; b) HSS-Ph2; c) HSS-Sc1 y d) HSS-Sc2. (O) Plantas. (Δ) Plántulas

Conclusiones

- Todas las unidades de HSS, funcionaron bajo condiciones anaeróbicas. Se pudo constatar que en estación de invierno y primavera, *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*, no modifican las condiciones reductoras de la etapa operativa de puesta en marcha.
- La eliminación de DBO_5 y DQO fueron inferiores a 60%. Mientras que, la eliminación de nutrientes, para NT y PT estuvo en el rango de 5 y 65%, en ambos casos. No se obtuvieron variaciones entre las unidades de HSS plantadas con *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*, en las dos estaciones evaluadas. Además, por estación, se identificó solamente un incremento de

20% para DQO y una reducción de 20% para NT, durante la primavera.

- Se estableció una mejor adaptación temprana de *Phragmites australis* respecto a *Schoenoplectus californicus*, durante la fase operativa de puesta en marcha.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por FONDAP 15130015 y el proyecto de Tesis Doctoral CONICYT (Chile) No. AT-24100052. Los autores agradecen a ESSBIO y especialmente a la gestión de Lilian Jara, y a la colaboración de Luis Fierro. Ismael Vera agradece a CONICYT (Chile) por el Programa de Becas Latinoamericanas para Estudios de Doctorado en Chile No. D-57080066.

Referencias

- I. Vera, J. García, K. Sáez, L. Moragas, G. Vidal. "Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities". *Ecol. Eng.* Vol. 37. 2011. pp. 364-371.
- R. Kadlec, S. Wallace. *Treatment Wetlands*. 2nd ed. Ed. CRC Press. Boca Raton. Florida. USA. 2009. pp. 1016.
- J. García, A. Corzo. *Depuración con Humedales artificiales: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Guía Digital. Universidad Politécnica de Catalunya. Catalunya, España. 2008. pp 108.
- C. Plaza, I. Vera, M. Salvato, M. Borin, G. Vidal. "Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales". *Tecn. Agua*. Vol. 330. 2011. pp. 40-49.
- J. García, P. Aguirre, R. Mujeriego, Y. Huang, L. Ortiz, J. Bayona. "Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater". *Water Res.* Vol. 38. 2004. pp. 1669-1678.
- J. García, P. Aguirre, J. Barragan, R. Mujeriego, V. Matamoros, J. Bayona. "Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands". *Ecol. Eng.* Vol. 25. 2005. pp. 405-418.
- J. García, J. Morató, J. Bayona. "Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construídos". Ed. Ediciones CPET. 2004. pp. 100.
- J. Faulwetter, V. Gagnon, C. Sundberg, F. Chazarenc, M. Burr, J. Brisson, A. Camper, O. Stein. "Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review". *Ecol. Eng.* Vol. 35. 2009. pp. 987-1004.
- J. Vymazal. "Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: Ten case studies from the Czech Republic". *Ecol. Eng.* Vol. 37. 2011. pp. 364-371.
- J. Zuñiga, R. Chamy, M. Schiapacasse, M. Cerda, J. Fuentes. *Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante humedales*. XV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS – Chile. Concepción, Chile. 2003. pp. 1-5.
- O. Stein, P. Hook. "Temperature, Plants, and Oxygen: How Does Season Affect Constructed Wetland Performance?". *J. Environ. Sci. Heal.* Vol. 40. 2005. pp. 1331-1342.
- Water Environment Federation (WEF). *Natural Systems for Wastewater Treatment*. 3rd ed. Ed. IWA Publishing. Alexandria, Virginia, USA. 2010. pp. 506.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Pollution Control Federation (WPCF). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 16th ed. Ed. APHA. Washington DC, USA. 1985. pp. 1325.
- T. Perbangkhem, C. Polprasert. "Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater". *Bioresource Technol.* Vol. 101. 2010. pp. 833-835.
- H. Marecos, A. Albuquerque. "Analysis of constructed wetland performance for irrigation reuse". *Water Sci Technol.* Vol. 61. 2010. pp. 1699-1705.
- J. Vymazal, L. Kröpfelová. "Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow". B. Alloway, J. Trevors (editors). 1st ed. Ed. Springer. Dordrecht, Netherlands. 2008. pp. 566.
- M. Henze, P. Harremoës, J. LaCour, E. Arvin. "Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes". 3rd ed. Ed. Springer. Heidelberg, Germany. 2002. pp. 430.
- C. Tanner. "Plant as ecosystem engineers in subsurface-flow treatment wetlands". *Water Sci Technol.* Vol. 44. 2001. pp 9-18.