



**HUMEDALES CONSTRUIDOS, UNA ALTERNATIVA PARA EL  
SANEAMIENTO Y REÚSO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS EN  
ZONAS RURALES**

CONSTRUCTED WETLANDS, AN ALTERNATIVE FOR SANITATION AND REUSE OF  
DOMESTIC WASTEWATER IN RURAL AREAS

Aldo Antonio Castañeda Villanueva

ORCID: 0000-0002-3818-9342

Departamento de Ingenierías, Centro Universitario de Los Altos, Universidad  
de Guadalajara, acastaneda@cualtos.udg.mx.

Roberta Huerta Orozco

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de  
Guadalajara, robertahuerta7@hotmail.com

**RESUMEN**

Cuantificar la eficiencia en la remoción de contaminantes como la Demanda Química de Oxígeno, la Conductividad Específica, el Nitrógeno total, el Fosforo total y las Grasas y Aceites en sistemas para el tratamiento de aguas residuales domesticas mediante Humedales Construidos (HC) en dos poblaciones rurales en el occidente del país, fue el objetivo principal del presente estudio. La metodología utilizada consistió en el muestreo en varias ocasiones, tanto de las aguas crudas a la entrada como de las aguas tratadas a la salida de dos HC; uno en la población de Martínez Valadez, Jalisco (MV) y el otro en Erongarícuaro, Michoacán (E), las determinaciones de los parámetros evaluados se realizaron en laboratorios del Centro Universitario de Los Altos de la Universidad de Guadalajara, los cuales se contrastaron con la normatividad oficial vigente, así como se determinaron los porcentajes de reducción de cada contaminante estudiado. Los resultados muestran reducciones importantes que van desde el 51% hasta el 97%, a pesar de la falta de mantenimiento en los pre-tratamientos y el exceso de biomasa en las celdas de tratamiento. Comparando los resultados obtenidos con la normatividad oficial vigente en nuestro país, se observa que para MV los parámetros fuera de norma fueron 3, mientras que para E solo un parámetro resulto por encima de lo estipulado



en la normatividad. En síntesis, estos tratamientos son una alternativa viable y sustentable en el saneamiento de aguas residuales de origen doméstico para poblaciones rurales pequeñas y medianas en el centro-occidente del país.

**Palabras clave:** Humedales construidos; Tratamiento de aguas; Poblaciones rurales; Occidente de México.

### ABSTRACT

Quantify the efficiency in the removal of pollutants such as Chemical Oxygen Demand, Specific Conductivity, Total Nitrogen, Total Phosphorus and Fats and Oils in systems for the treatment of domestic wastewater through Wetlands Built in two rural towns in the west of the country, was the main objective of the present study. The methodology used consisted of sampling on several occasions, both the raw water at the entrance and the treated water at the exit of two Constructed Wetlands; one in the population of Martínez Valadez, Jalisco and the other in Erongaricuaro, Michoacán, the determinations of the evaluated faces were carried out in laboratories of the Los Altos University Center of the University of Guadalajara, which were contrasted with the current official regulations, as well as the reduction percentages of each pollutant studied. The results show significant reductions ranging from 51% to 97%, despite the lack of maintenance in the pre-treatments and the excess biomass in the treatment cells. Comparing the results obtained with the official regulations in force in our country, it is observed that for MV the parameters outside the norm were 3, while for E only one parameter was above that stipulated in the regulations. In summary, these treatments are a viable and sustainable alternative in the sanitation of wastewater of domestic origin for small and medium rural populations in the center-western of the country.

**Keywords:** *Built wetlands; Rural populations; Water treatment; Western Mexico.*

Fecha de recepción: 22 junio 2021

Fecha de aceptación: 21 agosto 2021



Fecha de publicación: 1 de mayo 2022

## INTRODUCCIÓN

Los Humedales Construidos (HC) son sistemas naturales utilizados para el tratamiento de aguas residuales de origen principalmente doméstico, están formados por lagunas o canales poco profundos, normalmente de menos de un metro de profundidad, con especies de plantas propias de zonas húmedas (plantas acuáticas y/o macrófitas), donde los procesos de tratamiento de las aguas se realizan mediante acciones físicas, químicas y biológicas (figura 1), estos sistemas también se utilizan para el rescate de suelos contaminados.

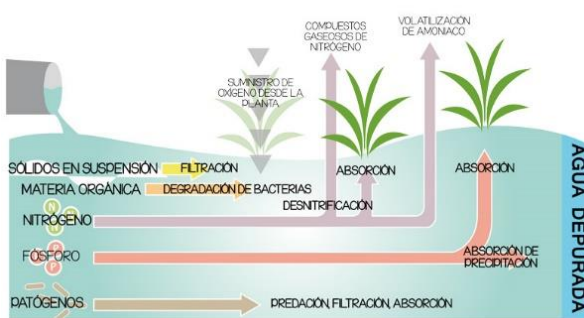


Figura 1. Proceso de tratamiento de aguas mediante Humedales Construidos. Fuente: Fitofilter, 2020.

Tradicionalmente los HC se clasifican según la forma en que el agua fluye por el sistema, así se tienen:

1) Los de flujo libre o superficial, donde el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las plantas. Este tipo de HC una adaptación de las lagunas de oxidación convencionales, las cuales tienen poca profundidad, máximo 50 cm y con plantas acuáticas y de raíz.

2) Los de flujo sub-superficial, en los cuales la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular, con aproximadamente 60 cm de profundidad del agua. El agua tiene contacto y fluye través del sustrato y las raíces de las plantas macrófitas (Figura 2). Este tipo de humedales es básicamente una variación de los sistemas tradicionales de infiltración en los suelos, conocidos comúnmente como filtros verdes y/o sistemas de percolación (Castañeda y col., 2018).

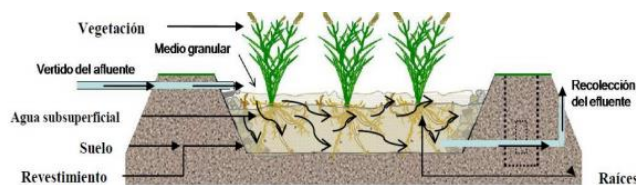


Figura 2. Humedal Construido de flujo sub-superficial. Fuente: García y Corzo, 2008.

Así mismo, los HC sub-superficiales,



pueden operar según el sentido de circulación del agua; es decir en forma horizontal, vertical o mixto (García, 2003). Algunas ventajas de los HC de flujo sub-superficial en referencia a los de flujo libre pueden ser:

a) Menor intensidad de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo.

b) Bajo riesgo de exposición directa de las personas y animales.

c) Bajo nivel en el desarrollo de insectos y plagas.

d) Alta protección térmica ocasionada la bio-acumulación de restos vegetales, lo cual es de gran valor en lugares fríos; un HC sin plantas ni restos vegetales tiene en promedio un gradiente térmico en verano de hasta 12 °C/m, mientras que en un HC con plantas (1800 g/m<sup>2</sup> de biomasa aérea expresada en peso seco) y restos vegetales (310 g/m<sup>2</sup>), en promedio es de 3.4 °C/m (García y col., 2003).

e) Menor área para el tratamiento, así como de tiempos de retención del agua.

Sin embargo, algunas desventajas son:

1) Mayor costo de instalación, hasta un 50 % mayor debido principalmente a: sustrato, tuberías y trasplante de especímenes.

2) Menor valor como ecosistemas para la vida salvaje debido a que el agua es difícilmente accesible a la fauna.

Como otros sistemas naturales de

saneamiento, los HC presentan ventajas frente a los sistemas convencionales de tratamiento algunas son:

-Simplicidad en la operación: Requieren poca mano de obra no especializada y pocos equipos electromecánicos.

-Consumo energético mínimo o nulo: En general limitado al pretratamiento o al mantenimiento del sistema.

-Baja producción de residuos durante la operación del sistema: los residuos y lodos se suelen limitar a los generados por el pretratamiento y el tratamiento primario.

-Versatilidad en la operación del sistema de tratamiento: Son sistemas con tiempos de permanencia hidráulicos muy altos con lo que variaciones puntuales de caudal o carga contaminante afectan poco al nivel de depuración.

-Bajo impacto ambiental sonoro y buena integración en el medio ambiente natural (García y col., 2004).

Así mismo, los principales inconvenientes frente a los sistemas convencionales son:

-Requieren superficies mucho mayores.

-Costo de instalación puede ser similar o mayor si se debe adquirir el terreno donde se realiza la obra.

-Periodo de estabilización prolongado: desde algunos meses o un año en sistemas con flujo sub-superficial hasta varios años en sistemas con flujo superficial (Kadlec y col., 2000).



-Los de flujo sub-superficial son muy susceptibles a la colmatación del medio granular si el agua tiene un contenido elevado en determinados contaminantes, como por ejemplo las grasas y los aceites. En esta oportunidad se evaluaron dos estudios de caso, los HC de las poblaciones de Martínez Valadez (MV), la cual se localiza en el municipio Arandas del estado de Jalisco, según las coordenadas: 20° 50' 2.33" latitud Norte (N) y longitud 102° 18' 4.95" Oeste (O), a 1,875 metros sobre el nivel del mar (msnm), cuenta con 536 habitantes, la temperatura media anual es 17.3 °C, con una máxima de 21.2 °C y mínima de 14.0 °C, la precipitación pluvial anual es de 1,096 milímetros (mm), y el de Erongarícuaro, que es un poblado de la región del Lago de Pátzcuaro en Michoacán, cabecera del municipio homónimo, se localiza en las coordenadas 19° 35' 17.71" de latitud N y 101°43' 12.3" de longitud O, a una altura de 2,071 msnm. Su población en el 2020 fue de 2,721 habitantes (INEGI, 2021), su clima es templado con una precipitación pluvial anual de 1,040.8 mm y temperaturas que oscilan de 6.1 a 24.1 °C.

El objetivo del presente trabajo consistió en cuantificar la eficiencia en la remoción de la carga contaminante del agua residual generada en estas dos

comunidades rurales MV y E, mediante sus correspondientes sistemas de tratamiento a base de HC, verificando las condiciones operativas de estos, como posible alternativa de solución para la problemática de contaminación local de cuerpos de agua en el área rural en el occidente del país.

### **METODOLOGÍA**

En México, para medir el grado de contaminación de las aguas residuales se utilizan varios parámetros expresados en la normatividad oficial vigente contenidas principalmente en las normas oficiales mexicanas; NOM-001-SEMARNAT-1996 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales), NOM-002-SEMARNAT-1996 (Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal), NOM-003-SEMARNAT-1997 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público) y NOM-069-ECOL-1994 (que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria de



componentes eléctricos y electrónicos), entre otras.

Las aguas residuales domésticas son aquellas que resultan del uso doméstico o comercial del agua potable, otras denominaciones son: aguas servidas, efluentes contaminados, aguas negras o aguas cloacales, en general por haber sido utilizadas en procesos de limpieza, procesamiento de alimentos y demás usos domésticos, estas constituyen en la mayoría de las veces un desecho o residuo, en general contienen gran variedad de componentes que pueden ser perjudiciales tanto para los seres vivos como para el ambiente (Rodríguez y col., 2006).

Los parámetros que se evaluaron en este estudio fueron los siguientes:

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno. DQO se expresa en mg/L O<sub>2</sub> y en su valor numérico incluye a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), cuyo valor regularmente es menor.

**Nitrógeno total (Nt):** Es un indicador utilizado en ingeniería ambiental, refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas (proteínas y

ácidos nucleicos en diversos estados de degradación, urea, aminas, entre otras) y el ion amonio NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. En plantas tratadoras de aguas residuales, se mide el nitrógeno total capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y que posteriormente puede ser desnitrificado a nitrógeno gaseoso. Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales, su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización (enriquecimiento excesivo de nutrientes en un ecosistema acuático). El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas.

**Fosforo total (Pt):** Se encuentra en las aguas naturales y aguas servidas casi exclusivamente en forma de fosfatos, estos se clasifican a su vez en: orto fosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y poli fosfatos) y fosfatos orgánicamente ligados, la determinación del fosfato total incluye dos pasos: el primero consiste en la conversión a ortofosfato disuelto, todas las diferentes formas del fosforo presente incluyendo el fosforo reactivo, el hidrolizable y el orgánico, el segundo paso consiste en la detección del ortofosfato en solución por algún método cuantitativo (por ejemplo colorimetría con longitudes de onda entre 400 y 470 nanómetros). El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida, su exceso en el agua provoca





también eutrofización.

Conductividad Especifica (CE): es la medida de las cargas iónicas, que circulan dentro del agua, esta medida nos ofrece información general de la concentración de sales e iones presentes en el agua. Los iones más habituales hallados en las aguas naturales son: sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro. Sus concentraciones presentan fuertes oscilaciones, desde bajas concentraciones en los ríos de alta montaña, hasta casos de mayor concentración (agua de mar), también es un factor importante para detección de fuentes de contaminación, a la evaluación del comportamiento del agua para riego y a la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno. Las descargas de aguas residuales sin tratamiento a cuerpos de aguas suelen aumentar su conductividad, la unidad básica para medir la CE son los miliSiemens por centímetro (mS/cm) o microSiemens por centímetro ( $\mu$ S/cm).

Grasas y aceites (G/A): son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como de hidrocarburos del petróleo, algunas de sus características más representativas; son baja densidad, poca solubilidad en agua, baja o nula biodegradabilidad, por ello, si no son controladas se acumulan en el agua

formando natas en la superficie del líquido, su efecto en los sistemas de tratamiento de aguas residuales o en las aguas naturales se debe a que interfieren con el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera, no permiten el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del CO<sub>2</sub> del agua hacia la atmósfera; en casos extremos pueden llegar a producir la acidificación del agua junto con bajos niveles de oxígeno disuelto, además de interferir con la penetración de la luz solar. Las principales fuentes aportadoras de grasas y aceites son los usos domésticos, talleres automotrices y de motores de lanchas y barcos, industria del petróleo, rastros, procesadoras de carnes y embutidos e industria cosmética.

La normatividad oficial vigente en México establece, entre otros los siguientes límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales (Cuadro 1).

Cuadro 1. Límites máximos permisibles de algunos contaminantes en aguas residuales y tratadas.

Parámetro (unidad)	NOM-001-SEMARNAT-1996	NOM-003-SEMARNAT-1997	NOM-069-ECOL-1994
G/A (mg/L)	15-25	15	30
Nt (mg/L)	15	----	-----
Pt (mg/L)	5	----	----
DQO	----	----	120



(mg/L)			
CE (mS/cm)	----	----	250

Fuente: Elaboración propia.

En esta oportunidad se evaluaron los HC de: Martínez Valadez en el municipio de Arandas, Jalisco (MV) y el de Erongarícuaro Michoacán (E), ambos sistemas de tratamiento fueron muestreados en dos ocasiones; de enero a abril del 2021, registrando temperatura de operación comprendidas entre una mínima promedio de 10.7 °C y máximas promedio de 22.8 °C. Se tomaron muestras tanto de las aguas a la entrada de cada HC como a la salida, evaluando en el laboratorio los parámetros establecidos anteriormente.

Para cuantificar la eficiencia en la de remoción de contaminantes de cada HC, se estableció un Porcentaje de Reducción de cada parámetro (%R<sub>—</sub>), mediante la interrelación en porcentaje de variación (disminución) entre de los valores del mismo parámetro a la entrada y salida, de cada HC, según la Ecuación (1):

$$\%R_{—} = \frac{(\text{Cont}(i) - \text{Cont}(f))(100)}{\text{Cont}(i)} \quad (1)$$

Dónde: %R<sub>—</sub> = Porcentaje de reducción del parámetro específico del agua

Cont(i) = Contenido inicial (agua cruda)

Cont(f) = Contenido final (agua tratada)

Tanto para la recolección de las muestras de agua, como para las determinaciones analíticas en el laboratorio, se observaron los procedimientos y técnicas contenidas en la normatividad ambiental oficial vigente en México, que contempla las técnicas establecidas por el manual de métodos estándar para análisis de aguas y aguas residuales (APHA, 2017), utilizando los siguientes equipos y técnicas:

- 1) Fotómetro marca HACH modelo DR 2800: es un espectrofotómetro de espectro visible, con un rango de longitud de onda de 340 nm a 900 nm, programado y calibrado según especificaciones del fabricante para: DQO (método 8000, programa 437), Nt (método 10072, programa 394) y Pt (método 8190, programa 536).
- 2) Reactor digital marca HACH modelo DRB200 para digestión de muestras de agua residual (DQO, Pt y Nt).
- 3) Medidor portátil marca HACH modelo SensION+ EC5 para CE (calibración con solución de KCL estándar para 12.88 mS/cm y para 1413 µS/cm).
- 4) Método de extracción Soxhlet, mediante la técnica contenida en la norma mexicana: NMX-AA-005-SCFI-2001, para G/A.





## RESULTADOS

El HC de MV, consta de: Pre-tratamiento (desarenador) en el cual se separan tanto materiales ligeros (grasas, aceites, plásticos, y demás) por flotación, como pesados (metales, arenas, entre otros) por sedimentación, tratamiento conformado por una celda que utiliza tezontle (0.5 a 1 pulgada, con porosidad del 60%) como sustrato y especímenes de carrizo común (*Phragmites Australis*) y jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*), y un pos-tratamiento consistente en una laguna para la estabilización microbiológica.

Figura 3. HC en Martínez Valadez Jal.



Fuente: Google Earth, 2021.

Por su parte el MC de E dispone de: Pre-tratamiento formado por un desarenador gravitacional, una la primera sección del tratamiento que consta de tres celdas con

carrizo común (*Phragmites Australis*), la segunda sección de tratamiento dispone de dos celdas con especímenes de gladiolos (*Gladiolus Communis*) y alcatraz (*Zantedeschia Aethiopica*), y la última sección de tratamiento que consta de dos lagunas de oxidación, todo conectado en serie.

Figura 4. HC en Erongarícuaro Michoacán.



Fuente: Google Earth, 2021.

Ambos HC son de flujo sub-superficial, con geo-membrana en sus celdas de tratamiento.

En la tabla 2 se muestran sus principales características físicas, así como los parámetros de control para el agua cruda y tratada de cada HC.

Tabla 2: Infraestructura y características operativas de los HC de E y MV.

Características	MV	E
Superficie general (m <sup>2</sup> )	2,500	17,500
Profundidad hidráulica efectiva (cm)	65	55



Área efectiva (m <sup>2</sup> )	2,400	13,800
Tipo Humedal/flujo	Sub-superficial/horizontal	Sub-superficial/horizontal
Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	100	700
Sustrato	Tezontle	Grava
Densidad del Humedal (m <sup>2</sup> /hab)	4.48	5.07
Tiempo de retención hidráulica promedio (días)	3-5	2-4

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados promedio de los análisis paramétricos de las aguas tanto a la entrada como a la salida de cada HC, aparecen en la tabla 3.

Tabla 3: Evaluación paramétrica de la operación de HC en Jalisco y Michoacán (2021).

Parámetro	MV		E	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Pt (mg/L)	40.5	<b>10.74</b>	18.07	<b>5.41</b>
Nt (mg/L)	71.3	<b>16.29</b>	67.1	9.15
DQO (mg/L)	942.8	118.7	1,344.1	102.7
CE (µS/cm)	3,212.2	247.05	3,213.2	214.0
G/A (mg/L)	431.0	<b>210.54</b>	523.0	12.2

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4 se muestran las reducciones en porcentaje, de cada parámetro en los humedales estudiados.

Tabla 4: Porcentaje de reducción (%R<sub>u</sub>) de contaminantes en cada HC.

Parámetro (%)	MV	E
%R Pt	73.48	<b>70.06</b>
%R Nt	77.15	86.36
%R DQO	87.41	92.36
%R CE	<b>92.31</b>	93.34
%R G/A	<b>51.15</b>	<b>97.67</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como es posible observar los humedales estudiados presentan disminuciones importantes en los parámetros evaluados (51.15% a 97.67%), lo que concuerda con eficiencias de remoción de contaminantes en otros HC en igualdad de infraestructura y condiciones de operación (Castañeda, 2020).

## DISCUSIÓN

En referencia a los porcentajes de reducción (tabla 4), los cuales están referidos al contenido original del contaminante a la entrada del sistema de tratamiento (HC); por ejemplo, la concentración de Nt en el agua cruda que entra al HC de E fue en promedio de 67.1 mg/L, mientras que a la salida de 9.15 mg/L, por tanto, el porcentaje en que este contaminante se redujo (%R Nt) fue de:  $(67.1-9.15)100/67.1 = 86.36\%$ . En general, para el HC de MV la disminución de contaminantes evaluados fue de entre el 51% al 92%, no obstante, en comparación con las normas oficiales (tabla 1), se observa que los parámetros



de Pt, Nt, y G/A se encuentran por encima de los límites máximos permisibles, en el caso del HC de E, la eficiencia fue mayor, desde un 70% hasta el 97%, y únicamente el Pt supero el límite máximo permisible.

### CONCLUSIONES

En los dos HC estudiados se evidencio tanto exceso de biomasa en las celdas de tratamiento, falta de control biológico, así como ausencia de un adecuado seguimiento de las aguas tratadas, adicionalmente el de MV, presento falta de mantenimiento en el pre-tratamiento el cual durante el periodo de evaluación se encontraba saturado, tanto de sedimentos en el fondo como de material flotante, lo que evidentemente perjudica al flujo como el funcionamiento integral del sistema de tratamiento (%R G/A= 51.15), no obstante, estos sistemas contribuyen en buena medida a la disminución del impacto de las aguas residuales domesticas generadas en sus respectivas poblaciones, sobre los cuerpos de agua y el ambiente.

Sintetizando, sistemas de este tipo son una alternativa viable y sustentable para el control de la contaminación provocada por la descarga de aguas residuales de poblaciones rurales pequeñas y medianas en el centro-occidente del país.

American Public Health Association- APHA- (2017). Standard Methods for examinations of water and wastewater. Washington, USA.

Castañeda, A. (2020). Evaluación de Humedales Construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez). *Revista Latinoamericana de Ambiente y las Ciencias.*, 11, 45-67, BUAP, México.

Castañeda, A., Flores, H. y Sahagún, R. (2018). *Comparación de tres modelos para el diseño de un humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales de poblaciones rurales en Los Altos de Jalisco*, en Las ciencias en los estudios del agua: Viejos desafíos sociales y nuevos retos, 1 edición, Rojas, J., Torres, A. y González, O. (Coords), CUTon, Universidad de Guadalajara, ISBN 97860754732222 .

Fitofilter (2020). en: <https://www.lafitodepuracion.com/nuestra-fitodepuracion/> 2020. España, 2021. [Fecha de consulta: 16-ago-2021].

García, J. y Corzo, A. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. España.

García, J., Aguirre, P., Barragán, J.,

### BIBLIOGRAFÍA



- Mujeriego, R., Matamoros, V. & Bayona, J. M. (2004). Effect of key design parameters on the efficiency of horizontal subsurface flow constructed wetlands: long term performance. *Wat. Res.* submitted.
- García, J., Ojeda, E., Sales, E., Chico, F., Píriz, T., Aguirre, P. & Mujeriego, R. (2003). Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.*, 21, 129-142.
- García, J. (2003). Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands, 1st International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.)*. Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 497-520.
- Google Earth. (2021). En: <https://earth.google.com/web/search>. 2021. [Consultado: 16-ago-2021].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía -INEGI- (2021). Datos abiertos. En: [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos) [Fecha de consulta: 10-jun-2021].
- Kadlec R.H., Knight R.L., Vymazal J., Brix H., Cooper P. & Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp.
- Kadlec R.H. & Knight R.L. (1996). *Treatment Wetlands*". CRC Press, Florida, 893 pp.
- Llagas, W. y Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 85-96.
- Osnaya, M. (2021). Tesis digital UNSIJ. *Universidad de la Sierra Juárez*, en: <http://www.unsij.edu.mx/tesis/digitales/6.%20MARICARMEN%20OSNAYA%20RUIZ.pdf>. [Fecha de consulta: 20-jun-2021].
- Ramírez, M. y Martínez, G. (2006). *La regionalización en Jalisco. Hacia un modelo de integración territorial en busca de la competitividad*, publicado en el Periódico Oficial del estado de Jalisco, el 15 de octubre de 1998. Guadalajara, Jalisco, México.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4 edition. Hoboken, N.J. Wiley,U



## EFFECTO DEL TIPO DE PLASMA EN LA MORFOLOGÍA Y ESTRUCTURA QUÍMICA EN PARTÍCULAS DE PAL

### EFFECT OF PLASMA TYPE ON MORPHOLOGY AND CHEMICAL STRUCTURE IN PAL PARTICLES

Fernando Gabriel Flores Nava<sup>1,2</sup>, Elena Colín Orozco<sup>1\*</sup>, José Cuauhtémoc Palacios  
González<sup>1</sup>, Guillermo Jesús Cruz Cruz<sup>2</sup>, María Guadalupe Olayo González<sup>2</sup>, Rosario  
Ramírez Segundo<sup>1,2</sup>, Maribel González Torres<sup>3</sup>, Lidia María Gómez Jiménez<sup>4</sup>

ORCID: 0000-0002-4269-9601

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Cerro de Coatepec s/n,  
Ciudad Universitaria, Toluca, EdMx, CP 50130.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Carr. México-Toluca, km 36.5, Ocoyoacac, EdMx,  
CP 52750, México.

<sup>3</sup>Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Carretera Tenango-La Marquesa km 22,  
Tianguistenco, EdMx, CP 52650.

<sup>4</sup>Universidad Politécnica de Oztolotepec, Col. Dos Caminos, Villa Cuauhtemoc, Oztolotepec, EdMx,  
CP 52080.

[\\*ecolino@uaemex.mx](mailto:ecolino@uaemex.mx)

## RESUMEN

Se presenta un estudio comparativo de la obtención de partículas de polialilamina (PAL) usando una configuración resistiva (R) contra una resistiva-inductiva (RI) de plasma a 20 W. Las partículas obtenidas mediante el arreglo RI presentaron tendencia esférica con diámetro promedio de 0.75  $\mu\text{m}$  y 40 mg masa obtenida con mayor formación de dobles enlaces por efecto de la posible deshidrogenación de la alilamina. En el arreglo R, las partículas presentaron morfología cuasi-esférica con diámetro promedio de 1.45  $\mu\text{m}$  y 10 mg de masa. Los resultados indican que con el acoplamiento RI se obtiene mayor cantidad de partículas con menor diámetro.

**Palabras clave:** Partículas PAI, Plasma, Inductivo-Resistivo.

## ABSTRACT

A comparative study of a resistive (R) versus a resistive-inductive (RI) configuration of the plasma to obtain polyallylamine (PAL) particles at 20 W is presented. The particles obtained using the RI arrangement presented spherical tendency with average diameter of 0.75  $\mu\text{m}$  and 40 mg mass with a greater formation of double bonds due to the effect of allylamine dehydrogenation. In the R arrangement, the particles presented quasi-spherical



morphologies with average diameter of 1.45  $\mu\text{m}$  and 10 mg mass. The results indicate that with the RI coupling more particles with smaller diameter can be obtained.

**Keys words:** PAL particles, Plasma, Inductive-Resistive.

Fecha de recepción: 30 junio 2021

Fecha de aceptación: 09 septiembre 2021

Fecha de publicación: 1 de mayo de 2022

## INTRODUCCIÓN

Para sintetizar y/o modificar superficies se han implementado diferentes configuraciones con acoplamientos capacitivos con voltaje a RF, inductivos alimentados a radiofrecuencia, resistivos e inductivos o imanes acoplados al cátodo en reactores de plasma con el objetivo de concentrar y distribuir homogéneamente la energía, concentrando la densidad de los electrones alrededor de los electrodos para que impacten al monómero u otras superficies. En este sentido, los arreglos capacitivos e inductivos se acoplan por fuera de la cámara del reactor de síntesis donde la energía es transmitida desde una fuente de alimentación al gas de síntesis. En un arreglo capacitivo se colocan placas paralelas que funcionan como capacitores [5]. Por su parte, el arreglo inductivo básicamente consiste en acoplar una bobina alrededor del reactor, que permite concentrar la energía electromagnética en el centro para ionizar al gas [2]. Mientras que, en un arreglo resistivo, los electrodos están dentro del

reactor y están en contacto directo con el material que se sintetiza [5].

Considerando lo anterior, se han sintetizado películas de PAI mediante arreglos resistivos que de acuerdo a las propiedades estructurales y morfológicas que se obtienen en estos materiales, se han aplicado como biomateriales para tratar lesiones en médula espinal [6]. En el área energética, películas de PAI sintetizadas por plasma se recubrieron con partículas metálicas de rutenio y dióxido de titanio, para uso en celdas solares debido a que se incrementa la absorción electromagnética [8] al compararse con la PAI sin el recubrimiento.

Por otro lado, con acoplamientos inductivos se han sintetizado películas de polialilamina como recubrimiento superficial sobre partículas de cuarzo. Esto permitió que se dirigieran hacia la remoción de ácido húmico en aguas residuales o en membranas de filtración comercial, mejorando así el porcentaje de





eficiencia de filtración [9,10].

En este sentido, la polimerización de la alilamina por plasma, se lleva a cabo vía radicales libres [11], los cuales, se generan por efecto de la deshidrogenación del monómero debido a las constantes colisiones con las partículas aceleradas que conforman el plasma [6]. Estos radicales se recombinan y neutralizan formado así al polímero. Respecto a lo reportado, mediante la estructura lineal que presenta la alilamina (ver Figura 1), no favorece la formación de partículas solo de películas. Bajo este contexto, se sugiere que una mayor concentración de energía podría favorecer la formación de estructuras tridimensionales con curvaturas, no planas y así formar partículas. Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo consiste en obtener partículas de polialilamina mediante arreglos resistivos y resistivo-inductivos para analizar cuál configuración favorece la obtención de partículas, estructura química, y la cantidad de masa para su posible uso como biomateriales.

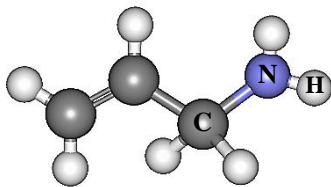


Fig. 1. Estructura química de la alilamina.

## METODOLOGÍA

Se sintetizaron por plasma partículas de PAL empleando descargas de resplandor a radiofrecuencia (RF) de 13.56 MHz a 20 W durante 240 min en un reactor cilíndrico vertical de 9 cm de diámetro. En la Figura 2 se observan los reactores con arreglos resistivo (R) y resistivo-inductivo (RI). La configuración R corresponde a la Figura 2(a), que consiste en un tubo de vidrio pyrex con longitud de 30 cm acoplado un recipiente que contiene la alilamina (Sigma-Aldrich, 99.9%) que por diferencia de presiones entra al reactor en fase gaseosa por la varilla hueca que sostiene al electrodo superior. La distancia entre electrodos fue de 6 cm.

La configuración RI, Fig. 2(b), es similar al arreglo anterior con tubo de 25 cm, en él se acopló una bobina de cobre de cinco vueltas, una de las puntas se conecta al cátodo y la otra esta flotada para concentrar la energía en la parte superior del arreglo resistivo. La distancia entre electrodos fue de 1 cm. La morfología de las partículas se analizó con un microscopio electrónico de barrido modelo Jeol IT100 y la estructura química mediante un espectrofotómetro Thermo Scientific FT-IR iS5.



(a) arreglo R

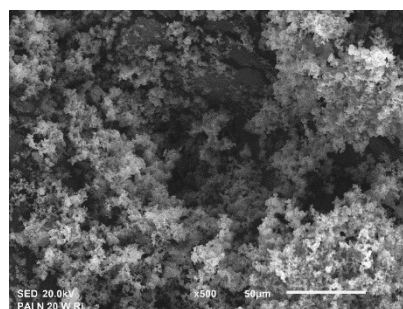
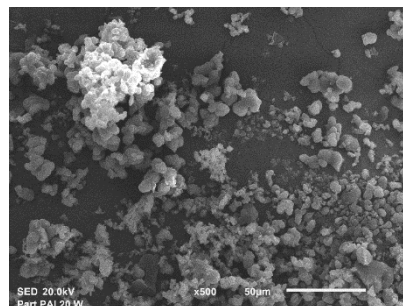
arreglo RI

Fig. 2. Obtención de partículas de PAI por plasma.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra dos micrografías a 500x de las partículas de PAL sintetizadas por plasma a 20 W para los arreglos R y RI. Se observan partículas esféricas y cuasi-esféricas aglomeradas entre sí. La cantidad de masa fue de 10 y 40 mg para los acoplamientos R y RI, respectivamente. Por lo tanto, el arreglo

RI favorece una mayor cantidad de masa, probablemente porque evita que las partículas salgan del reactor hacia la cámara de gases, depositándose en la parte superior del reactor, donde está la bobina, como se observa en la Fig. 2(b).



a) 20 W R

b) 20 W RI

Fig. 3. Morfología de las partículas de PAI mediante los diferentes arreglos del reactor.

La Figura 4 muestra la gráfica de distribución normal de los diámetros de las partículas sintetizadas. El valor máximo para cada distribución representa la media armónica. En el arreglo R, los diámetros están entre 0.5 y 7.54  $\mu\text{m}$  con media en 1.45  $\mu\text{m}$ , mientras que para el arreglo RI se encuentran entre 0.45 y 1.19  $\mu\text{m}$  con media de 0.75  $\mu\text{m}$ . Esta última



configuración presenta una reducción en el diámetro de las partículas. Posiblemente por la reducción de la distancia entre los electrodos, concentrando así la energía e incrementando la densidad de electrones para polimerizar la alilamina. Por otro lado, la dispersión de los diámetros de las dos configuraciones del plasma se analizó mediante la anchura a la altura media de la distribución de datos (FWHM). La dispersión del arreglo R fue de  $1.72 \mu\text{m}$ , y la del RI fue menor, de  $0.16 \mu\text{m}$ .

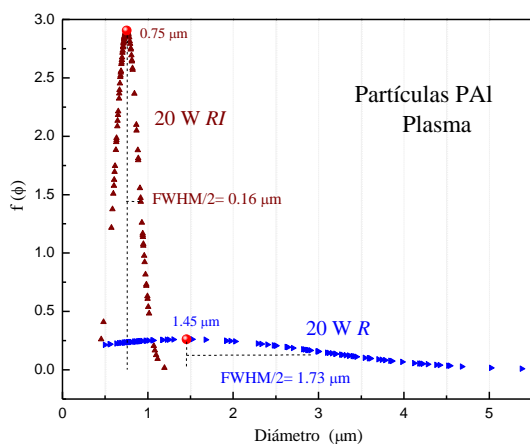


Fig. 4. Diámetro de las partículas de PAL obtenidas por los acoplamientos R y RI del reactor.

La Figura 5 muestra los espectros de IR-ATR de las partículas de PAL, que se comparan con el de alilamina para identificar posibles cambios estructurales derivados de la síntesis. Los grupos químicos asociados a cada absorción infrarroja están etiquetados en la Figura 5. En términos generales, las partículas de

polialilamina conservan los principales grupos químicos del monómero. Sin embargo, los picos localizados en  $933$  y  $915 \text{ cm}^{-1}$  en la alilamina, no se detectan en las partículas. Esto sugiere deshidrogenación de la alilamina durante la síntesis, lo que formaría dobles y triples enlaces en las partículas de PAL. Las partículas con arreglo RI, muestran una intensidad mayor de absorción de dobles enlaces  $\approx\text{C}\approx$  en  $2360 \text{ cm}^{-1}$  comparado con el arreglo resistivo. Esto sugiere que con el arreglo RI hay mayor deshidrogenación y entrecruzamiento. Sin embargo, ambos espectros presentan similar absorción del pico localizado en  $2180 \text{ cm}^{-1}$  asignados a los triples enlaces  $\text{C}\equiv\text{C}$  o  $\text{C}\equiv\text{N}$ .

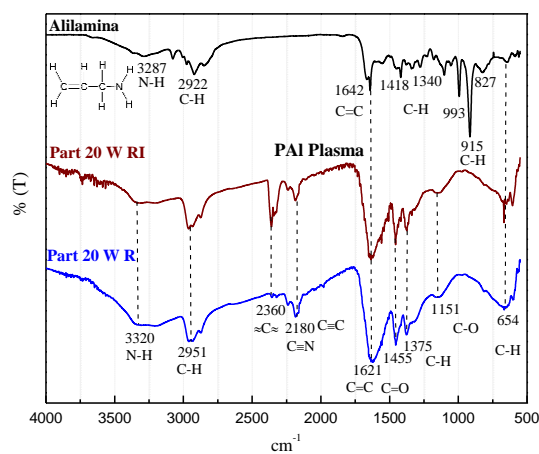


Fig. 5. Espectros IR-ATR de las partículas de PAL mediante arreglos resistivos e inductivos.

## CONCLUSIONES

Se sintetizaron partículas de tamaños micrométricos de PAL mediante dos



configuraciones resistiva y resistiva-inductiva del plasma. El arreglo RI favoreció el crecimiento de partículas esféricas mientras que con el arreglo R fueron cuasi-esféricas. Los diámetros promedio de las partículas fueron de 1.45 y 0.75  $\mu\text{m}$  para el arreglo R y RI, respectivamente. La masa para el arreglo RI aumento 4 veces comparada con el arreglo R que fue solo de 10 mg. Los análisis IR-ATR sugieren mayor deshidrogenación y formación de dobles enlaces mediante el arreglo RI.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACyT por la beca de doctorado otorgada a F.G. Flores-Nava y R. Ramírez.

#### REFERENCIAS

A. Hiratsuka, I. Karube, (2000). "Plasma polymerized films for sensor devices", *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, vol. 12, núm. 9, pp. 695-702.

G. J. Cruz, L. M. Gómez, M. Gonzalez-Torres, F. Gonzalez-Salgado, R. Basurto, E. Colín, J. C. Palacios, M. G. Olayo,(2017). "Polymerization mechanisms in plasma polyallylamine", *Journal of Materials Science*, vol. 52, núm. 2, pp. 1005-1013.

A. Kruth, A. Quade, V. Brüser, K. D.

Weltmann, (2013). "Plasma-enhanced synthesis of poly (allylamine)-encapsulated ruthenium dye-sensitized titania photocatalysts", *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 117, núm. 8, pp. 3804-3811.

K. L. Jarvis, P. Majewski, (2012). "Plasma polymerized allylamine coated quartz particles for humic acid removal", *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 380, núm. 1, pp.150-158.

S. Déon, Z. Koubaa, E. Korzhova, A. Airoudj, P. Fievet, V. Roucoules, (2019). "Understanding the impact of poly (allylamine) plasma grafting on the filtration performances of a commercial polymeric membrane" *Separation and Purification Technology*, vol. 212, pp. 30-39.

J. Friedrich, (2011). "Mechanisms of plasma polymerization—reviewed from a chemical point of view", *Plasma Process and Polymers*, vol. 8, núm. 9, pp. 783-802.