

Artículo Original

**HUMEDALES CONSTRUIDOS BIOACTIVADOS CON
MICROORGANISMOS EFICIENTES: UNA VÍA PARA LA GESTIÓN
DE RESIDUALES EN EL MATADERO CHICHÍ PADRÓN**

**BIOACTIVATED CONSTRUCTED WETLANDS WITH EFFICIENT
MICROORGANISMS: A WAY FOR WASTEWATERS MANAGEMENT AT
CHICHÍ PADRÓN SLAUGHTERHOUSE**

Guillermo Esperanza Pérez ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-0899-9678>

Yamell Jiménez Prieto ¹ <https://orcid.org/0000-0003-3237-2100>

María del C. Manrique Rasúa ² <https://orcid.org/0000-0002-1642-9413>

¹ Centro de Estudios de Química Aplicada, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Empresa Cárnica Villa Clara. Carretera Central y Circunvalación, Reparto Riviera, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 22, 2022; Revisado: Marzo 1º, 2022; Aceptado: Abril 4, 2022

RESUMEN

Introducción:

Los humedales construidos son tecnologías "verdes", sencillas, asequibles, y eficientes para el tratamiento de varios tipos de aguas residuales que, comparadas con los sistemas convencionales, ofrecen un enfoque respetuoso con el medio ambiente, tienen bajos costos, y un elevado potencial para ser aplicadas preferentemente en países en vías de desarrollo.

Objetivo:

Evaluar la eficiencia de humedales de flujo subsuperficial horizontal bioactivados con microorganismos eficientes, en la remoción de materia orgánica y otros contaminantes presentes en aguas residuales del matadero Chichí Padrón.

Materiales y Métodos:

Fueron construidos cuatro sistemas de humedales, sembrados con *Cyperus Alternifolius*, utilizando como sustratos combinaciones de suelo pardo, grava de caliza, zeolita, y arena de río. Se empleó un diseño factorial 2³ para evaluar la influencia del tiempo de retención hidráulico, la activación con microorganismos, y el tipo de sustrato sobre la



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Guillermo Esperanza, Email: guillermoep@uclv.edu.cu



eficiencia en la eliminación de los contaminantes.

Resultados y Discusión:

Se caracterizaron los residuales del proceso productivo, estudiándose los valores históricos del último decenio. La eficiencia máxima de remoción se logró en los sistemas S2 bioactivados, para 96 horas, i.e. 96 % para la DQO, 96,4 % para la DBO₅, y 94 % para grasas y aceites. Se obtuvieron además los modelos matemáticos que describen la relación variable entrada-respuesta, con elevados coeficientes de correlación (0,95-0,99).

Conclusiones:

El empleo de humedales de flujo subsuperficial puede considerarse un método eficiente para el tratamiento de aguas residuales generadas en mataderos, lográndose elevados niveles de remoción de sus contaminantes, y efluentes compatibles con las regulaciones ambientales cubanas.

Palabras clave: aguas residuales; DBO₅; DQO; humedales; mataderos; microorganismos eficientes.

ABSTRACT

Introduction:

Constructed wetlands are simple, affordable, and efficient “green” technologies for the treatment of various types of wastewater that, compared to conventional systems, offer an environmentally friendly approach, have low costs, and high potential for application preferably in developing countries.

Objective:

To evaluate the efficiency of horizontal subsurface flow wetlands bioactivated with efficient microorganisms in the removal of organic matter and other contaminants present in wastewater from the Chichí Padrón slaughterhouse.

Materials and Methods:

Four wetland systems were constructed, planted with *Cyperus Alternifolius*, using combinations of brown soil, limestone gravel, zeolite, and river sand as substrates. A 2³ factorial design was used to evaluate the influence of hydraulic retention time, activation with microorganisms, and the type on pollutant removal efficiency.

Results and Discussion:

The waste from the production process were characterized, and the historical values of the last decade were studied. The maximum removal efficiency was achieved in the bioactivated S2 systems, for 96 hours, i.e. 96% for COD, 96.4% for BOD₅, and 94% for fats and oils. Mathematical models describing the variable input-response variable relationship were also obtained, with high correlation coefficients (0.95-0.99).

Conclusions:

The use of subsurface flow wetland systems can be considered an efficient method for the treatment of wastewater generated in slaughterhouses, achieving high levels of pollutant removal and effluents compatible with the Cuban environmental regulations.

Keywords: wastewaters; BOD₅; COD; wetlands; slaughterhouses; efficient microorganisms.

1. INTRODUCCIÓN

Los tratamientos llamados no convencionales, ecológicos, verdes o tecnologías blandas se muestran actualmente como una alternativa viable para la depuración de las aguas residuales, tanto urbanas como industriales; principalmente en países considerados en vías de desarrollo y en sistemas rurales (Nivala y col., 2020, De la Varga y col., 2020). Son sistemas de bajo costo y escasa complejidad tecnológica, no requieren de altos consumos energéticos, alcanzan niveles de eficiencia razonables, además de que para su operación y mantenimiento no necesitan de personal especializado, siendo perfectamente compatibles con el medio ambiente (Abedi y Mojiri, 2019; Zhao y col., 2020).

Un ejemplo de estas tecnologías, cuya aplicación se extiende cada vez más a escala global debido al desarrollo técnico alcanzado y al nivel de resultados científicos logrados sobre el tema, son los humedales artificiales (Ji y col., 2020). Estos métodos basan su operación en los mecanismos propios que usa la naturaleza para la depuración de las aguas residuales, en donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos entre el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, mutuamente influenciados unos con los otros (Biswal y Balasubramanian, 2022; Liao y col., 2020). Ello da lugar a la ocurrencia de procesos de sedimentación, filtración, absorción, biodegradación, fotosíntesis, foto-oxidación, y toma de nutrientes por parte de la vegetación mediante el metabolismo, bajo diversas condiciones de operación (Farraji, 2019).

Estudios publicados sobre experiencias en Latinoamérica, Asia y África demuestran la capacidad de los humedales de flujo sub-superficial horizontal para remover, con una alta eficiencia, y a bajo costo, cantidades significativas de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, bacterias y metales pesados de las aguas residuales, tanto urbanas como industriales (Larriva y González, 2017; Gholipour y col., 2020). La incorporación de biocarbones y microorganismos eficientes eleva la capacidad de remoción de estos sistemas, al magnificar la bioactividad, lo cual es muy bien aceptado desde el punto de vista operacional (Deng y col., 2021; Sanjrani y col., 2020). Sin embargo, para la adaptación de cualquier tecnología a las condiciones climatológicas de un lugar se requiere de investigaciones específicas que conduzcan a la obtención de coeficientes propios para el diseño, o adaptaciones a la metodología de diseño utilizada en lugares en donde estos procesos ya han sido estudiados (Bernardes y col., 2019; Perdana y col., 2020).

La Unidad Empresarial de Base “Matadero Chichí Padrón” ubicada en la ciudad de Santa Clara, en el centro de la isla de Cuba, es una entidad productiva que no posee sistema de tratamiento propio, desechando sus aguas residuales directamente al sistema municipal de alcantarillado, Manrique, (2021). Ello ha estado provocando la contaminación de los suelos y cuerpos hídricos hacia los cuales estas aguas han sido conducidas por años, generando múltiples impactos negativos sobre el medio ambiente. La propuesta novedosa de utilizar un humedal artificial de flujo subsuperficial, bioactivado con microorganismos eficientes (MOE), para la gestión de dichas aguas residuales podría ser una alternativa de tratamiento interesante aplicable a esta industria, además de ser económicamente factible y sostenible desde el punto de vista ambiental. Es por ello que se define como objetivo del presente trabajo evaluar la eficiencia de

humedales de flujo subsuperficial horizontal bioactivados con microorganismos eficientes, en la remoción de materia orgánica y otros contaminantes presentes en aguas residuales del matadero Chichí Padrón.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción de los sistemas experimentales

Para evaluar la efectividad del método de gestión propuesto fueron construidos a escala de laboratorio cuatro sistemas experimentales de humedales de flujo subsuperficial horizontal (ver figura 1), diferenciándose básicamente entre sí en la composición del sustrato (multicapa), y en el empleo (o no) de MOE al inicio de su operación.

Las dimensiones de los prototipos, construidos de polietileno de alta densidad (HDPE, 3 mm de espesor) fueron: 0,45 m de largo, 0,3 m de ancho y 0,25 m de profundidad.

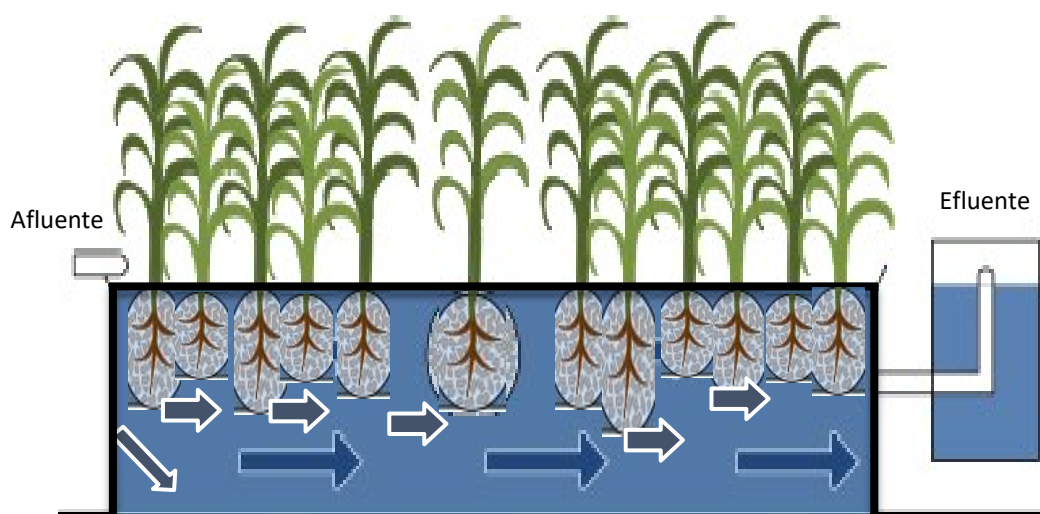


Figura 1. Representación gráfica de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH)

2.1.1 Sustrato

Se decidió utilizar una configuración multicapa del sustrato, a tres niveles, con un incremento de la conductividad hidráulica desde la superficie hasta el fondo, lo cual aumenta significativamente la eficiencia hidráulica del sistema (Deng y col., 2021).

Los prototipos experimentales poseen en la superficie una capa de suelo pardo de 0,05 m de altura, luego una capa intermedia de arena fina de río (0,1 m), extraída de la cantera del Hoyo de Manicaragua, de la provincia Villa Clara, y en el fondo una capa de material grueso (0,1 m de altura), que puede ser indistintamente gravilla de piedra caliza o gravilla de zeolita (figura 2).

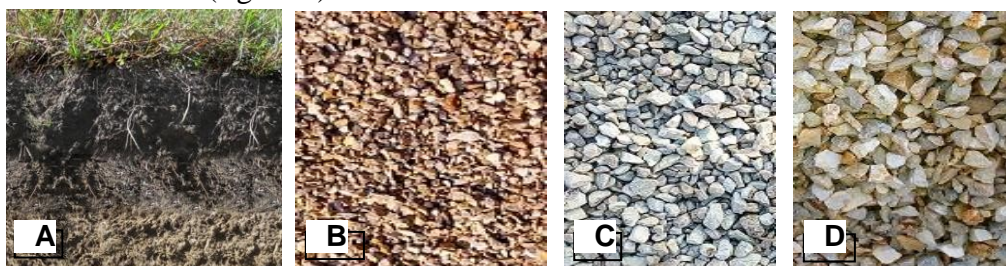


Figura 2. Sustratos usados en los HFSSH a escala de laboratorio.

A: suelo pardo, B: arena fina de río, C: gravilla de zeolita, D: gravilla de roca caliza

Para el estudio del suelo fue seleccionado un perfil representativo ubicado en áreas de influencia antrópica, el subtipo de suelo pardo mullido medianamente lavado, extraído de las cercanías de la entidad, en un área bajo pasto natural (Colás y col., 2020).

2.1.2 Planta emergente

Como elemento vegetal integrante del sistema fue seleccionada la especie *Cyperus Alternifolius*, planta perenne, herbácea, que se desarrolla bien bajo condiciones de estrés, con demostrada resistencia a los excesos de contaminantes, como metales pesados, nutrientes y materia orgánica (Sanjrani y col., 2020). Las plantas para el estudio fueron extraídas de zonas aledañas a la entidad, en una planicie cubierta de pasto verde, en las orillas de un riachuelo. Se escogieron especímenes jóvenes (4-6 meses), con raíces y rizomas en buen estado, realizándose la poda antes de la siembra. Los HFSSF fueron plantados con las mismas, a una densidad poblacional de 12 plantas por metro cuadrado aproximadamente. La etapa de adaptación duró cerca de tres meses.

2.1.3 Microorganismos eficientes y prototipos experimentales

Como elemento bioestimulante de la flora microbiana autóctona existente en los humedales, se propuso utilizar el bioproducto comercial **ME-50**, fabricado por el Grupo Empresarial LABIOFAM. Este bioproducto se presenta como una suspensión acuosa de color café, olor ligero a vino o fermento, y pH ácido (3,2 - 3,8). Es una mezcla de microorganismos autóctonos donde predominan los hongos filamentosos y levaduras, *Lactobacillus*, bacterias fotosintéticas, y actinomicetos. Para los estudios se preparó una solución acuosa de ME-50, 1:10 (v/v), la cual se dosificó gradualmente a razón de un litro por día en cada sistema ya plantado, por espacio de tres días, luego se dejó en reposo una semana, se repite el ciclo de bioactivación, y una vez estabilizados los sistemas, se comienza la alimentación del agua residual (Manrique, 2021).

Los prototipos de HFSSH fueron construidos en febrero del 2020, y colocados en un área cercana al foso colector de aguas residuales de la entidad, estando protegidos de la lluvia, pero expuestos a las variaciones naturales de la temperatura y la radiación solar.

Los experimentos fueron realizados entre los meses de junio y diciembre de 2020, existiendo oscilaciones de la temperatura ambiental entre 18 y 26 °C en el horario nocturno, y entre 25 y 34 °C en horario diurno.

2.1.4. Cuantificación de contaminantes, diseño y análisis estadístico.

Todas las determinaciones analíticas, incluyendo el sistema de muestreo, fueron realizadas por el laboratorio de la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos, ENAST, UEB Villa Clara según los métodos estandarizados de la APHA (Baird y Bridgewater, 2017).

En los ensayos de campo se propuso utilizar un diseño factorial de experimentos 2^3 , siendo definidas como variables de entrada: el tipo de sustrato (**X1**), el tiempo de retención hidráulico: TRH (**X2**), y la bioactivación con microorganismos eficientes tipo ME-50 (**X3**).

El análisis estadístico de los resultados del diseño factorial se realizó usando el paquete de procesamiento *STATISTICA 7*, versión 7.0.61.0, mediante regresión múltiple, proponiendo para la correlación el siguiente modelo lineal general (1):

$$Y = a + b * X1 + c * X2 + d * X3 + e * X1X2 + f * X1X3 + g * X2X3 + h * X1X2X3 \quad (1)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de las aguas residuales

A continuación se indican los valores promedios anuales correspondientes a la DQO y DBO₅, obtenidos a partir de la caracterización química realizada al menos dos veces en el año al agua residual (AR) que emana del proceso industrial del matadero, registrados durante los últimos 10 años, y plasmados en el texto de Manrique (2021). Como se puede observar en la tabla 1, los valores de estos parámetros en esta etapa han estado siempre por encima del valor máximo promedio permisible (LMPP) exigido por la norma cubana para vertimientos: (NC 27, 2012). También se muestra el índice de biodegradabilidad (IB), expresado como la relación entre la DBO₅ y la DQO. Valores de este indicador superiores a 0,4 son idóneos para el empleo de métodos biológicos en su gestión (Zhao y col., 2020).

Tabla 1. Registro histórico de la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), de las aguas residuales del matadero Chichí Padrón (2011-2020)

Parámetro	u/m	Años										NC27
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	*
DQO	mg/L	971	924	997	1008	953	850	810	860	905	894	700
DBO ₅	mg/L	448	480	357	464	357	420	325	430	363	405	300
DBO ₅ /DQO	-	0,46	0,52	0,36	0,46	0,37	0,49	0,40	0,50	0,40	0,45	*

Por otra parte, y como elemento de comprobación, también fue realizada una caracterización química antes del inicio de los estudios experimentales, en mayo de 2020, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Caracterización química del agua residual a la salida del matadero, mayo 2020

Parámetro	Valor promedio	LMPP NC-27	Cumplimiento normativa
DQO (mg/L)	960 ± 52	700	No cumple
DBO ₅ (mg/L)	450 ± 33	300	No cumple
SSt (mg/L)	27 ± 4	10	No cumple
pH	7,2 ± 0.3	6-9	Cumple
Nt (mg/L)	31-69	-	-
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	12-38	-	-
Fósforo total (mg/L)	24-97	-	-
Grasas y Aceites (mg/L)	140 ± 18	50	No cumple
Conductividad (µs/cm)	1400 ± 105	4000	Cumple

Resumiendo puede afirmarse que: los resultados obtenidos en los ensayos analíticos de caracterización, tanto históricos como actuales, muestran que los valores de la DQO, la DBO₅, los sólidos suspendidos, y las grasas y aceites, han superado regularmente los

límites máximos de vertimiento admitidos por la norma cubana NC 27, (2012), razón por la cual queda plenamente justificada la necesidad de llevar a cabo la implementación de un tratamiento de depuración, preferentemente de tipo biológico, para la gestión de dichas aguas residuales.

3.2 Diseño factorial de experimentos

La concepción del diseño tuvo como objetivo principal evaluar, a escala de laboratorio, la influencia de un grupo de parámetros considerados claves en la operación del sistema escogido y en el logro de una elevada eficiencia en la remoción de los contaminantes. Los valores límites de estos parámetros fueron escogidos en el rango mostrado en la tabla 3:

Tabla 3. Valores límites de los parámetros del diseño de experimentos

<i>Variable</i>	<i>Definición</i>	<i>Características o valores</i>	<i>Nivel</i>	<i>Sistema</i>
X1:	sustrato	Sistema híbrido: gravilla de piedra caliza + arena + suelo	-1	S1
X1:	sustrato	Sistema híbrido: gravilla de zeolita + arena + suelo	1	S2
X2:	TRH	2 días (48 horas)	-1	-
X2:	TRH	4 días (96 horas)	1	-
X3:	act. con MOE	no	-1	A
X3:	act. con MOE	si	1	B

Como variables respuestas fueron registrados los valores del por ciento de remoción alcanzado luego del paso del agua residual por el sistema en estudio, en condiciones previamente definidas (X1, X2, X3) a dos niveles, calculado para: DQO, DBO₅, nitrógeno total (*Nt*), fósforo total (*Pt*), grasas y aceites (*Gr* y *Ac*), luego de que el sistema se encuentre operando en condiciones estables.

La organización de los experimentos y los resultados obtenidos muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Matriz del diseño factorial 2³ y resultados para cada corrida.

<i>Exp</i>	<i>X1</i>	<i>X2</i>	<i>X3</i>	<i>DQO</i>	<i>DBO₅</i>	<i>Nt</i>	<i>Pt</i>	<i>Gr y Ac</i>
1	-1	-1	-1	75,58	77,17	23,8	30	33,3
2	1	-1	-1	82,32	84,78	28,57	50	55,55
3	-1	1	-1	88,14	88,9	80,95	50	72,22
4	1	1	-1	91,39	93,04	85,7	70	88
5	-1	-1	1	88,40	87	85,71	60	83,33
6	1	-1	1	91,86	91,74	90,47	70	88,89
7	-1	1	1	90,7	91,74	90,47	70	88,89
8	1	1	1	95,58	96,09	95,24	70	94,4
11	-1	-1	-1	74,11	78,45	27,6	33	35,2
22	1	-1	-1	81,29	85,83	27,85	56	57,3

33	-1	1	-1	89,66	90,11	81,44	48	71,8
44	1	1	-1	92,05	94,75	87,22	74	86,1
55	-1	-1	1	89,3	89,2	84,86	60	83,33
66	1	-1	1	92,15	91,74	90,47	70	88,89
77	-1	1	1	91,1	92,36	92,97	70	88,89
88	1	1	1	96,38	96,75	95,24	70	94,4

3.2.1 Modelación matemática por regresión múltiple

Se obtuvieron cinco modelos matemáticos, uno para cada una de las variables respuestas estudiadas. En todos los casos, las tres variables de entrada fueron significativas y positivas, con elevados coeficientes de correlación para el modelo ajustado (ver tabla 5). De ello se puede inferir que los mismos describen adecuadamente la relación variable entrada-respuesta, en el intervalo definido, y que la perturbación o cambio del valor inicial, provoca siempre un cambio directamente proporcional, positivo, y estadísticamente significativo sobre la respuesta.

Tabla 5. Valores de los coeficientes del modelo ajustado obtenidos por regresión múltiple

<i>Variable</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R² ajustado</i>
DQO	88,126	2,252	3,75	3,81	0,986
DBO ₅	89,353	2,487	3,614	2,724	0,956
Nt	73,035	2,06	15,62	17,644	0,998
Pt	59,438	6,813	5,813	8,063	0,971
Gr y Ac	75,656	6,04	9,932	13,222	0,995

3.2.2. Análisis de los resultados en la remoción de contaminantes

Los valores alcanzados en la eliminación de los contaminantes para diferentes condiciones experimentales demostraron que:

- en el sistema **S1 (A)**, que posee un sustrato híbrido con roca caliza, para TRH entre 48 y 96 horas, se logran por cientos de remoción promedios en el rango: 74-89% para la DQO, 77-90% para la DBO₅, 23,8-81% para nitrógeno, 30-50% para el fósforo, y de 33-72 % para las grasas y aceites.
- en el sistema **S2 (A)**, cuyo sustrato base es gravilla de zeolita, para TRH entre 48 y 96 horas, se logran por cientos de remoción promedio en el siguiente rango: 81-92% para la DQO, 84-94% para la DBO₅, 28,6-85,7% para nitrógeno, 50-70% para el fósforo, y 55,5-88% para las grasas y aceites, valores ligeramente superiores a los primeros.
- La bioactivación de estos sistemas con el bioproducto ME-50 provoca una mejora adicional y significativa en la eficiencia de remoción de todos los contaminantes.
- en el sistema **S1 (B)**, para TRH entre 48 y 96 horas, se logran por cientos de remoción en el rango de 88,4-90,7 % para la DQO, 87-91,7 % para la DBO₅, 85,7-90,5% para nitrógeno, 60-70% para el fósforo, y de 83-89 % para las grasas y aceites.
- finalmente, en el sistema **S2 (B)**, para TRH entre 48 y 96 horas, se logran por cientos de remoción en el rango de 91-96 % para la DQO, 91-96 % para la DBO₅, 90,5-95,2% para nitrógeno, 60-70% para el fósforo, y de 89-94% para las grasas y aceites.

- Estos últimos son los valores máximos de eficiencia logrados, lo cual no significa que sean necesariamente “los valores óptimos” de operación que se recomienden para el sistema de tratamiento.

En la figura 3 se muestra de forma gráfica la variación del por ciento de remoción de la DQO y la DBO₅ para las diferentes condiciones investigadas en el diseño.

Los resultados obtenidos en el trabajo concuerdan con los rangos máximos de eficiencia para la remoción de estos tipos de contaminantes, en sistemas de humedales HFSSH, reportados por otros investigadores (Biswal y Balasubramanian, 2022; Sanjrani y col., 2020).

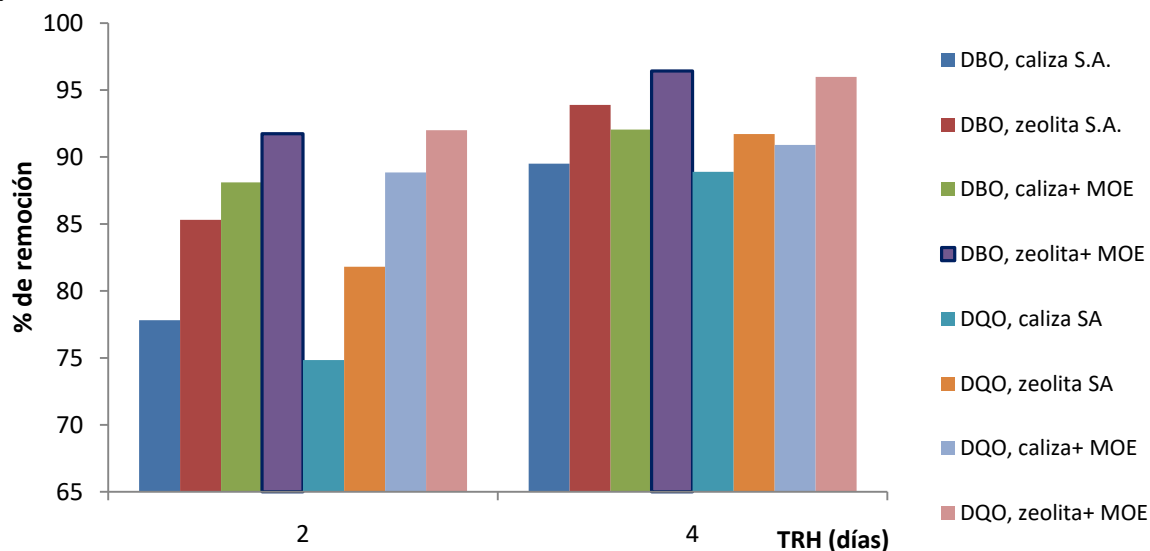


Figura 3. Variación del por ciento de remoción de la DQO y la DBO₅ en HFSSH para TRH de 2 y 4 días, en dos tipos de sustrato, sin activación (SA) y bioactivados (+MOE)

Fue demostrado, para las condiciones objeto de estudio, que la bioactivación de los humedales con MOE, el empleo de sustratos apropiados, y tiempos de retención superiores a las 48 horas, son suficientes para lograr elevados niveles de remoción de la carga orgánica, los nutrientes, y las grasas y aceites, que acompañan a las aguas residuales generadas en el matadero. Por otra parte, el tipo de sustrato es una variable que influye preferentemente en la remoción de sales y sólidos, ya sean suspendidos o sedimentables.

Cabe realizar una mención especial al uso de la macrófita *Cyperus Alternifolius* como elemento vegetal integrante del sistema de tratamiento, cuya influencia respecto a otras especies no fue evaluada en esta ocasión, pero su papel fue esencial en los resultados obtenidos en esta investigación.

4. CONCLUSIONES

1. La bioactivación de los humedales con ME-50 incrementa significativamente la eliminación de la carga orgánica, los nutrientes, y las grasas y aceites contenidos en las aguas residuales del matadero.
2. Los valores máximos de eficiencia en la remoción de contaminantes se logran en los sistemas S2-B bioactivados con ME-50, para tiempos de retención de 96 horas.

3. Los modelos matemáticos obtenidos por regresión múltiple describen adecuadamente la relación variable entrada-variable respuesta.
4. Los resultados alcanzados a escala de laboratorio permiten afirmar que: el empleo de sistemas de humedales tipo HFSSH plantados con *Cyperus Alternifolius*, puede considerarse un método eficiente para el tratamiento de aguas residuales generadas en mataderos, lográndose elevados niveles de remoción de contaminantes, y un efluente compatible con las regulaciones ambientales cubanas.

REFERENCIAS

- Abedi, T., & Mojiri, A., Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment., *Environ. Technol. Innov.*, Vol. 16, 2019, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472>
- Baird, R., & Bridgewater, L., *Standard Methods for the examination of water and wastewater.*, 23rd edition. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017, pp. 4-156. <http://dl.mozh.org/upload/StandardMethods23RD.pdf>
- Bernardes, F.S., Herrera, P.G., Chiquito, G.M., Morales, M.F., Castro, A.P., & Paulo, P.L., Relationship between microbial community and environmental conditions in a constructed wetland system treating greywater., *Ecological Engineering*, Vol. 139, 2019, 10558, ref. 85. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105581>
- Biswal, B.K. & Balasubramanian, R., Constructed wetlands for reclamation and reuse of wastewater and urban stormwater: A review., *Front. Environ. Sci.*, Vol. 10, pp. 1-21, 10:836289. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>
- Colás, A., Chacón, A., & Cairo, P., Caracterización de algunos indicadores morfológicos, físicos y químicos en subtipos de suelos Pardos antropizados en la provincia Villa Clara, *Centro Agrícola*, Vol. 47, No. 3, 2020, pp. 75-79. <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v47n3/0253-5785-cag-47-03-75.pdf>
- De la Varga, D., Oirschot, D.V., Soto, M., Alvarez, J.M, Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrients, in *waste management: concepts, methodologies, Tools, and Applications*, IGI global., 2020, pp. 559–587. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1210-4.ch027>
- Deng, S., Chen, J., & Chang, J., Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits., *J. Clean Prod.* Vol. 293, 2021, 126156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>
- Farraji, H., *Wastewater Treatment by Phytoremediation Methods*, *Wastewater Engineering: Types, Characteristics and Treatment Technologies.*, Chapter 7, 2019, pp. 205-218. <http://www.ijsrpub.com/books.IJSRPUB>
- Gholipour, A., Zahabi, H., & Stefanakis, A.I., A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment., *Chemosphere*, Vol. 247, 2020, 125966. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125966>
- Ji, M., Hu, Z., Hou, C., Liu, H., Ngo, H.H., Guo, W., Lu, S., & Zhang, J., New insights for enhancing the performance of constructed wetlands at low temperatures., *Bioresour. Technol.*, Vol. 301, 2020, 122722. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122722>

- Larriva, J.B., y González, O.A, Cinética de la remoción de DBO₅ en humedales con flujo sub-superficial horizontal, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXVIII, No. 1, 2017, pp. 17-30. <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v38n1/riha02117.pdf>
- Liao, R., Jin, Z., Chen, M., & Li, S., An integrated approach for enhancing the overall performance of constructed wetlands in urban areas., Water Research, Vol. 187, 2020, 116443. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116443>
- Manrique, M.C., Evaluación de humedales de flujo subsuperficial horizontal en el tratamiento de las aguas residuales de la UEB Matadero Chichí Padrón., Tesis presentada en opción al Grado de Máster en Ciencias, Especialidad Seguridad Tecnológica y Ambiental, Centro de Estudios de Química Aplicada, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2021. <https://moodle.uclv.edu.cu/mod/folder/view.php?id=193960>
- Nivala, J., Murphy, C., & Freeman, A., Recent advances in the application, design, and operations & maintenance of aerated treatment wetlands, Water, Vol. 12, 2020, 1188. <https://doi.org/10.3390/w12041188>
- NC 27, Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. especificaciones. Oficina Nacional de Normalización (NC), 2012. <http://ftp.isdi.co.cu/biblioteca/biblioteca%20universitaria%20del%20isdi/coleccion%20digital%20de%20normas%20cubanas/2012/nc%2027%20a2012%2014p%20sky.pdf>
- Perdana, M.C., Hadisusanto, S., & Purnama, L.S., Implementation of a full-scale constructed wetland to treat greywater from tourism in Suluban Uluwatu Beach, Bali, Indonesia., Heliyon, Vol. 6, No. 10, 2020, e05038. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05038>
- Sanjrani, M.A., Zhou, B., Zhao, H., Zheng, Y.P., Wang, Y., Xia, S.B., Treatment of wastewater with constructed wetlands systems and plants used in this technology - a review., Applied Ecology and Environmental Research, Vol. 18, No. 1, 2020, pp. 107-127. http://doi.org/10.15666/aer/1801_107127
- Zhao, Y., Ji, B., Liu, R., Ren, B., & Wei, T., Constructed treatment wetland: Glance of development and future perspectives., Water Cycle, Vol. 1, 2020, pp. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.07.002>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Guillermo Esperanza Pérez. Concepción teórica de la investigación. Guía en la preparación y el desarrollo de los trabajos experimentales. Interpretación y análisis de resultados. Colaboración en la escritura del artículo y en la redacción de las conclusiones.
- M.Sc. Yamell Jiménez Prieto. Participó en la organización y el desarrollo de los estudios experimentales, gestión e interpretación de los resultados analíticos, procesamiento estadístico de la data experimental. Colaboró en la escritura y revisión del artículo.

- M.Sc. María C. Manrique Rasúa. Realizó la búsqueda de la data histórica, análisis del estado del arte del tema, participación activa en la preparación y el desarrollo de los ensayos experimentales, y en el procesamiento de los resultados del diseño factorial. Colaboró con la escritura del artículo.