

# **Estimación de gases de efecto invernadero en humedales construidos de flujo subsuperficial<sup>1</sup>**

**Assessment of Greenhouse Effect Gases in Sub-Superficial Flow  
Constructed Wetlands<sup>2</sup>**

**Estimativa de gases de efeito estufa em pantanais construídos  
de fluxo subsuperficial<sup>3</sup>**

*Juan Pablo Silva-Vinasco<sup>4</sup>  
Arlyn Valverde-Solís<sup>5</sup>*

---

<sup>1</sup> Fecha de recepción: 1 de enero de 2011. Fecha de aceptación: 5 de marzo de 2011. Este artículo fue desarrollado por el Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico (CINARA), Universidad del Valle, Cali, Colombia.

<sup>2</sup> Submitted on: January 1, 2011. Accepted on: March 5, 2011. This article was developed by The Research and Development Institute on Water Supply, Environmental Protection and Hydric Resource Conservation (CINARA) of the Universidad del Valle, Cali, Colombia.

<sup>3</sup> Data de recepção: 1 de janeiro de 2011. Data de aceitação: 5 de março de 2011. Este artigo foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento em Abastecimento de Água, Saneamento Ambiental e Conservação do Recurso Hídrico (CINARA), Universidad del Valle, Cali, Colômbia.

<sup>4</sup> Ingeniero químico, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Profesor asistente, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Cali, Colombia. Correo electrónico: [juan.silva@correounivalle.edu.co](mailto:juan.silva@correounivalle.edu.co).

<sup>5</sup> Ingeniero ambiental, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia. Investigador Instituto CINARA, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: [arlynvs@gmail.com](mailto:arlynvs@gmail.com).

### Resumen

Los humedales construidos son sistemas atractivos, de bajo costo de operación y mantenimiento, para países en vía de desarrollo, en cuanto a tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, estos al reducir las cargas contaminantes de las aguas residuales, pueden generar metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, llamados gases de efecto invernadero. En este sentido, se compararon dos especies ornamentales y se estimaron las emisiones de metano, dióxido de carbono y óxido nítrico, mediante cámara estática, en tres humedales construidos, a escala real, de los cuales se plantaron uno con *Heliconia psittacorum*, otro con *Phragmites australis* y un tercero sin plantar (control). Cada uno, sometido a una carga hidráulica de  $3,5 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ , equivalente a un tiempo nominal de retención hidráulico de 1,8 días. Además, se realizaron las caracterizaciones fisicoquímicas habituales. La eficiencia se situó entre 66,2% y 87,8% para la DQO, la temperatura tuvo en promedio del 29 y 31 °C y el pH entre 6,3 a 7, en los sistemas plantados y sin plantar. Además, no se encontraron diferencias significativas entre la vegetación estudiada. Por tanto, se concluye que las especies *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis* no afectan la emisión de gases de efecto invernadero en los sistemas estudiados.

### Palabras clave

Construcción de humedales, aguas residuales, gases de invernadero, metano.

### Abstract

In developing countries, constructed wetlands are attractive systems with low operational and maintenance costs in terms of wastewater treatment. However, by reducing the pollution load of wastewater they might contribute to produce some greenhouse gases such as methane, carbon dioxide and nitrous oxide. This research compared two ornamental species and assessed the emissions of these gases through the use of static cameras in three full-scale constructed wetlands of which two were planted: one with *Heliconia psittacorum*, one with *Phragmites australis*, and the third one, which was not planted, was the control wetland. Each one of them received a hydraulic load of  $3.5 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ , which is equivalent to a nominal hydraulic retention time of 1.8 days. In addition, physicochemical characterizations were performed. Efficiency was between 66.2% and 87.8% for COD; on average, the temperature was between 29 and 31 °C, and the pH was between 6.3 and 7, in both planted and unplanted systems. Additionally, no significant differences in the vegetation studied were found. We conclude that the ornamental species used do not affect the emission of greenhouse gases in the systems analyzed.

### Key words

Constructed wetlands, wastewater, Greenhouse gases, methane.

### Resumo

Os pantanais construídos são sistemas atraentes, de baixo custo de operação e manutenção, para países em desenvolvimento, quanto a tratamento das águas residuais. Entretanto, estes ao reduzir as cargas poluidoras das águas residuais, podem gerar metano, dióxido de carbono e óxido nítrico, chamados gases de efeito estufa. Neste sentido, foram comparadas duas espécies ornamentais e estimaram-se as emissões de metano, dióxido de carbono e óxido nítrico, mediante câmara estática, em três pantanais construídos, a escala real, dos quais um foi plantado com *Heliconia psittacorum*, outro com *Phragmites australis* e o terceiro sem plantar (controle). Cada um, foi submetido a uma carga hidráulica de  $3,5 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$ , equivalente a um tempo nominal de retenção hidráulico de 1,8 dias. Além disso, foram realizadas as caracterizações fisicoquímicas habituais. A eficiência ficou entre 66,2% e 87,8% para a DQO, a temperatura média esteve entre 29 e 31 °C e o pH entre 6,3 a 7, em os sistemas plantados e sem plantar. Além disso, não foram encontradas diferenças significativas entre a vegetação estudada. Por tanto, conclui-se que as espécies *Heliconia psittacorum* e *Phragmites australis* não afetam a emissão de gases de efeito estufa nos sistemas estudados.

### Palavras chave

Construção de pantanais, águas residuais, gases de efeito estufa, metano.

## Introducción

Las aguas residuales domésticas son líquidos resultantes de las actividades de los hogares de una comunidad, con características específicas que la hacen compleja en composición y biodegradabilidad. En este sentido, los humedales construidos son una alternativa de bajo costo, en operación y mantenimiento para el tratamiento de las aguas residuales, aparte de que son una solución simple y rentable para países en desarrollo (Vymazal, 2009).

En este orden de ideas, en los humedales construidos crecen vegetales y microorganismos adaptados al ambiente natural, asociados a procesos físicos, químicos y biológicos, necesarios para reducir la materia orgánica, nutrientes y contaminantes de las aguas residuales domésticas (Keddy, 2010).

En este sentido, la vegetación plantada (*Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis*) desempeña un papel integral, al transferir oxígeno a la zona radicular y proporcionar un medio para el sustento de los microorganismos responsables del tratamiento biológico, los cuales son generadores de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que aumentan sus concentraciones en la atmósfera y se asocian al calentamiento global (Préndez y Lara-González, 2008). Sus principales consecuencias son la elevación de la temperatura del planeta, que afecta a millones de seres vivos y vuelve a comunidades enteras más vulnerables a diferentes enfermedades (Karki, 2007). Por lo tanto, es necesario estimar la emisión de gases de efecto invernadero en los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal utilizados en el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

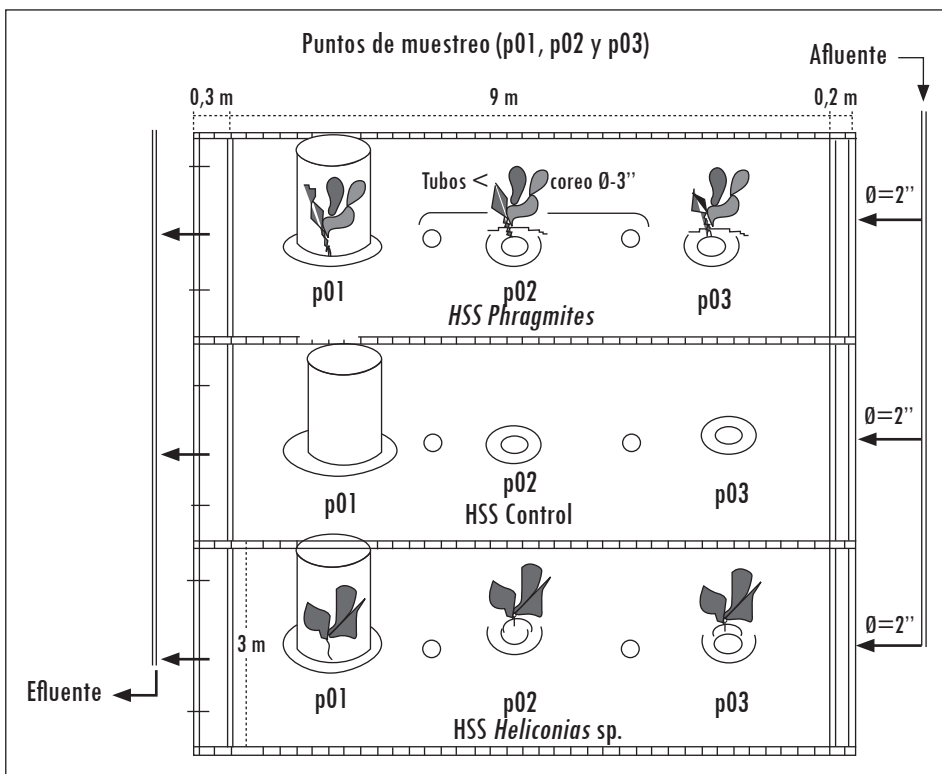
## 1. Metodología

El estudio se realizó en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología en tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de Acuavalle S. A., del municipio de Ginebra, Valle del Cauca (Colombia), a 3°43'50" latitud norte y 76°16'20" latitud oeste, con una temperatura promedio de 23 °C, precipitación media anual de 1.280 mm y altura de 1.040 msnm.

1.1 Unidades experimentales

La unidad experimental fue el módulo de humedales de flujo subsuperficial a escala real conformado por tres unidades: dos fueron plantados, uno con *Heliconia psittacorum*, otro con *Phragmites australis* y un tercero sin plantar (control). El medio de soporte empleado estuvo compuesto por tres capas: una inferior (grava de 3/4”), media (gravilla de 3/8”) y superior (carbonilla), con profundidades de 0,5, 0,05 y 0,05 m, respectivamente. Cada unidad fue dividida en tres zonas o puntos de medición: a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03). Cada punto fue provisto de cuatro plantas de igual altura y tamaño en las unidades plantadas. El sistema se alimenta con agua residual doméstica proveniente de un tratamiento primario (laguna anaerobia). Todas las unidades se sometieron a una carga hidráulica de 3,5 m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>, que equivale a un tiempo nominal de retención hidráulico de 1,8 días. Además, se realizaron caracterizaciones fisicoquímicas de DQO, ORP, pH y temperatura (Figura 1).

Figura 1. Esquema de las unidades experimentales



Fuente: presentación propia de los autores.

### 1.2 Estimación de gases de efecto de invernadero

Para estimar los GEI en los humedales construidos se utilizó la metodología de cámaras estáticas (CE) (Wang et ál. 2008a; Wu et ál., 2009). Con esta se determinó la variación de la concentración de los gases emitidos en cada punto de muestreo. De esta manera, se construyeron tres CE en acrílico de forma cilíndrica (0,40 m de diámetro y 1,7 m de altura). En su interior se ubicó un ventilador a 0,30 m de altura, del medio de soporte y sello hidráulico del humedal. Esto para favorecer la mezcla y homogeneización del gas.

En la parte superior, se instaló un termómetro y una manguera de plástico con una llave de paso de tres vías, que formaron el puerto de medición. Las cámaras se ubicaron de forma vertical y en simultáneo en los puntos (p01) de muestreo de cada unidad experimental. Una vez fijadas, se procedió a las mediciones.

Estas se realizaron del 18 al 25 marzo del 2009, entre las 7 am y 9 pm, bajo características similares de condiciones ambientales. Las muestras se recolectaron en rangos de 0, 30, 60 y 90 minutos por cada punto de muestreo. Esto para permitir la acumulación de los gases en el interior de la cámara y luego extraer manualmente con una jeringa muestras del gas e inyectar a un vial para luego ser analizado (cualificado y cuantificado) por cromatografía de gases —Shimadzu GC-14A, equipado con un detector de captura de electrones (ECD), fase móvil (gas de arrastre) N<sub>2</sub> de alta pureza con flujo de 22 mL/min, temperatura 320 °C y 10 °C de sensibilidad—, en el laboratorio de Isótopos Estables del Centro Internacional de Agricultura Tropical, ubicado en el municipio de Palmira, Valle del Cauca. Esto se repite sucesivamente para los otros puntos de muestreo (Figura 1).

### 1.3 Análisis estadístico

Se aplicó un análisis de varianza (Anova) para determinar la significancia y la eficiencia de los parámetros físico-químicos en la emisión de gases de efecto invernadero. Para esto, la normalidad de los datos fue chequeada utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov. En todos los análisis estadísticos se utilizó el *software* SPSS Versión 17.

## 2. Resultados y discusión

### 2.1 Eficiencia de reducción de parámetros físicoquímicos

#### 2.1.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

La concentración promedio de DQO en el afluente fue de  $208 \pm 16$  mg/L. Sin embargo, los efluentes de los humedales plantados con *Phragmites australis*,

*Heliconia psittacorum*, y sin plantar (control) tuvieron eficiencias de eliminación de la carga afluente del 87,8%, 80,3% y 66,2%, respectivamente. Estos resultados estuvieron acordes con los reportados en la literatura (Gutiérrez, 2009). De este modo, se evidencia el papel determinante de la vegetación en la eliminación de la materia orgánica (DQO), lo cual indica que está asociada a la especie vegetativa, debido a la estimulación de la actividad y densidad microbianas en la zona radicular.

### 2.1.2 Temperatura

La temperatura promedio en las CE fue de 29 y 31 °C para los sistemas sin vegetación y con esta, respectivamente. Tales diferencias no fueron significativas ( $p > 0,05$ ) y pese a que no se encontraron diferencias significativas, estas fueron levemente mayores en los sistemas plantados, probablemente por la translocación y acumulación de gases en el interior de las cámaras, generados en el proceso fotosintético. Situaciones similares son reportadas por (Huang et ál., 2010).

### 2.1.3 Potencial de óxido reducción- $E_b$ (ORP)

De acuerdo con la Tabla 1, el potencial redox ( $E_h$ ) presentó valores promedio en las unidades plantadas con *Heliconia psittacorum*, *Phragmites australis* y sin plantar de -108, -126 y -167 mV. Estos valores indican la prevalencia de condiciones anóxicas en el lecho del humedal construido. Sin embargo, los mayores valores de  $E_h$  en los sistemas plantados evidencian la influencia de la actividad fotosintética de la *Heliconia psittacorum* y *Phragmites australis* en la translocación de oxígeno desde la atmósfera a su sistema de radicular, lo que proporciona ambientes óxicos o microaerófilos en la rizósfera.

Tabla 1. Características generales de las unidades experimentales

DQO	Afluente	Humedal de control	Efluente	
			Humedal heliconia	Humedal phragmites
Promedio	208	70,3	41,0	25
Desviación	16	4,0	3,6	4
Mínimo	191	65,0	34,0	18
Máximo	235	77,0	46,0	30

Continúa

Parámetro	Humedal control	Media $\pm$ SD	
		Humedal heliconia	Humedal phragmites
T. cámara	29 $\pm$	31 $\pm$ 6	31 $\pm$ 6
ORP	-167 $\pm$ 78	-108 $\pm$ 93	-126 $\pm$ 71
pH	Máximo	6,8	6,9
	Mínimo	6,4	6,3

Fuente: presentación propia de los autores.

#### 2.1.4 Potencial de hidrógeno (pH)

Los pH en las unidades plantadas y sin plantar fueron casi neutros, con valores de 6,3 a 7 (Tabla1). Se situaron en rangos óptimos para el crecimiento microbiano (Metcalf y Eddy, 2003). Sin embargo, el cambio de pH puede asociarse a la fotosíntesis de la planta, debido al consumo de CO<sub>2</sub> durante el día, lo que se traduce en aumento del pH en los sistemas sembrados.

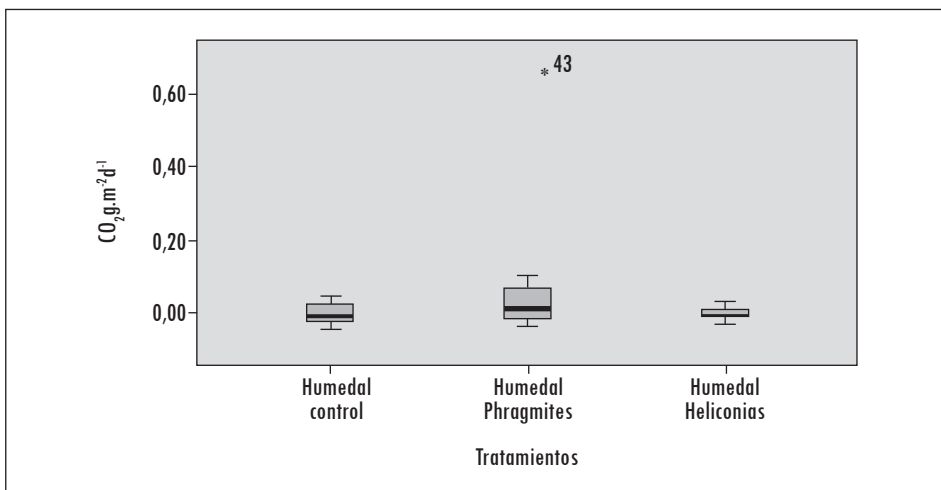
#### 2.2 Estimación y comparación de gases de efecto de invernadero

Se estimaron las emisiones de GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) y se compararon entre los tratamientos plantados (*Heliconia* y *Phragmites*) y sin plantar (control).

##### 2.2.1 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

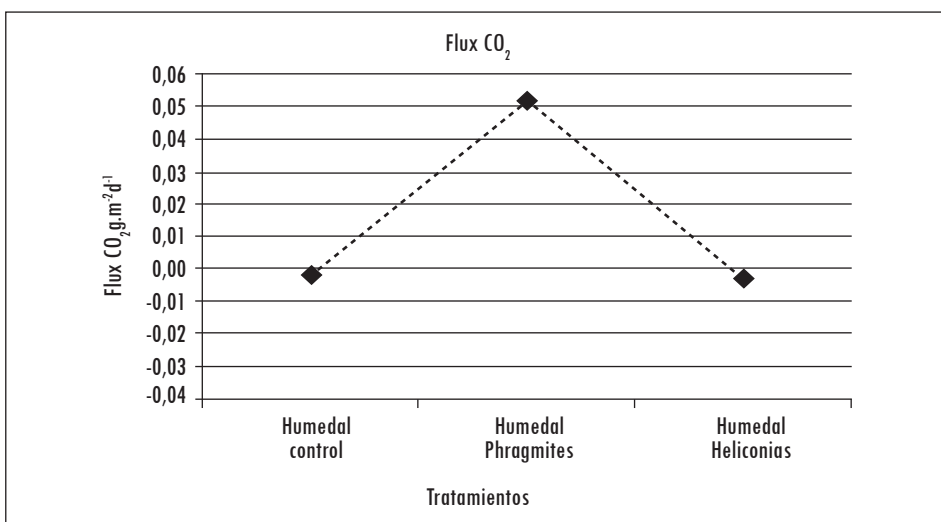
La variación promedio de los flux de dióxido de carbono estimado fue de -0,003 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>, -0,002 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> y 0,052 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> para el humedal *Heliconia*, control y *Phragmites*, respectivamente (figuras 2 y 3). Valores similares fueron encontrados por (Maltais-Landry et ál., 2009b). Se obtuvo un p = 0,137, el cual indica que no existen diferencias estadísticas significativas de los flux obtenidos.

Figura 2. Emisión promedio (flux CO<sub>2</sub> g.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>)



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 3. Comparación (flux CO<sub>2</sub> g.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>)



Fuente: presentación propia de los autores.

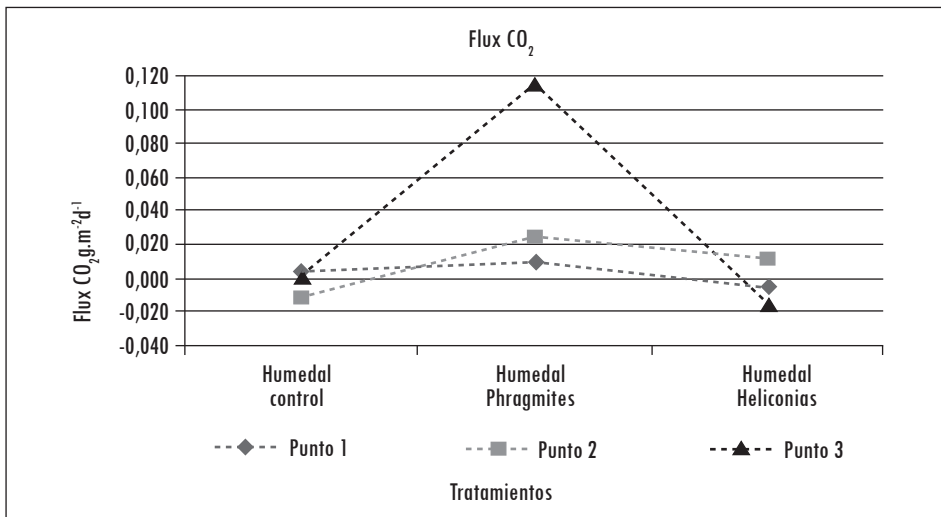
En la Figura 4 se presentan las mediciones de los flux de CO<sub>2</sub> obtenidos en las zonas o puntos de medición, a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03) en cada unidad de tratamiento. En ese orden de ideas, la medición promedio,



para la zona de entrada (p01), fue de 0,004 -0,010, -0,005  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ . En la zona media (p02), de -0,011, -0,024 y 0,012  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ , y en la salida o final (p03), de 0,002, 0,115 y -0,015  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$  para los tratamientos (control, *Phragmites* y *Heliconia*), respectivamente.

Esto indica que la zona de entrada, así como en la media y salida, el humedal plantado con *Phragmites* tuvo tendencia a emitir dióxido de carbono. Igual, al sistema control en los puntos p01 y p03, y punto p02 de los sembrados con *Heliconias*. Sin embargo, en la zona media del sistema control la tendencia fue de sumidero de  $\text{CO}_2$ , similar al p01 y p03 de los plantados con *Heliconia*. Adicionalmente, el test Anova indicó que no existen diferencias significativas ( $p = 0,755$ ) entre las zonas de medición en una misma unidad de tratamiento. Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron reportados por (Teiter y Mander, 2005; Maltais-Landry et ál., 2009b).

Figura 4. Comparación tabla flux  $\text{CO}_2$  entre zonas (UE)



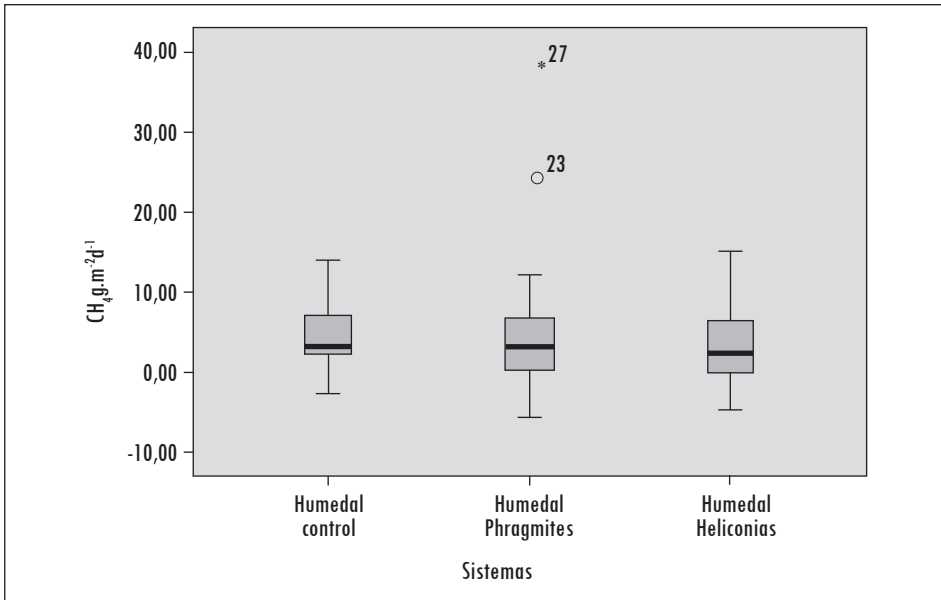
Fuente: presentación propia de los autores.

### 2.2.3 Metano ( $\text{CH}_4$ )

De igual manera, las emisiones de metano se estimaron y compararon. En la Figura 5 se observa el diagrama de caja con los resultados. En la Figura 6 se comparan los flux estimados. El valor promedio de los flux de metano fue de 5  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{CH}_4$ , 6,1  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{CH}_4$  y 3,3  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  de  $\text{CH}_4$  para el humedal control,

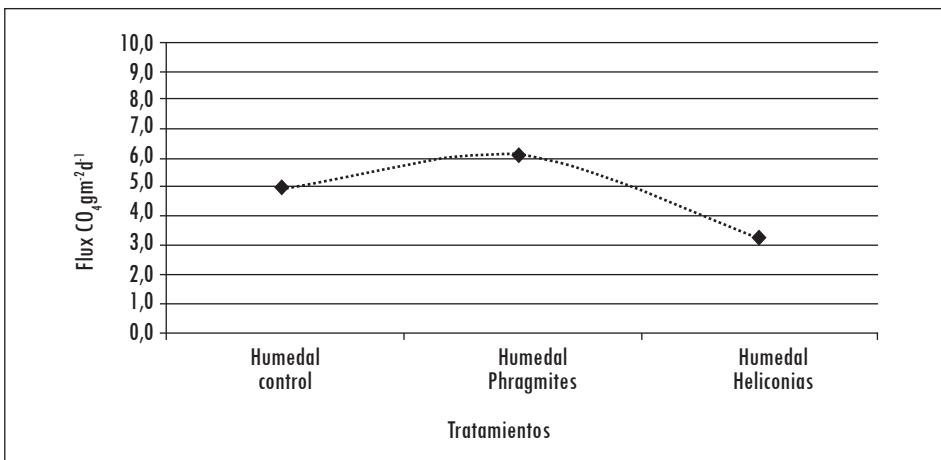
*Phragmites* y *Heliconia* respectivamente. Valores similares fueron encontrados por (Cheng et ál., 2007). En adición, se evaluó la significancia de estos y se obtuvo un  $p = 0,645$  el cual no representa diferencias estadísticamente significativas.

Figura 5. Emisión promedio del flux  $CH_4$   $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$



Fuente: presentación propia de los autores.

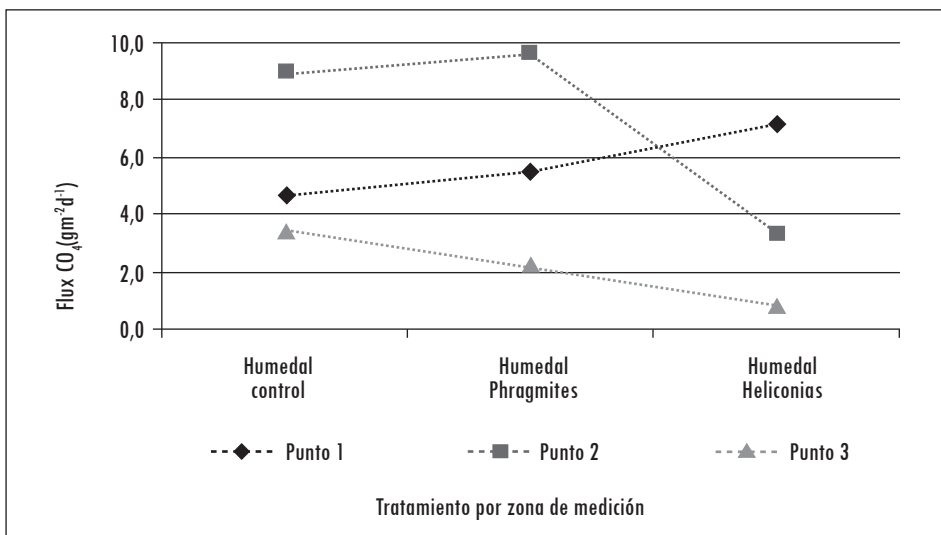
Figura 6. Comparación del flux  $CH_4$  en humedales



Fuente: presentación propia de los autores.

Por otra parte, en la Figura 7 se presentan las mediciones de los flux de metano obtenidos en cada zona o punto de medición: a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03) de cada unidad de tratamiento. En la zona de entrada (p01) la estimación promedio fue de 4,7 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>; 5,5 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>, y 7,2 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>. En la media (p02) fue de 9 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>; 9,7 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> y 3,4 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>. Por último, en la salida (p03) fue de 3,5 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>; 2,2 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub> y 0,8 g.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> de CH<sub>4</sub>, para los tratamientos (control, *Phragmites* y *Heliconia*), respectivamente. Estos resultados indican que los sistemas tuvieron tendencia de fuente emisora de metano. En adición, no existen diferencias significativas entre las zonas de medición en una misma unidad de tratamiento. Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron reportados por (Inamori et ál., 2007; Maltais-Landry et ál., 2009a y Wang et ál., 2008a).

Figura 7. Comparación del flux CH<sub>4</sub> entre puntos



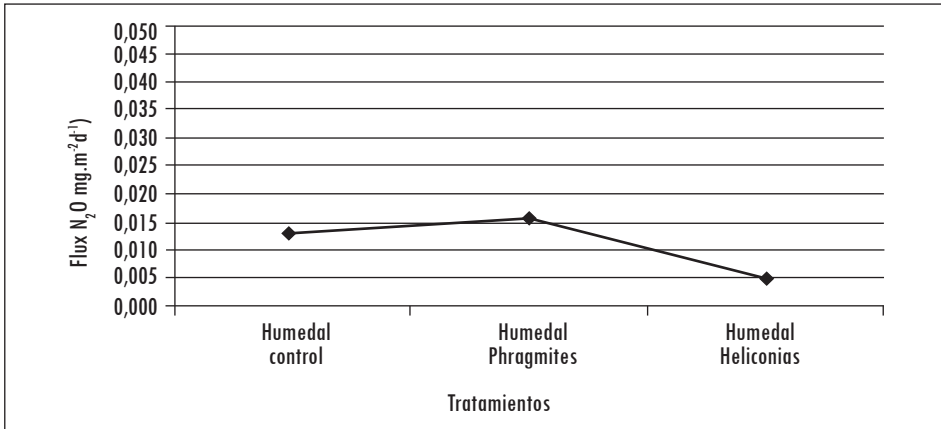
Fuente: presentación propia de los autores.

#### 2.2.4 Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

En la Figura 8 se muestran las mediciones de óxido nitroso. En la Figura 9 se observa un diagrama de caja con la distribución de los resultados obtenidos. En consecuencia, el valor promedio de los flux de óxido nitroso fue 0,013 mg.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>, 0,016 mg.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> y 0,005 mg.m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> para el humedal control, *Phragmites* y *Heliconia*, respectivamente. Valores similares fueron encontrados por (Inamori et ál., 2007). Además, se obtuvo un p = 0,180, el cual no representa diferencias estadísti-

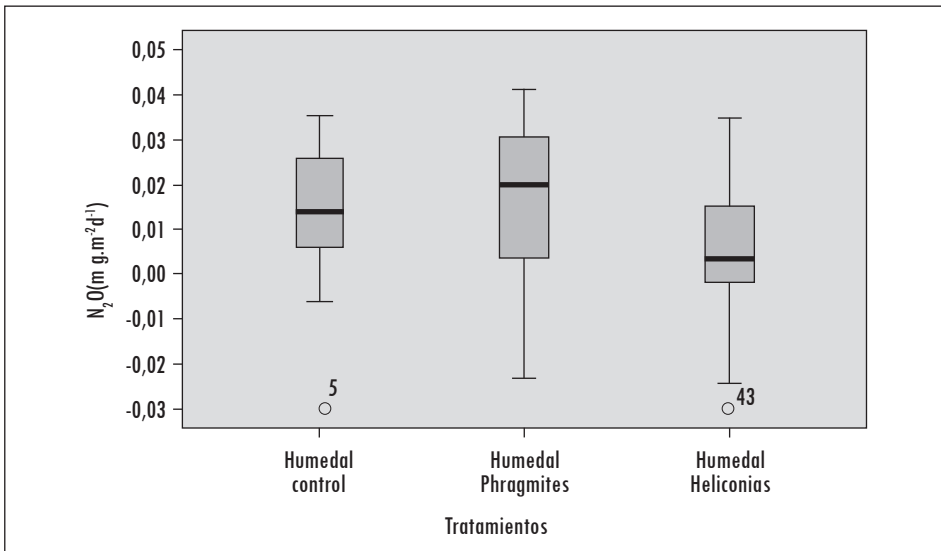
camente significativas de los flux obtenidos. Estas emisiones de óxido nitroso a la atmósfera son muy bajas. Por lo tanto, son consecuentes con los reportes de literatura; sin embargo, algunos autores no detectaron óxido nitroso en humedales construidos (Picek et ál., 2007).

Figura 8. Comparación del flux  $N_2O$  en humedales



Fuente: presentación propia de los autores.

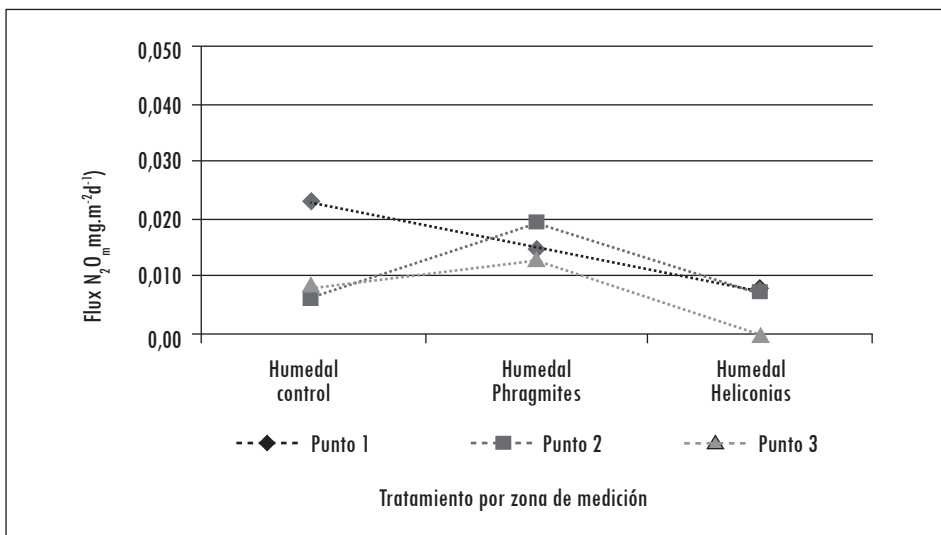
Figura 9. Emisión promedio (flux  $N_2O$   $mg.m^{-2}.d^{-1}$ ) en cada humedal



Fuente: presentación propia de los autores.

De igual manera, en la Figura 10 se presentan las estimaciones de los flux de óxido nitroso obtenidos en las zonas o puntos de medición, a la entrada (p01), media (p02) y salida (p03) de cada unidad de tratamiento. En la zona de entrada (p01) la estimación promedio fue de 0,023 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, 0,015 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> y 0,008 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> de N<sub>2</sub>O. En la media (p02) fue de 0,006 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, 0,019 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> y 0,007 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> de N<sub>2</sub>O. Y en la salida (p03) fue de 0,08 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, 0,013 mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> de N<sub>2</sub>O para los tratamientos (control, *Phragmites*, *Heliconia*), respectivamente. Esto indica que tanto en la zona de entrada como en la salida la tendencia del sistema fue de emisor de óxido nitroso. Adicionalmente, no existen diferencias significativas entre las zonas de medición en una misma unidad de tratamiento. Resultados similares fueron reportados por (Maltais-Landry et ál., 2009b; Wang et ál., 2008b).

Figura 10. Comparación del flux N<sub>2</sub>O entre puntos



Fuente: presentación propia de los autores.

### 3. Conclusiones

No hay diferencias estadísticas significativas en la emisión de GEI entre los puntos o zonas de medición del humedal estudiado. Por tanto, ni la vegetación (*Heliconia psittacorum*, *Phragmites australis*), ni las zonas del humedal afectan la emisión de GEI.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el proyecto SWITCH (Sustainable water Management in the City of the future) de la comunidad económica europea. Agradecimientos también a ACUAVALLE por permitirnos usar sus instalaciones para llevar a cabo esta investigación.

## Referencias

- CHENG, X.; PENG, R.; CHEN, J.; LUO, Y.; ZHANG, Q.; AN, S. y LI, B. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* in experimental mesocosms. *Chemosphere*. 2007, vol. 68, pp. 420-427.
- GUTIÉRREZ, C. F. *Respuesta fisiológica de macrofitas emergentes y su relación con la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas en humedales construidos*. Cali: Universidad del Valle, 2009.
- HUANG, J.; WANG, S.; YAN, L. y ZHONG, Q. Plant photosynthesis and its influence on removal efficiencies in constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 2010, vol. 36, núm. 8, pp. 1037-1043.
- INAMORI, R.; GUI, P.; DASS, P.; MATSUMURA, M.; XU, K. Q.; KONDO, T.; EBIE, Y. y INAMORI, Y. Investigating CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from eco-engineering wastewater treatment processes using constructed wetland microcosms. *Process Biochemistry*. 2007, vol. 42, pp. 363-373.
- KARKI, K. B. Greenhouse gases, global warming and glacier ice melt in Nepal. *Journal of Agriculture and Environment*. 2007, vol. 8, p. 1.
- KEDDY, P. A. *Wetland ecology. Principles and conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- MALTAIS-LANDRY, G.; MARANGER, R. y BRISSON, J. Effect of artificial aeration and macrophyte species on nitrogen cycling and gas flux in constructed wetlands. *Ecological Engineering*. 2009, vol. 35, pp. 221-229.
- MALTAIS-LANDRY, G.; MARANGER, R.; BRISSON, J. y CHAZARENC, F. Greenhouse gas production and efficiency of planted and artificially aerated constructed wetlands. *Environmental Pollution*. 2009, vol. 157, pp. 748-754.
- METCALF Y EDDY, G. T.; BURTON, F. L. y STENSEL, D. *Wastewater engineering treatment*. 4 ed. New York: McGraw Hill, 2003.
- PICEK, T.; COZKOVO, H. y DUSEK, J. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-Plants as important sources of carbon. *Ecological Engineering*. 2007, vol. 31, pp. 98-106.
- PRÉNDEZ, M. y LARA-GONZÁLEZ, S. Application of strategies for sanitation management in wastewater treatment plants in order to control/reduce greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*. 2008, vol. 88, pp. 658-664.

- TEITER, S. y MANDER, L. Emission of N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and CO<sub>2</sub> from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. *Ecological Engineering*. 2005, vol. 25, pp. 528-541.
- VYMAZAL, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*. 2009, vol. 35, pp. 1-17.
- WANG, Y.; INAMORI, R.; KONG, H.; XU, K.; INAMORI, Y.; KONDO, T. y ZHANG, J. Influence of plant species and wastewater strength on constructed wetland methane emissions and associated microbial populations. *Ecological Engineering*. 2008a, vol. 32, pp. 22-29.
- WANG, Y.; INAMORI, R.; KONG, H.; XU, K.; INAMORI, Y.; KONDO, T. y ZHANG, J. Nitrous oxide emission from polyculture constructed wetlands: Effect of plant species. *Environmental Pollution*. 2008b, vol. 152, pp. 351-360.
- WU, J.; ZHANG, J.; JIA, W.; XIE, H.; GU, R. R.; LI, C. y GAO, B. Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. *Bioresource Technology*. 2009, vol. 100, pp. 2910-2917.

