

# Modelo matemático de un sistema basado en la naturaleza (SBN) por medio de humedales construidos para tratamiento de aguas residuales utilizando plantas endémicas

José Reyes Osorio, Juan Manuel Urrieta Saltijeral, Noemí Méndez de los Santos, Zínath Javier Gerónimo, Adalberto Jiménez Hernández

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Villahermosa

## Resumen

Este artículo considera la utilización de un prototipo de humedal construido para tratar las aguas residuales de una zona de escasos recursos en el estado de Tabasco. Como este humedal de flujo vertical subsuperficial de aguas abiertas tiene un diseño novedoso para mejorar la mezcla, además se realizó un estudio de seguimiento para proponer un modelo matemático que permitirá conocer el comportamiento a través del humedal. Es una primera etapa se realizó el diseño y la configuración, para pasar a la construcción, y finalmente a la plantación. Como introducción al estudio, se brindan detalles del diseño del humedal, junto con la justificación del diseño.

La gran cantidad de datos e información generada permitió elaborar gráficas para cada uno de los parámetros a lo largo del lecho del humedal y mediante un análisis estadístico se determinaron diferentes ecuaciones lineales para predecir la degradación de los contaminantes.

## Abstract

This article considers the use of a prototype wetland built to treat wastewater from a low-income area in the state of Tabasco. As this open water subsurface vertical flow wetland has a novel design to improve mixing, a follow-up study was also carried out to propose a mathematical model that will allow to know the behavior through the wetland. It is a first stage, the design and configuration were carried out, to go on to the construction, and finally to the plantation. As an introduction to the study, details of the wetland design are provided, along with the rationale for the design.

The large amount of data and information generated allowed the elaboration of graphs for each of the parameters along the bed of the wetland and, through a statistical analysis, different linear equations were determined to predict the degradation of pollutants.

**Palabras Clave:** Humedal construido, agua residual, carrizo

**Keywords:** Constructed wetland, wastewater, common reed

## 1. INTRODUCCIÓN

Contar con agua de calidad es una preocupación actual debido a su contaminación por el crecimiento poblacional, uso desmedido del recurso, y falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales que además de que no son tratadas para su reutilización, son vertidas generalmente a cielo abierto, infiltrándose en el subsuelo o descargadas a otros cuerpos de agua como ríos, lagos, lagunas o arroyos. De acuerdo a Conagua (2014), a nivel nacional existen 4,904 plantas de tratamiento, de las cuales, 2287 están instaladas en áreas urbanas y 2617 tratan aguas residuales industriales. Este número de sistemas de tratamiento solo tratan el 50% de las aguas residuales urbanas y 29% de las industriales. Para el caso de comunidades rurales (menor a 2500 habitantes), la instalación de sistemas de tratamiento es menos común, en estas áreas las atenciones prioritarias son aún la distribución de agua y la implementación de alcantarillado.

Los estudios que hoy se realizan para conocer el comportamiento de los humedales construidos se basan en la construcción de plantas piloto las cuales permiten obtener información sobre este tipo de tratamiento, sin embargo, no se ha conseguido conocer completamente el comportamiento de estos sistemas de depuración y aun no se han alcanzado niveles de conocimiento iguales a los del tratamiento de aguas mediante métodos tradicionales.

La consideración del reúso en el proceso de aguas residuales, obliga a tener una operación confiable que cumpla con todos los parámetros y criterios de calidad, establecidos y oficiales, a tener los menores costos de operación y mantenimiento, y a tener programas de mejora continua.

Para conocer la calidad del efluente de un humedal construido, es necesario estudiar los procesos que suceden en su interior, con el fin de disminuir la incertidumbre de éstos, por lo tanto, es indispensable investigar las transformaciones de sustancias. Para esto se han desarrollado varios estudios de modelos basados en los ciclos de transformación de sustancias donde la hidrodinámica del flujo y la ecología del sistema son factores determinantes de los procesos.

La implementación de estos modelos considerando los procesos biológicos, se ha convertido en un instrumento para describir y verificar la generación o asimilación de las diferentes especies químicas y biológicas, que intervienen en el tratamiento biológico de aguas residuales, siendo una herramienta para predecir el comportamiento de los procesos de transformación y eliminación, aplicable al diseño, evaluación y control del tratamiento (Dochain y col., 2003).

Para lo anterior se requiere dentro de otras cosas que las plantas de tratamiento de aguas residuales se diseñen y se construyan con base en información actual, revisada y validada, por lo que la presente investigación mostrara un modelo matemático que ayude a predecir el comportamiento de los procesos de transformación y eliminación de las aguas residuales.

## 2. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos propuestos, se realizó una revisión bibliográfica de conceptos básicos y procesos ocurridos en humedales, con la finalidad de comprender el funcionamiento de estos cuerpos hídricos, así como los diferentes modelos de degradación en los humedales construidos. Luego se realizó la identificación de las funciones, requerimientos y limitaciones de cada uno de los modelos utilizados en el proceso de degradación de los humedales, así como de la formulación matemática, realizar su aplicación, calibración y validación en un humedal construido subsuperficial de flujo vertical en un prototipo para establecer la aplicación del modelo matemático propuesto sobre los parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Temperatura, Sólidos suspendidos, Salinidad, pH del agua residual utilizando el medidor multiparamétrico Hanna 9828 y posteriormente realizar recomendaciones al respecto para futuras investigaciones.

### ETAPA 1 –Diseño y construcción del humedal construido

En el desarrollo y construcción del humedal artificial se utilizó un tanque de color blanco con capacidad de 1,000 litro. En el tanque se plantó carrizo, planta típica de la región. La instalación del tanque será en de acuerdo a las dimensiones de la tabla 1 y figura 1.

Tabla 1. Dimensiones del humedal construido

CARACTERÍSTICAS	HUMEDAL
LARGO (L), M	1.00
ANCHO (A), M	0.90
ALTURA (H), M	0.80
NIVEL SUSTRATO	0.80
PENDIENTE, %*	≤5

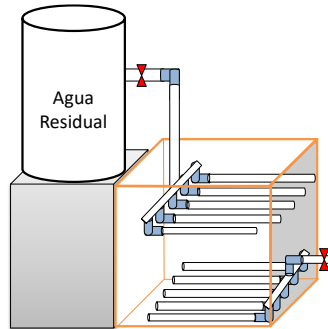


Figura 1. Prototipo de un humedal construido vertical subsuperficial

### ETAPA 2 Plan de muestreo

Para evaluar la eficiencia del humedal construido, se realizaron monitoreos durante un periodo de tiempo. El monitoreo fue realizado durante el mes de agosto de 2022 tomando muestras en un ciclo de 24 horas divididas en cinco periodos correspondientes a un tiempo de residencia hidráulico (TRH). Las muestras se tomaron de acuerdo con la norma mexicana NMX-AA-003-1980 en periodos de cuatro horas hasta completar un ciclo (ver figura 2).



Figura 2. Humedal construido con planta carrizo como soporte

### ETAPA 3 Análisis y determinación de la calidad del agua

El seguimiento del sistema incluyó las siguientes determinaciones en cada punto de muestreo para evaluar la calidad de agua: demanda bioquímica de oxígeno durante 5 días de incubación (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO). También se monitorearon in situ los siguientes parámetros: conductividad eléctrica (CE), pH, oxígeno disuelto (OD) y temperatura con el medidor multiparamétrico Hanna 9828. Se tienen tres puntos de medición, a la entrada del tanque de sedimentación, a la entrada y a la salida del humedal construido.

### ETAPA 4 Análisis de datos y determinación del modelo

El diseño experimental con el que se analizaron los datos tiene ciertas particularidades con respecto a los diseños factoriales y se define como diseño cruzado-anidado; por lo tanto, requieren un planteamiento y

análisis diferente. Los diseños anidados se distinguen porque los niveles de prueba de un factor no son idénticos en todos los niveles del resto de los factores, en contraste con los diseños cruzados donde los factores están completamente cruzados (como su nombre lo indica) ya que aparecen todas las posibles combinaciones de los niveles de cada factor (Gutiérrez y de la Vara 2012). El experimento fue evaluado mediante un diseño anidado o jerárquico con un factor cruzado con la intención de determinar si la concentración de los contaminantes (variable de respuesta) fue diferente con respecto a las etapas de tratamiento y a los tiempos de residencia (factores categóricos). Para realizar el análisis se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVI (StatPoint, Inc.) con un nivel de confianza del 95%.

### 3. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados analíticos de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en el humedal construido, los resultados de las mediciones medias que dan evidencia de la eficacia del prototipo.

La caracterización fisicoquímica del agua residual generada por la población y resultado de cada etapa del tratamiento se utilizó para conocer el comportamiento del sistema de tratamiento, calcular su rendimiento, valorar la capacidad del sistema propuesto como opción en el tratamiento del agua residual proveniente de pequeñas poblaciones.

Los principales factores ambientales que influyen en los mecanismos de remoción de materia orgánica y nitrógeno en humedales artificiales son el pH, el oxígeno disuelto (OD) y la temperatura (Saeed y Sun 2012). Esto sucede debido a que los organismos presentes en el tratamiento biológico son sensibles a estos parámetros. La Tabla 2 y 3 muestra los valores promedio y las desviaciones estándar de las condiciones ambientales a las cuales estuvo sujeto el sistema como la temperatura y la humedad relativa (HR), así como del pH y el OD en los diferentes puntos de muestreo.

**Tabla 2.** Aspectos de las condiciones de la alimentación

Parametros	Entrada Sedimentador M1	Entrada Humedal M2	Salida Humedal M3
Temp. (°C)	23.2 ± 1.9	21.7 ± 1.8	24.6 ± 1.4
HR (%)	49.8 ± 10.5	50.3 ± 9.8	42.9 ± 9.4

**Tabla 3.** Valores promedio (± desviación estándar) del pH, oxígeno disuelto (OD) y conductividad eléctrica (CE) en cada punto de muestreo

Parametros	Entrada Sedimentador M1	Entrada Humedal M2	Salida Humedal M3
pH	6.9 ± 0.2	7.2 ± 0.2	7.2 ± 0.3
OD (mg/L)	0.50 ± 0.04	0.66 ± 0.1	0.85 ± 0.1
CE (dS/m )	1.05 ± 0.1	1.03 ± 0.1	1.03 ± 0.1

La reducción de pH en el punto de muestreo M1 se debe a las condiciones anaerobias que predominan en el fondo del sedimentado ( $p \leq 0.05$ ) (Akunna y col. 1994, López-López y col. 2013). En casi todos los casos, se observa un ligero aumento en el valor del pH que se atribuye a las condiciones facultativas del punto M2 y M3 (Vymazal 2005). Se encontró una correlación lineal entre los valores de pH de la entrada y salida de cada etapa, lo cual indica una dependencia de este parámetro en el efluente.

No se encontraron diferencias significativas entre los resultados con respecto al OD; sin embargo la concentración se comienza a elevar poco a poco debido a esto no se aprecian diferencias significativas entre M1 y M2, pero sí entre M1 y M3 ( $p \leq 0.05$ ).

La conductividad eléctrica (CE) al entrar al humedal no se observa ningún cambio significativo. Este parámetro fue registrado con la intención de tener una idea de la salinidad presente en el agua, ya que este daña las plantas principalmente debido al efecto osmótico alrededor de las raíces, lo cual conduce a una disminución en el suministro de agua y nutrientes que van hacia las células de la planta (Cassaniti y col. 2012). El grado de daño depende de la sensibilidad de la planta, la concentración de sales y del tiempo de exposición de las raíces (Kratsch y col. 2008). *Canna spp.* presenta una tolerancia moderada, por lo que se desarrolla sin síntomas de estrés en una CE entre 4 dS/m y 6 dS/m (Wu y Dodge 2005). Por otra parte, de acuerdo con Grieve y col. 2012 *Strelitzia reginae* está catalogada como una especie muy sensible a la sal, llegando a tolerar una conductividad eléctrica de hasta 2 dS/m, lo anterior sitúa las mediciones obtenidas en un rango aceptable.

El clima cálido y las características del agua residual fomentan la degradación de materia orgánica y nutriente. Durante el experimento la temperatura promedio registrada fue de  $24^{\circ}\text{C} \pm 2.1$ .

La variabilidad de las series de datos recogidas en cada uno de los puntos de muestreo es importante en el caso de estudio. Para la DQO y DBO<sub>5</sub> es elevada a la entrada de la depuradora y se reduce conforme se avanza en el sistema de tratamiento, consiguiéndose una reducción muy importante en los humedales. Ver figura 2a y 2b.

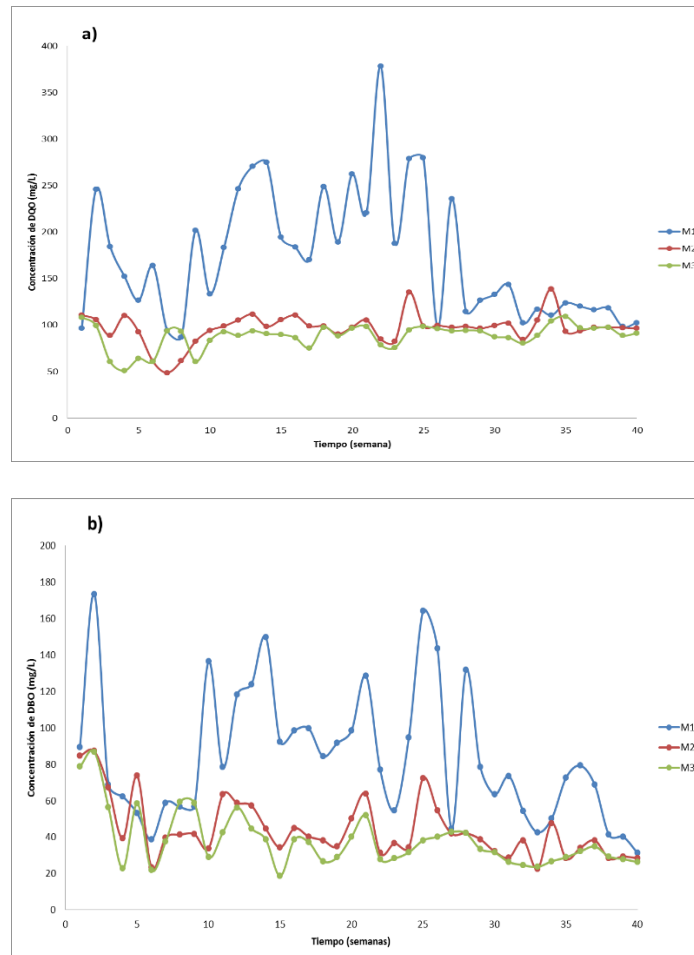


Figura 2. DQO (a) y DBO<sub>5</sub> (b) medidas en cada punto de muestreo del sistema considerado el tiempo de residencia hidráulico

En las Figuras 3 y 4 se muestran las representaciones gráficas del tiempo de retención (abscisas) frente a los datos observados en el punto de muestreo M<sub>2</sub> (ordenadas) para las variables DQO y DBO<sub>5</sub>. Adicionalmente,

en dichas figuras se muestran las ecuaciones de las rectas de regresión representadas, el error R2 del ajuste y la bisectriz que representaría el ajuste perfecto de los datos.

Adicionalmente, se debe mencionar que en las Figuras 3 y 4 se puede observar que para la mayoría de instantes de tiempo en modelo está ajustando lo que ocurre en la realidad, por lo que da seguridad. Aun así estos gráficos reafirman la idea de que los cálculos realizados son mejorables y que la eficiencia de la PTAR cumple con los parámetros permisibles DQO y DBO de acuerdo a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

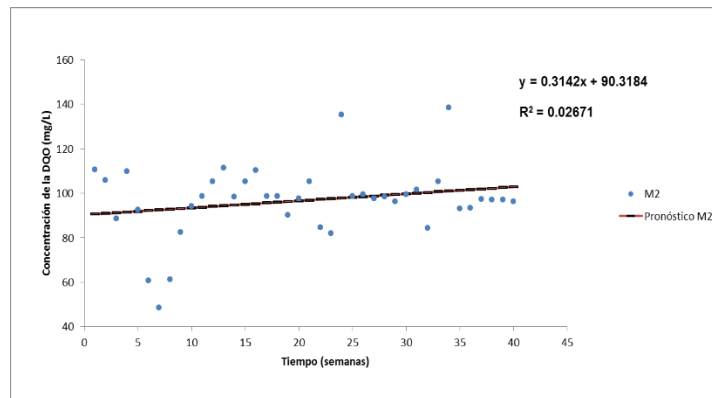


Figura 3. Curva de regresión de la DQO en el punto de muestreo M2.

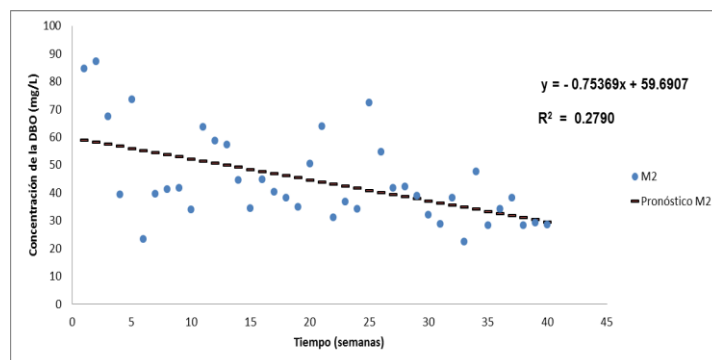


Figura 4. Curva de regresión de la DBO en el punto de muestreo M2

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como se indica en la Tabla 2 y 3, el sistema tiene la capacidad de lograr eficiencias de remoción de la materia orgánica superiores al 80% en todos los casos. El tanque de sedimentación fue el responsable de remover la mayor parte de la DQO alcanzando el valor más alto de eficiencia de remoción con el menor tiempo de residencia hidráulico siendo este del 76.14%, lo cual concuerda con lo encontrado por López-López y col. (2013). Asimismo el valor más alto de remoción de la DBO5 se logró con el tiempo de residencia hidráulico ya definido anteriormente alcanzando el valor de 89.48%. Con esta información el modelo propuesto representa una forma segura de diseño para resultados de DBO y DQO, parámetros importantes para el diseño final de un sistema de tratamiento de aguas residuales.



## REFERENCIAS

- [1] Alexander, M., (ed) (1977). *Advances in microbial ecology*, (Vol. 1). Nueva York: Plenum Press.
- [2] Álvarez, J.A., Ruíz, I., Soto, M. (2008). Anaerobic digesters as a pretreatment for constructed wetlands. *Ecol. Eng.*, 33, 54-67.
- [3] Ángela Andrea Rosero. Propuesta de un modelo matemático para la transformación de nitrógeno y carbono presentes en lagunas facultativas secundarias, utilizadas en el tratamiento de aguas residuales. Trabajo Final de Maestría; Universidad del Valle, Santiago de cali. (2013).
- [4] Ansola, G., González, J.M., Cortijo, R., De Luis, E. (2003). Experimental and full-scale pilot plant constructed wetlands for municipal wastewater treatment. *Ecol. Eng.*, 21, 43-52.
- [5] Ansorena, M.J. (1994). *Sustratos, propiedades y caracterización*. Madrid, España: Mundi Prensa.
- [6] APHA, 1991. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 17th ed. American Publish Health Association, Washington, DC, USA.
- [7] Bautista, F., Delfín H., Palacio, J.L., Delgado, M.C. (eds.) (2004). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Hidalgo, México: Universidad Autónoma de México, Universidad Nacional de Yucatán, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Instituto Nacional de Ecología.
- [8] Centa (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. Capítulo IV. Humedales Artificiales. Instituto del Agua de Andalucía. Sevilla, España.
- [9] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2016. *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. D.F., México.
- [10] Fernández Gonzalvo M. I; *Desarrollo De Un Modelo Matemático Para El Diseño Y La Gestión De Humedales Artificiales Subsuperficiales*. Trabajo Final de Máster. Universitat Politècnica de València, España (2017).
- [11] García, J. y Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos*. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Universidad Politècnica de Cataluña. Barcelona, España.
- [12] UNESCO. (2011). *Recomendación sobre el paisaje urbano histórico, con inclusión de un glosario de definiciones*. Obtenido de Portal Unesco: [http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL\\_ID=48857&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=48857&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html)

Correo de autor de correspondencia: [jose.reyeso@villahermosa.tecnm.mx](mailto:jose.reyeso@villahermosa.tecnm.mx); [jreyeso@itvillahermosa.edu.mx](mailto:jreyeso@itvillahermosa.edu.mx)