

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

EVALUACIÓN SISTEMÁTICA DE LA TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO FISCOQUÍMICO A BASE DE ZEOLITAS DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS POR EL RASTRO TIF DE VILLAHERMOSA TABASCO

Zonia Cárdenas-Garza¹
* José Rocha-Ríos¹

SYSTEMATIC EVALUATION OF THE PHYSICOCHEMICAL TREATMENT TECHNOLOGY BASED ON ZEOLITES FOR THE WASTEWATER GENERATED BY THE FEDERAL INSPECTION TYPE SLAUGHTERHOUSE OF VILLAHERMOSA TABASCO

Recibido el 30 de junio de 2020. Aceptado el 6 de mayo de 2021

Abstract

In Mexico, wastewater treatment projects from municipal slaughterhouses are of great interest, since they allow reusing contaminated water in their own facilities and ensure proper reincorporation into drainage and public sewers, they also contribute to reduce the water footprint of the country. To achieve the success of these projects, it is necessary to evaluate all the available options from a sustainable approach, and thus be able to select the most appropriate technology. This paper presents a systematic evaluation to identify if a physicochemical technology based on zeolites, selected by the builder, is the best option for the wastewater treatment of the new Federal Inspection Type slaughterhouse of Villahermosa Tabasco, or on the contrary, if a biological technology proposed by us would be more adequate. To develop this study the slaughterhouse wastewater characteristics and the applicable normativity were considered, which in this case is the Norma Oficial Mexicana (NOM) from Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), named NOM-002-SEMARNAT-1996, which establishes the maximum permissible limits for pollutants of wastewater discharges to urban or municipal sewer systems. The comparison between both technologies was developed by the application of the methodology described in the book "Selection of technologies for municipal wastewater treatment", from the authors Noyola et al. (2013). Our results indicate that the biological proposal would be more sustainable than the physicochemical option based on zeolites.

Keywords: activated sludge, municipal slaughterhouse, wastewater treatment plant, UASB zeolites.

¹ Centro de Alta Dirección en Ingeniería y Tecnología (CADIT), Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac México Norte, Lomas Anáhuac 52786, Huixquilucan, Estado de México, México.

*Autor correspondiente: Centro de Alta Dirección en Ingeniería y Tecnología (CADIT), Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac México Norte. Av. Universidad Anáhuac 46, Col. Lomas Anáhuac, Huixquilucan, Estado de México, C.P. 52786, México. Email: jose.rocha@anahuac.mx

Resumen

En México, los proyectos de tratamiento de aguas residuales provenientes de rastros municipales son de gran interés, ya que permiten reutilizar el agua contaminada en sus propias instalaciones y garantizar su correcta reincorporación al drenaje y/o alcantarillado público, también contribuyen a reducir la huella hídrica en el país. Para que estos proyectos sean exitosos es necesario evaluar, desde un enfoque sustentable, todas las opciones disponibles, y así seleccionar la tecnología más adecuada. Este trabajo presenta una evaluación sistemática para identificar si una tecnología fisicoquímica a base de zeolitas, seleccionada por el constructor, es la mejor opción para el tratamiento de aguas residuales del nuevo rastro Tipo Inspección Federal (TIF) de la ciudad de Villahermosa Tabasco, o por el contrario, si una tecnología biológica propuesta por nosotros sería más adecuada. Para el desarrollo del estudio se consideraron las características del agua residual del rastro y la normatividad aplicable, que en este caso es la Norma Oficial Mexicana (NOM) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles para contaminantes de las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. La comparación entre ambas tecnologías se desarrolló mediante la aplicación de la metodología descrita en el libro "Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales", de los autores Noyola *et al.* (2013). Nuestros resultados indican que la propuesta biológica sería más sustentable que la opción fisicoquímica basada en zeolitas.

Palabras clave: lodos activados, rastro municipal, planta de tratamiento de aguas residuales, UASB, zeolitas.

Introducción

Un centro de sacrificio (rastro o matadero), es todo aquel establecimiento donde se lleva a cabo el sacrificio y faenado de animales para abasto, la distinción entre rastro o matadero depende del volumen de matanza (NOM-194-SSA1-2004). Los centros de sacrificio pueden ser municipales, privados, y Tipo Inspección Federal (TIF). Los rastros TIF, de acuerdo con el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), a diferencia de los rastros y mataderos municipales, tienen el propósito de obtener productos de óptima calidad higiénico-sanitaria con reconocimiento internacional. Un establecimiento TIF es una instalación de sacrificio de animales de abasto, frigoríficos e industrializadores de productos y subproductos cárnicos que es objeto de inspecciones sanitarias permanentes para verificar que el lugar y los procesos realizados, cumplan con las regulaciones que señala la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), en virtud de la inocuidad de los alimentos (SENASICA, 2015).

Una de las actividades económicas con un alto consumo y contaminación de agua es la industria cárnica, ya que deben cumplirse altos estándares de higiene durante todo el proceso de matanza. De acuerdo con el Directorio Nacional de Centros de Sacrificio de los Estados Unidos Mexicanos (SIAP-SAGARPA), en 2007 existían en México 1151 centros de sacrificio registrados, de los cuales 913 eran municipales, 141 privados y sólo 93 TIF; del total de rastros (1000), solo 25 (2.5%) de ellos contaban con plantas de tratamiento de aguas residuales (López-López *et al.*, 2008).

Las características de las aguas residuales de un rastro dependen generalmente de varios factores, como el tamaño de la instalación, el tipo de animales sacrificados, el tipo de sacrificio involucrado, la cantidad de agua consumida por animal y el lavado de los equipos utilizados (Aziz *et al.*, 2019). El principal contaminante en las aguas residuales de un rastro es su elevada carga orgánica, con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) de 5000 a 10000 mg L⁻¹, por lo que provocan un alto impacto ambiental en cuerpos receptores de agua y en el suelo (López-López *et al.*, 2008). Esta materia orgánica se distribuye en residuos sólidos (pezuñas, vísceras, pelo, estiércol, carne de desecho, grasas, metales pesados, pesticidas, alto contenido de sales, bacterias, virus, compuestos oxidables, etc.), y líquidos (sangre, orina, aceites, agua de lavado con detergentes y desinfectantes) (Kelly, 2002). Entre los principales microorganismos patógenos del agua residual de rastro podemos encontrar bacterias (*Salmonella* spp., *Shigella* spp., *Vibrio cholerae*, etc.), huevos de parásitos y quistes de amibas, los cuales generan diversas enfermedades como fiebre tifoidea, disentería, cólera, hepatitis, entre otras (Veall, 1997; Balladares, 1998; COFEPRIS, 2006).

La descarga de las aguas residuales de rastro tiene graves impactos en el ambiente (Veall, 1997; COFEPRIS, 2006; Vallejo *et al.*, 2019):

- 1) En aguas superficiales propicia el crecimiento excesivo de algas y plantas que consumen el oxígeno disuelto (eutrofización), matando las especies acuáticas, y al mismo tiempo reducen la absorción de luz eliminando también al fitoplancton que no puede realizar la fotosíntesis.
- 2) En sistemas de drenaje incentiva la proliferación de fauna nociva y enfermedades.
- 3) La dispersión en suelos provoca problemas de permeabilidad debido a la acumulación de grasa, afecta el paisaje e incentiva la proliferación de fauna nociva y enfermedades.
- 4) En todos los casos anteriores la generación de gases nocivos para la salud y el entorno.

Se estima que un litro de agua residual proveniente de un rastro equivale a la contaminación aportada por 60 personas (Castañeda y Marco, 2007). Se utilizan aproximadamente de 1,000 a 1,700 litros de agua por res procesada, con un aumento del 25% si se realiza el tratamiento de los productos no comestibles (Veall, 1997). Algunos estudios indican que se desecha del 80-95% del agua utilizada; sin embargo, otros estudios sugieren que el intervalo es del 97%-100% si se incluye el agua contaminada que se evapora y la que se utiliza en la manufactura de subproductos (COFEPRIS, 2006).

El rastro TIF de Villahermosa tendrá una capacidad inicial de sacrificio de 100 reses por turno, con una proyección de crecimiento a futuro de hasta 400 bovinos destazados por turno. Parte del presupuesto para la construcción del rastro será destinado a la construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) (Collado, 2019). La Asociación Ganadera Local de Centro propietaria del rastro, y los encargados de la obra civil, tienen contemplada una tecnología fisicoquímica a base de zeolitas, la cual es

suministrada por la empresa Zeolitas e Insumos Nacionales S.A. de C.V., quienes se dedican a la venta e instalación de sistemas para el tratamiento de aguas negras y residuales a base de zeolitas en sus diversas modalidades, y a la implementación de sistemas de potabilización y purificación de agua (Zeolitas e Insumos Nacionales, 2018). Las aguas residuales del rastro serán descargadas en el alcantarillado municipal, por tal motivo deben cumplir con los requerimientos de la NOM-002-SEMARNAT-1996.

Existen cerca de 40 especies de zeolitas naturales conocidas, sin embargo, tan solo algunas especies son ampliamente utilizadas (Jiexiang y Surent, 1993). En México las zeolitas se utilizan en la industria agropecuaria, ya que pueden añadirse al alimento de animales, como ganado bovino, porcino y aves, mejorando su salud y el rendimiento de sus productos, también se usan para aumentar la eficiencia de los fertilizantes, como sustrato en invernaderos, entre otros usos. Recientemente se han efectuado muchas investigaciones acerca de las zeolitas naturales y sus propiedades como adsorbentes en el tratamiento de aguas residuales, también se han estudiado sus posibles modificaciones, las cuales pueden realizarse mediante varios métodos, como el tratamiento con ácido, el intercambio iónico y la funcionalización de tensoactivos. Las zeolitas modificadas pueden mostrar una alta capacidad de adsorción también para materia orgánica y aniones (Wang y Peng, 2010; Margeta *et al.*, 2013). La zeolita ofrece un efecto de filtrado superior al de la arena o al de los filtros de carbón, resultando en agua más pura con mejor productividad y requiriendo menor mantenimiento. La estructura altamente porosa de las zeolitas puede capturar partículas contaminantes de hasta 4 micras. Las zeolitas presentan carga negativa de forma natural, por lo que pueden adsorber cationes, como metales pesados y amoníaco (Sánchez, 2015). Es importante señalar que el mantenimiento de las zeolitas consiste en un retrolavado que se debe realizar cuando los lodos acumulados en el filtro de zeolitas impidan el flujo del agua. Además, se aconseja realizar la regeneración de las zeolitas cada seis meses con una solución salina (salmuera).

El proceso propuesto por Zeolitas e Insumos Nacionales S.A. de C.V. se presenta en la Figura 1. Este incluye 3 etapas, pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario. Como se observa en la figura, el tratamiento primario incluye coagulación con hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y floculación con sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ para reducir drásticamente la carga orgánica previo al filtro de zeolitas y su posterior desinfección (Zeolitas e Insumos Nacionales, 2018).

De acuerdo con Noyola *et al.* (2013), en la formulación, planeación, selección y diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales se debe considerar la disponibilidad de recursos económicos y técnicos, las características del agua residual a tratar con relación a las variaciones de caudal, tipo y concentración de contaminantes, los criterios establecidos para la descarga del efluente tratado a un cuerpo receptor o bien para su eventual uso. No basta solamente con instalar una PTAR, sino que la tecnología debe ser seleccionada de manera muy cuidadosa, tanto para alcanzar la calidad del agua deseada, como para lograr un impacto favorable en los aspectos económico, ambiental y social, los tres componentes de la sustentabilidad.

DIAGRAMA DE FLUJO

- FLUJO DE AGUAS NEGRAS
- APLICACIÓN DE REACTIVOS
- FLUJO DE AGUA TRATADA
- DESCARGA DE LODOS

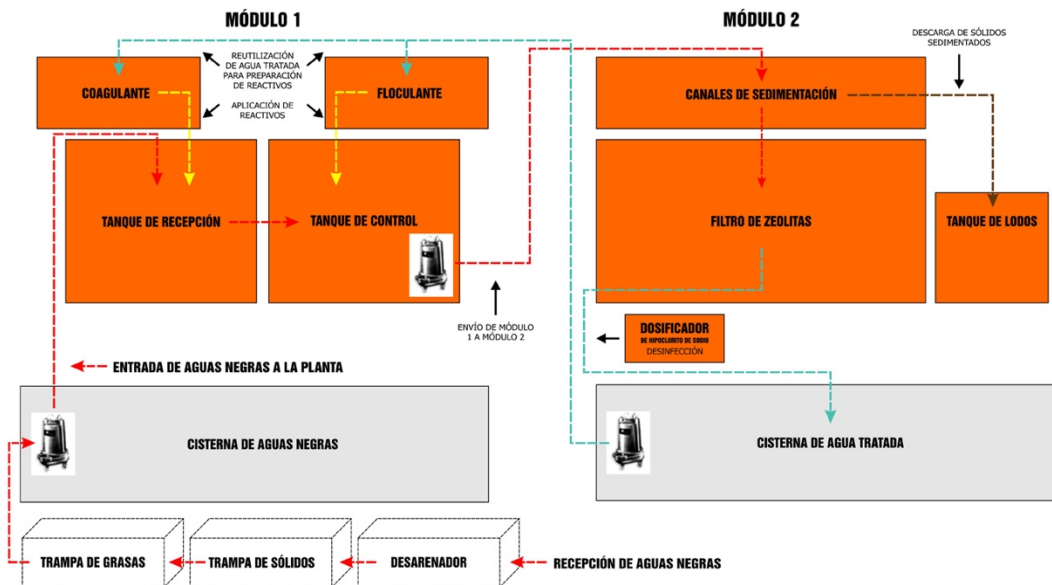


Figura 1. Tren de tratamiento propuesto para el rastro TIF de Villahermosa (Zeolitas e Insumos Nacionales, 2018).

El objetivo del estudio es evaluar sistemáticamente si el proceso fisicoquímico basado en zeolitas, contemplado para el tratamiento de las aguas residuales del rastro TIF de Villahermosa, es la tecnología más sustentable, o si una opción biológica propuesta por los autores sería más adecuada. En ambos casos se consideran las características del agua residual del rastro, así como el cumplimiento de la NOM-002-SEMARNAT-1996. Las herramientas propuestas para comparar y evaluar ambas tecnologías poseen un enfoque sustentable e integral, y están basadas en la metodología descrita por Noyola *et al.* (2013).

Metodología

La Figura 2 esquematiza el procedimiento metodológico para determinar si la tecnología para el tratamiento de aguas residuales a base de zeolitas, seleccionada previamente por los constructores del rastro TIF de Villahermosa es idónea o existe otra opción mejor.

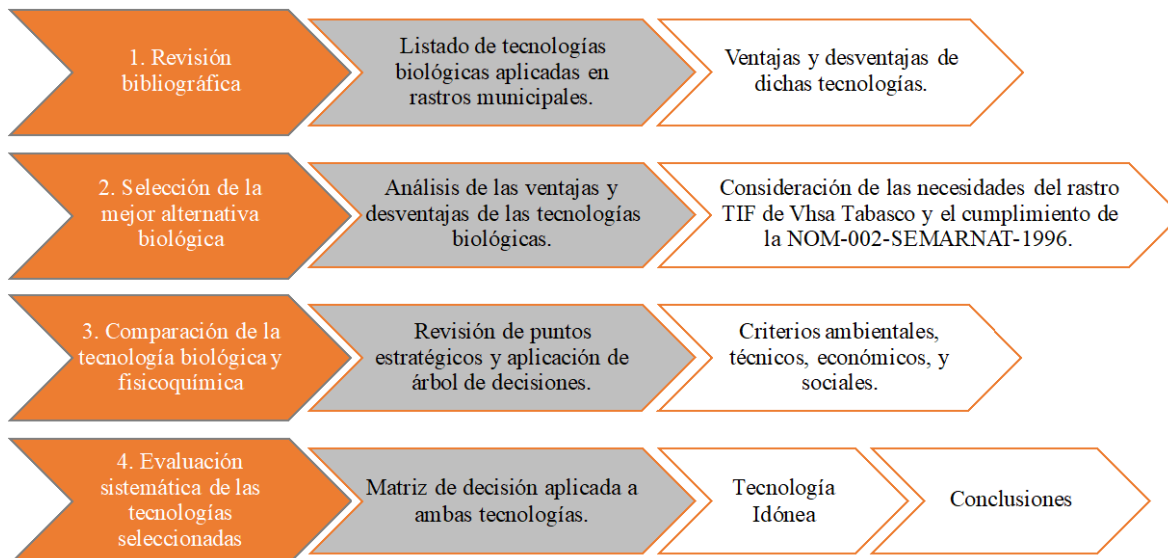


Figura 2. Propuesta metodológica del estudio.

1. *Revisión bibliográfica.* Se recopiló información acerca de las tecnologías biológicas que podrían ser aplicadas para el tratamiento de aguas residuales en rastros. Existe amplia información disponible para tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas, pero no demasiada para aguas residuales de rastros, por lo que el análisis de tecnologías incluyó predominantemente a las primeras.
 - 1.1. Se identificaron los principales procesos anaerobios, aerobios y mixtos (anaerobio-aerobio) empleados a distintas escalas (laboratorio, piloto y real), y se determinaron las ventajas y desventajas de cada uno.
2. *Selección de la mejor alternativa biológica.* Establecido el estado del arte se procedió a su análisis detallado.
 - 2.1. Se obtuvieron las eficiencias de remoción promedio de cada tecnología para los principales contaminantes de las aguas residuales: Sólidos Suspendidos Totales (SST), Amoníaco (NH_3), Nitrógeno Total (NT), Fósforo Total (FT), Coliformes Fecales (CF), así como la Demanda Química (DQO) y Bioquímica (DBO_5) de Oxígeno. Otros aspectos considerados fueron el espacio requerido, la energía consumida para aireación, el volumen de lodos generado que requiere tratamiento o disposición, los costos de construcción, operación y mantenimiento, así como los problemas ambientales de cada tecnología. El estudio abarcó la revisión de 98 tecnologías de tratamiento, 52 anaerobias, 32 aerobias y 14 secuenciales anaerobia-aerobia.
 - 2.2. Considerando concentraciones promedio (mg L^{-1}) de DQO (4,000), DBO_5 (2,000) y SST (1,600) como representativas del agua de rastro TIF (COWI, 2000; COFEPRIS, 2006), se filtraron cuantitativamente solo aquellas que podrían removerlos para cumplir con la NOM-002-SEMARNAT-1996.

- 2.3. Finalmente, se seleccionó la opción biológica más adecuada de forma cualitativa, considerando la que presentaba mayores ventajas.
3. *Comparación de la tecnología biológica y fisicoquímica.* A partir de este punto se utilizó la metodología propuesta por Noyola *et al.* (2013) para determinar la tecnología más sustentable mediante la implementación de las 3 herramientas descritas a continuación:
- 3.1. Se realizó un cuestionario que abarca aspectos ambientales, técnicos, económicos, y sociales, y con el cual se logró comparar, en primera instancia, la idoneidad de ambas tecnologías.
- 3.2. Se aplicó un árbol de decisiones que filtra las tecnologías que no son recomendables para su aplicación en el rastro, ya que considera datos técnicos relacionados con el prediseño de la PTAR.
4. *Evaluación sistemática de las tecnologías seleccionadas.* Se evaluaron las tecnologías propuestas para el rastro TIF de Villahermosa, considerando los costos de construcción, de operación y mantenimiento, eficiencia, sostenibilidad, la disposición de lodos, requerimientos de tierra, impactos ambientales, entre otros.
- 4.1. Se aplicó una matriz de decisión como última etapa de la metodología, en la cual se asignaron valores a los diez rubros de la matriz, según su importancia. Posteriormente se calificaron estos mismos rubros en base a las dos tecnologías evaluadas. Finalmente se obtuvieron las puntuaciones para cada tecnología, siguiendo las instrucciones de llenado y operación de la matriz, concluyendo con la mejor opción para el rastro TIF de Villahermosa.

Resultados

Revisión bibliográfica y selección de la mejor tecnología biológica

El análisis de las 98 tecnologías consideradas para el tratamiento de aguas residuales domésticas y de rastros permitió identificar 4 sistemas (2 anaerobios, 1 aerobio y 1 mixto) que han mostrado excelentes resultados a escalas laboratorio, piloto y real, y que permitirían alcanzar los parámetros indicados en NOM-002-SEMARNAT-1996:

- a) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente o UASB (por sus siglas en inglés, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).
- b) Filtro Anaerobio o AF (por sus siglas en inglés, *Anaerobic Filter*).
- c) Proceso de Lodos Activados o ASP (por sus siglas en inglés, *Activated Sludge Process*). Este sistema es aerobio.
- d) Reactor Secuencial Discontinuo o SBR (por sus siglas en inglés, *Sequencing Batch Reactor*). Este sistema tiene varias etapas en donde se pueden incluir distintas series de tratamientos: anaerobios, aerobios, anóxicos o la combinación de estos (mixto).

Al priorizar los estudios aplicados a escala real, se determinó que un tratamiento secuencial anaerobio-aerobio (mixto) es ideal, ya que se obtienen las ventajas de ambas tecnologías y se minimizan las desventajas que presentan cada una por separado. Además, ofrece la oportunidad de aprovechar otros productos de valor agregado derivados del proceso, tales como el biogás (anaerobio) y lodos activados

(aerobio). Un sistema anaerobio-aerobio que ha sido usado ampliamente y ha mostrado múltiples beneficios es la combinación UASB-ASP (Von Sperling, 2007).

En la Tabla 1 se muestran los datos relevantes de las cuatro tecnologías consideradas, así como del conjunto secuencial UASB-ASP.

Tabla 1. Cuadro comparativo de las tecnologías biológicas seleccionadas y sus principales parámetros en el tratamiento de aguas residuales domésticas con base en datos de Von Sperling (2007).

Parámetros	Unidad	AF	UASB	SBR	ASP	UASB-ASP	
Eficiencia promedio de remoción para aguas residuales domésticas	DBO ₅	%	80-85	60-75	90-97	85-93	85-93
	DQO	%	70-80	55-70	83-93	80-90	75-88
	SS	%	80-90	65-80	87-93	87-93	87-93
	Amoniaco	%	<45	<50	>80	>80	50-85
	NT	%	<60	<60	<60	<60	<60
	FT	%	<35	<35	<35	<35	<35
	CF	NMP 100 mL ⁻¹	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Espacio	m ² hab	0.2-0.35	0.03-0.1	0.12-0.25	0.12-0.25	0.08-0.2	
Energía para aireación	Potencia instalada	W hab ⁻¹	0	0	4.5-6.0	2.5-4.5	1.8-3.5
	Energía consumida	kWh hab ⁻¹ año ⁻¹	0	0	20-35	18-26	14-20
Volumen de lodo a:	Tratar	L hab ⁻¹ año ⁻¹	180-1,000	70-220	1,200-2,000	1,100-3,000	180-400
	Disponer	L hab ⁻¹ año ⁻¹	25-50	10-35	40-105	35-90	15-60
Costos de:	Construcción	USD hab ⁻¹	30-50	12-20	35-50	40-65	30-45
	Operación y Mantenimiento	USD hab ⁻¹ año ⁻¹	2.5-4.0	1.0-1.5	4.0-8.0	4.0-8.0	2.5-5.0
Problemas ambientales	Malos olores		++	++	+++	++++	++
	Ruido		++++	++++	+	+	+
	Insectos y gusanos		++++	++++	++++	++++	++++

Nota: SS: Sólidos Sedimentables; NT: Nitrógeno Total; FT: Fósforo Total; CF: Coliformes Fecales; NMP: Número Más Probable. La calificación asignada en los rubros de malos olores, ruido e insectos y gusanos puede variar de acuerdo con las condiciones locales. += menos favorable; ++++=más favorable.

Se puede observar en la Tabla 1 que el UASB presenta de forma individual las menores eficiencias de remoción de DQO, DBO₅ y SST; sin embargo, es el más económico en cuanto costos de construcción, operación y mantenimiento, ocupa el menor espacio, no genera lodos a tratar o disponer, no consume energía para agitación y sus impactos ambientales son similares a los del AF.

Además, el UASB ofrece como ventaja la posibilidad de generar biogás que podría emplearse para cubrir parte de los requerimientos energéticos de la planta. Más aún, cuando se combinan los sistemas UASB-ASP, se aprecia que superan al resto de tecnologías en todos los aspectos considerados. Por lo anterior, se determinó que el conjunto secuencial UASB-ASP, era el competidor ideal para el proceso fisicoquímico a base de zeolitas que se planea construir en el rastro TIF de Villahermosa.

Comparación y evaluación de la tecnología biológica y fisicoquímica

La metodología propuesta por Noyola *et al.* (2013) comienza con la comparación de las tecnologías seleccionadas mediante el uso de un cuestionario que abarca factores de sustentabilidad, y en el cual la respuesta deseable es la afirmativa, tal como se muestra en la Tabla 2.

Este cuestionario es el punto de partida para identificar si las tecnologías consideradas son aptas para el proyecto, no corresponde a una encuesta sino a un resultado consensado por los interesados; para responderlo se contó con el apoyo de los tomadores de decisión del rastro y del proyecto de la PTAR, obteniéndose una mayor cantidad de respuestas afirmativas para el caso del sistema UASB-ASP, lo que indicó preliminarmente que es mejor opción que el sistema fisicoquímico, pero para demostrarlo se aplicaron las otras dos herramientas de la metodología.

El árbol de decisiones que se muestra en la Figura 3, es el segundo paso en la metodología de Noyola *et al.* (2013), e inicia al preguntar si se ha respondido el cuestionario, lo cual es importante pues filtra las tecnologías que no son recomendables para su aplicación en el rastro, ya que considera diversos datos técnicos relacionados con el prediseño de la PTAR. Después se define cuál es el área disponible, en el caso del rastro TIF de Villahermosa no hay espacio suficiente para sistemas lagunares o extensivos, por lo tanto, se limita a considerar sistemas compactos que en este caso serán el fisicoquímico a base de zeolitas y el biológico UASB-ASP.

Para realizar la comparación sistemática entre ambas tecnologías se consideraron los puntos referentes al prediseño de la PTAR, tal como se observa en la Figura 3, y se recopiló información fundamental para cada una de las opciones, tal como se observa en la Tabla 3.

La Tabla 3 indica que las eficiencias promedio de remoción para DQO, DBO₅ y SST son similares para ambas tecnologías, mientras que la remoción de nutrientes (NT y FT) es mayor para el sistema de zeolitas debido a su capacidad como medio filtrante y su intercambio iónico. Es importante destacar que la información para el sistema UASB-ASP es un condensado de múltiples estudios realizados a escala real, mientras que para el sistema a base de zeolitas los datos fueron recolectados de un solo informe de CONAGUA (2014), por lo que podrían variar bajo otras condiciones de proceso.

Tabla 2. Cuestionario de criterios de sustentabilidad con base en Noyola et al (2013).

PREGUNTAS	Zeolitas	UASB-ASP
Criterio Ambiental		
1 ¿Puede operar la planta dentro de las fluctuaciones de temperatura del medio ambiente presentes en la región?	SI	SI
2 ¿La dirección del viento dominante es favorable para la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales en cuanto al transporte de aerosoles o posibles malos olores?	SI	SI
3 ¿Se tiene una estimación de la generación de gases de efecto invernadero por parte del proceso de tratamiento (agua y lodos)?	NO	NO
4 ¿Se cuenta con un estudio de impacto ambiental, incluso preliminar, que valore los impactos de la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales?	NO	NO
Criterio Técnico		
5 ¿Se ha identificado, dentro de lo posible, alguna tecnología aplicable al caso y que haya sido desarrollada o adaptada en la región o en el país?	SI	SI
6 ¿Se puede considerar que el agua residual a tratar es del tipo netamente municipal (DBO ₅ total por debajo de los 350 mg L ⁻¹)?	NO	NO
7 ¿Se está seguro de que no hay descargas industriales de relevancia, o de cualquier otro tipo, que alteren el carácter municipal del agua residual?	SI	SI
8 ¿En la tecnología propuesta se favorece el tratamiento biológico sobre los tratamientos fisicoquímicos?	NO	SI
9 ¿Se ha considerado dentro del tren de tratamiento del agua, al menos para efectos de comparación y evaluación, un sistema anaerobio?	NO	SI
10 ¿Se evita la dependencia de productos (enzimas, bacterias o microorganismos de cualquier tipo) que deban agregarse a la planta frecuentemente y generen dependencia económica?	NO	SI
11 ¿Se reconoce que la planta de tratamiento genera lodos y su cantidad y calidad están determinadas y se ha considerado su manejo?	SI	SI
12 ¿La planta de tratamiento, preferentemente, integra o contempla el tratamiento de lodos por vía biológica?	NO	SI
13 ¿En plantas pequeñas, se ha considerado dentro del tren de manejo de lodos, al menos para efectos de comparación y evaluación, los lechos de secado?	SI	SI
14 ¿Se tiene contemplado cómo disponer adecuadamente los lodos generados?	SI	SI
15 ¿La planta de tratamiento genera lodos susceptibles a ser usados como mejoradores de suelo o en la agricultura?	SI	SI
16 ¿La planta de tratamiento integra o contempla el control de olores?	NO	NO
17 ¿El control de olores hace uso de biotecnología o sistemas biológicos como biofiltros de composta?	NO	NO
18 ¿La planta de tratamiento integra o contempla la mitigación de ruido?	NO	NO
19 ¿Se tiene contemplado que hacer con el agua residual o agua parcialmente tratada durante el arranque de la planta o falla de la misma sin que afecte ostensiblemente al medio ambiente?	SI	SI
20 ¿La planta de tratamiento usa equipamiento de fácil compostura y reposición?	SI	SI
21 ¿Se considera que la tecnología usada en la planta de tratamiento favorece una fácil operación y mantenimiento de esta?	SI	SI
22 ¿Se considera que la planta no requiere personal altamente capacitado; es decir, puede ser operada por un profesional de nivel técnico medio con la capacitación necesaria?	SI	SI
23 ¿El consultor que propone la tecnología puede demostrar experiencia en su diseño y operación?	SI	SI

PREGUNTAS	Zeolitas	UASB-ASP
Criterio Económico		
24 ¿La tecnología utilizada en la planta de tratamiento puede contribuir de alguna forma con las actividades económicas de la región?	SI	SI
25 ¿En cuanto a la reparación y/o mantenimiento de los equipos de la planta es posible apoyarse con prestadores de servicios de la región?	SI	SI
26 ¿Se desglosa a detalle el costo de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento?	SI	SI
27 ¿El costo de operación y mantenimiento de la planta es sostenible considerando las finanzas del municipio o del organismo responsable de su operación?	SI	SI
Criterio Social		
28 ¿Ha sido consultada la población directamente relacionada o posiblemente afectada sobre la construcción de la planta de tratamiento?	SI	SI
29 ¿Se ha hecho consciencia en la población sobre la necesidad y ventajas de contar con una planta de tratamiento de aguas residuales?	SI	SI
30 ¿Se ha definido el esquema de participación ciudadana durante el proceso de toma de decisiones, así como para la adjudicación, construcción y operación?	SI	SI
31 ¿Se considera contratar personal de la comunidad?	SI	SI
32 ¿Se cuenta con un plan de apoyo para la educación de la comunidad (visitas guiadas, museo, servicio social, entre otras acciones)?	NO	NO
33 ¿Se cuenta con un plan de capacitación para los empleados?	SI	SI
34 ¿Se cuenta con un plan de respuesta a emergencias y brigadas de protección civil dentro de la planta?	SI	SI
Total de respuestas afirmativas	23	27

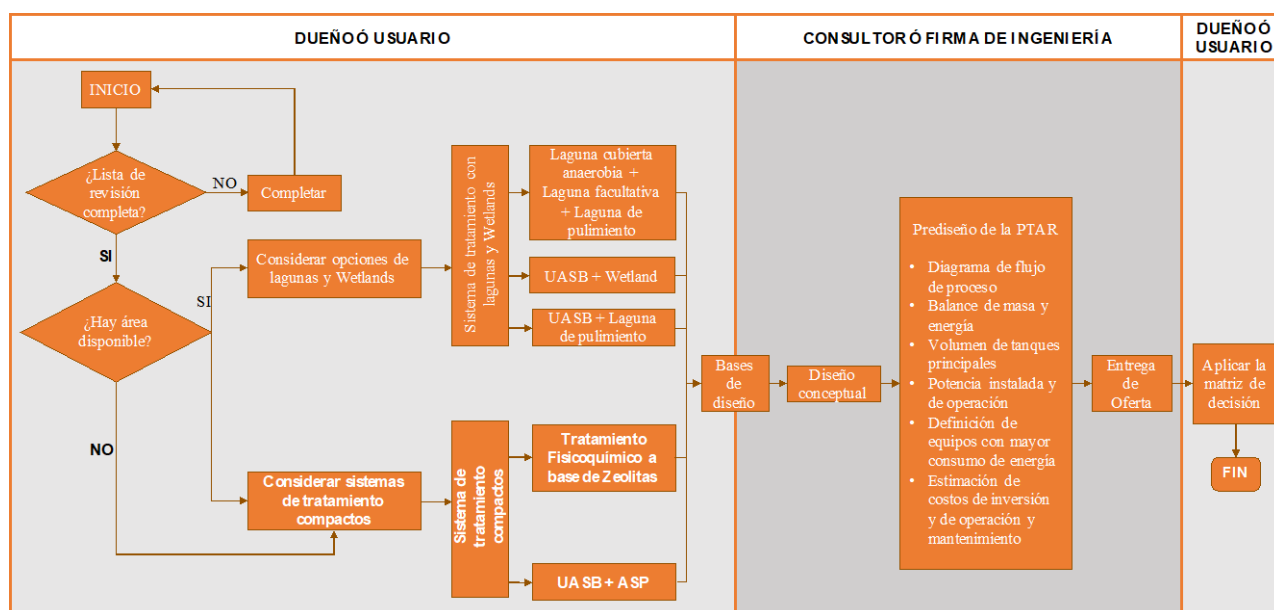


Figura 3. Árbol de decisiones para la preselección de tecnologías (Noyola et al., 2013).

Tabla 3. Cuadro comparativo del sistema a base de zeolitas y el conjunto UASB-ASP.

Elementos comparables	Tecnología fisicoquímica Zeolitas	Tecnología biológica UASB-ASP
Eficiencia promedio de Remoción (%) de DBO ₅	90.9	93
Eficiencia promedio de Remoción (%) de DQO	85.8	88
Eficiencia promedio de Remoción (%) de SST	97.5	93
Eficiencia promedio de Remoción (%) de NT	81.5	<60
Eficiencia promedio de Remoción (%) de FT	99.5	<35
CF (NMP 100 mL ⁻¹)	<3	1-2
Diseño Conceptual	Tratamiento preliminar, primario, secundario y disposición de lodos.	Tratamiento preliminar, primario, secundario, disposición de lodos y emisiones gaseosas.
Espacio o superficie de obra (m ²)	175	<200
Volumetría de tanques	Cárcamo de 10 m ³ , cisterna de aguas negras de 100 m ³ y cisterna de aguas tratadas 20 m ³ .	
Potencia instalada (W)	8,761	3,500
Consumo de energía (kWh año ⁻¹)	16,113.6	<20,000
Costo aproximado de energía eléctrica en la tarifa DIT (Demanda industrial en transmisión) en horario punta: \$1.40 MXN kWh ⁻¹ .	\$22,559.04 MXN kWh ⁻¹ año ⁻¹	\$28,000.00 MXN kWh ⁻¹ año ⁻¹
Cargo fijo aproximado de energía eléctrica en la región sureste, en el estado de Tabasco, municipio de centro: \$2,300.00 MXN mes ⁻¹	\$55,200.00 MXN año ⁻¹	\$55,200.00 MXN año ⁻¹
Costo aproximado de energía eléctrica en la PTAR (MXN año ⁻¹)	\$77,760.00	\$83,200.00
Plantilla de operación y grado de especialización.	Capacitación y supervisión para el uso y manejo de los equipos.	
Costos de operación y mantenimiento (MXN m ⁻³ de agua tratada)	\$3.92	\$2.54
Costos de operación y mantenimiento (MXN año ⁻¹)	\$143,080.00	\$93,000.00
Costos de construcción (MXN)	>\$840,000.00	\$840,000.00
Volumen de lodos a tratar (L año ⁻¹)	No hay datos	59,940-400,000 (164-1,095 L d ⁻¹)
Volumen de lodos a disponer (L año ⁻¹)	12,775-18,250 (35-50 L d ⁻¹)	4,995-60,000 (13-164 L d ⁻¹)

Nota: Elaboración propia basada en datos de Von Sperling (2007), informe de CONAGUA (2014) sobre remoción de contaminantes de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de zeolitas fabricada por la empresa Zeolitas e Insumos Nacionales S.A. de C.V., y datos proporcionados por los encargados del proyecto del rastro TIF de Villahermosa.

En cualquier caso, los porcentajes de remoción de ambas tecnologías mostrados en la Tabla 3, son favorables para cumplir con la normatividad aplicable. El diseño conceptual de ambos trenes de tratamiento también es similar, la única diferencia es que para el UASB-ASP se deberá considerar la producción de biogás, que puede ser utilizado para reducir el consumo energético de la planta por cogeneración. Con respecto al espacio requerido y la volumetría de los tanques ambas tecnologías son compactas y el caudal diario a tratar es el mismo 100,000 litros.

Las principales diferencias observadas en Tabla 3 son:

- 1) La potencia instalada en la planta de zeolitas será más del doble que la del UASB-ASP.
- 2) El costo anual estimado por consumo energético es menor para el sistema basado en zeolitas; sin embargo, el cálculo para el UASB-ASP no considera la posible cogeneración energética a partir del biogás que podría incluso ser inferior al de las zeolitas.
- 3) Los costos de operación y mantenimiento anuales son menores para el sistema UASB-ASP, siendo la opción más viable.

Aunque el costo por la dosificación de reactivos (coagulante y floculante) del sistema de zeolitas ya se encuentra incluido dentro del costo anual de operación y mantenimiento, el proveedor indica que las zeolitas requieren de una regeneración cada seis meses para garantizar su buen funcionamiento y aprovechar al máximo su tiempo de vida útil (3 a 5 años). Dicha regeneración se debe realizar con una solución de salmuera (aproximadamente 100 kg de cloruro de sodio para el volumen de zeolitas de la PTAR). Al término de su vida útil se deberán adquirir nuevas zeolitas (3.5 toneladas para una PTAR de 35 m³).

La matriz de decisión es la última herramienta de la metodología, y permite una evaluación más objetiva y de tipo cuantitativa. Primero, se asignó un valor según su importancia a cada uno de los diez rubros de la matriz (ponderación). Una vez valorados los rubros, se calificó cada una de las tecnologías para obtener las puntuaciones finales y seleccionar la más sustentable. En las Figuras 4 y 5 se muestran respectivamente las matrices de decisión para los sistemas de zeolitas y UASB-ASP con las puntuaciones y ponderaciones correspondientes a cada rubro.

Las Figuras 5 y 6 muestran claramente que el sistema UASB-ASP, es más sustentable que el sistema a base de zeolitas para el rastro TIF de Villahermosa. La tecnología fisicoquímica arroja un resultado de 64 puntos, mientras que la biológica tiene 84 puntos. Se asignó al rubro de costo la mayor ponderación (35%), ya que es uno de los factores más importantes al momento de elegir un tratamiento, y se obtuvo una diferencia de 14 puntos a favor del UASB-ASP.

#	A	B	C	D	E
	%	PROCESO EVALUADO: SISTEMA FISCOQUÍMICO A BASE DE ZEOLITAS RUBROS EVALUADOS	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 3= adecuado 5= muy bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5, 9.6 y 10.7)	D* A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	3	0.6	3
2	10	GENERACIÓN DE RESIDUOS	3	0.6	6
3	0	ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD	5	1	0
4	10	GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE REÚSO	3	0.6	6
5	5	VIDA ÚTIL	5	1	5
6	0	REQUERIMIENTO DE ÁREA	5	1	0
7	35	COSTO			
7.1		Inversión	3		
7.2		Operación y mantenimiento	3		
7.3		Sumar las casillas 7.1 C y 7.2 C y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 7.3 D		0.6	21
8	15	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN			
8.1		Criterios de diseño	3		
8.2		Experiencia del contratista	0		
8.3		Tecnología ampliamente probada	3		
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	5		
8.5		Sumar las casillas 8.1 C, 8.2 C, 8.3 C y 8.4 C y dividir el total entre 20. El resultado anotarlo en la casilla 8.5 D		0.55	8.3
9	15	OPERACIÓN			
9.1		Flexibilidad de operación	5		
9.2		Confiabilidad del proceso	5		
9.3		Complejidad de operación del proceso	5		
9.4		Requerimiento de personal	0		
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	3		
9.6		Sumar las casillas 9.1 C, 9.2 C, 9.3 C, 9.4 C y 9.5 C y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 9.6 D		0.72	11
10	5	ENTORNO			
10.1		Influencia de la temperatura	5		
10.2		Producción de ruido	5		
10.3		Contaminación visual	5		
10.4		Producción de malos olores	5		
10.5		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono)	0		
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos	5		
10.7		Sumar las casillas 10.1 C, 10.2 C, 10.3 C, 10.4 C, 10.5 C y 10.6 C y dividir el total entre 30. El resultado anotarlo en la casilla 10.7 D		0.83	4.2
11	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11 E			64

Figura 4. Matriz de decisión para el tratamiento fisicoquímico a base de zeolitas con base en la metodología Noyola *et al.* (2013).

#	A	B	C	D	E
	%	PROCESO EVALUADO: UASB + ASP RUBROS EVALUADOS	CALIFICACIÓN 0= no aplica 1= deficiente 3= adecuada 5= muy bueno	C/5 (excepto en renglones 7.3, 8.5, 9.6 y 10.7)	D* A
1	5	APLICABILIDAD DEL PROCESO	5	1	5
2	10	GENERACIÓN DE RESIDUOS	3	0.6	6
3	0	ACEPTACIÓN POR PARTE DE LA COMUNIDAD	5	1	0
4	10	GENERACIÓN DE SUBPRODUCTOS CON VALOR ECONÓMICO O DE REÚSO	5	1	10
5	5	VIDA ÚTIL	5	1	5
6	0	REQUERIMIENTO DE ÁREA	5	1	0
7	35	COSTO			
7.1		Inversión	5		
7.2		Operación y mantenimiento	5		
7.3		Sumar las casillas 7.1 C y 7.2 C y dividir el total entre 10. El resultado anotarlo en la casilla 7.3 D		1	35
8	15	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN			
8.1		Criterios de diseño	5		
8.2		Experiencia del contratista	0		
8.3		Tecnología ampliamente probada	5		
8.4		Complejidad en la construcción y equipamiento	3		
8.5		Sumar las casillas 8.1 C, 8.2 C, 8.3 C y 8.4 C y dividir el total entre 20. El resultado anotarlo en la casilla 8.5 D		0.65	9.8
9	15	OPERACIÓN			
9.1		Flexibilidad de operación	5		
9.2		Confiabilidad del proceso	5		
9.3		Complejidad de operación del proceso	3		
9.4		Requerimiento de personal	0		
9.5		Disponibilidad de repuestos y centros de servicio	3		
9.6		Sumar las casillas 9.1 C, 9.2 C, 9.3 C, 9.4 C y 9.5 C y dividir el total entre 25. El resultado anotarlo en la casilla 9.6 D		0.64	9.6
10	5	ENTORNO			
10.1		Influencia de la temperatura	5		
10.2		Producción de ruido	3		
10.3		Contaminación visual	5		
10.4		Producción de malos olores	5		
10.5		Generación de gases de efecto invernadero (huella de carbono)	0		
10.6		Condiciones para la reproducción de animales dañinos	5		
10.7		Sumar las casillas 10.1 C, 10.2 C, 10.3 C, 10.4 C, 10.5 C y 10.6 C y dividir el total entre 30. El resultado anotarlo en la casilla 10.7 D		0.77	3.8
11	100	SUMAR LOS VALORES DE LA COLUMNA E Y ANOTAR EL RESULTADO EN LA CASILLA 11 E			84

Figura 5. Matriz de decisión para tratamiento biológico UASB-ASP con base en la metodología Noyola *et al.* (2013).

Conclusiones

Evaluar tecnologías para el tratamiento de aguas residuales puede llegar a ser una labor sumamente complicada para los involucrados, ya que además de los impactos al ambiente y la comunidad deben considerarse exigencias técnicas, legales, económicas, financieras y contractuales de la organización y su entorno (municipio, estado y federación). Por lo tanto, para facilitar esta tarea se debe recopilar una gran cantidad de información a partir de fuentes fidedignas, que permitan una comparación objetiva y sistematizada a fin de seleccionar la más adecuada.

Las aguas residuales de los rastros impactan negativamente a cuerpos receptores, suelo, aire, y simultáneamente, a la salud de los seres vivos en contacto con sus contaminantes. Se estima que solo 2.5% de los rastros en México cuentan con una PTAR. Es importante que el diseño de nuevos rastros municipales considere un sistema de tratamiento de aguas residuales, la metodología propuesta por Noyola *et al.* (2013) permite seleccionar la tecnología más sustentable considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

La aplicación de dicha metodología permitió comparar sistemáticamente dos tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales del rastro TIF de Villahermosa; una fisicoquímica a base de coagulación-floculación y filtro de zeolitas seleccionada por los constructores del rastro, y otra biológica UASB-ASP seleccionada por los autores de este estudio. Mediante 3 herramientas (un cuestionario de criterios sustentables, el árbol de decisión, y la matriz de decisión), y considerando la calidad inicial promedio del agua residual de rastros, así como el cumplimiento de la NOM-002-SEMARNAT-1996, se determinó que el sistema UASB-ASP es el más adecuado porque:

- No depende del consumo de reactivos químicos (coagulante y floculante).
- No utiliza un soporte que deba ser recambiado o regenerado.
- Su costo de inversión es considerablemente menor que el sistema fisicoquímico.
- Los costos de operación y mantenimiento son también inferiores.
- Los requerimientos energéticos y producción de lodos a tratar o disponer son bajos.
- Cuenta con un diseño simple y estable.
- Genera biogás que podría ser aprovechado como energético en la PTAR, entre otras ventajas.

Una ventaja de la metodología utilizada es que es flexible, permitiendo a los tomadores de decisión variar la ponderación de cada rubro, adaptando aún más el resultado a sus necesidades, pero conservando la imparcialidad que es fundamental para acertar en la decisión final.

En cualquier selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales se debe partir de la idea que en sistemas biológicos se transforman los contaminantes a compuestos menos dañinos (CO₂ y células en tratamiento aerobio y biogás en tratamiento anaerobio), mientras que las fisicoquímicas suelen transferir los contaminantes de una fase a otra, por lo que suelen requerirse tratamientos adicionales de regeneración, disposición o confinamiento. Es posible que dentro de las opciones fisicoquímicas, el proceso de Zeolitas e Insumos Nacionales S.A. de C.V. sea uno de los más adecuados para el rastro TIF de Villahermosa; sin embargo, los autores consideran que debieron evaluarse también las diversas opciones biológicas, de allí la importancia del presente estudio.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA (2017), por la beca otorgada para realizar estudios de Maestría en Tecnologías para el Desarrollo Sustentable de Zonia Cárdenas Garza. Del mismo modo, se agradecen todas las facilidades e información proporcionada por el personal encargado del proyecto de la PTAR del rastro TIF de Villahermosa Tabasco.

Referencias bibliográficas

- Aziz, A., Basheer, F., Sengar, A., Irfanullah, Khan, S., Farooqi, I. (2019) Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. *Science of the Total Environment*, **686**, 681–708.
- Balladares, M. (1998) *Rellenos sanitarios y tratamiento de residuos líquidos de mataderos municipales*. Instituto Nicaragüense de Fomento Municipal (INIFOM) Managua, Nicaragua.
- Castañeda, B., Marco, C. (2007) *Tratamiento y aprovechamiento de los efluentes generados en la industria cárnica*. Asociación para Investigación en Tecnologías Apropriadas S.C., 1-10 pp.
- COFEPRIS (2006) *Evaluación de riesgos de los rastros y mataderos municipales*. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/154388/Evaluacion de riesgos de los rastros y mataderos municipales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/154388/Evaluacion_de_risgos_de_los_rastros_y_mataderos_municipales.pdf)
- Collado, E (2019) *Diario Presente. Nuevo rastro con enfoque empresarial; evitarán errores cometidos en UGRT*. Disponible en: <https://www.diariopresente.mx/tabasco/nuevo-rastro-con-enfoque-empresarial-evitaran-errores-cometidos-en-ugrt/237694>
- CONAGUA (2014) *Informe sobre la eficiencia de remoción de contaminantes en una planta de tratamiento de aguas residuales a base de zeolitas fabricada por Zeolitas e Insumos Nacionales, S.A. de C.V.* Disponible en: <https://zeolitas.mx/wp-content/uploads/2018/11/informe-conagua-zeolitas-1.pdf>
- COWI (2000) *Cleaner Production Assessment in Meat Processing*. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9571/Cleaner%20Production%20Assessment%20in%252%20Meat%20Processing2000321.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Jiexiang, G. y Suren, T. (1993) *The application of natural zeolite in China. Proceeding Intern. Congress Applied Mineralogy*, ICAM' 93, Fremantle, Wester Australia, 31 Mayo/2 Junio.
- Jiménez, A. (2017) *Zeolitas y el tratamiento de aguas residuales en México*. Disponible en: <https://jimenezmerino.blogspot.com/2017/05/zeolitas-y-el-tratamiento-de-aguas.html>
- Kelly, A. (2002) *Tratamiento de Aguas Residuales en Latinoamérica. Identificación del Problema. Agua Latinoamericana*, **2**(5), 1-4.
- López-López, A., De la Barrera, J., Vallejo, R., Barahona, C. (2008) Estudio comparativo entre un proceso fisicoquímico y uno biológico para tratar agua residual de rastro. *Interciencia*, **33**(7), 490-495.
- Margeta, K., Logar, N.Z., Šiljeg, M., Farkaš, A. (2013) Natural zeolites in water treatment - how effective is their use. *Water Treatment*, 81-112 pp. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/water-treatment/natural-zeolites-in-water-treatment-how-effective-is-their-use>
- NOM-002-ECOL-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. Disponible en: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>
- NOM-194-SSA1-2004. *Productos y servicios. Especificaciones sanitarias en los establecimientos dedicados al sacrificio y faenado de animales para abasto, almacenamiento, transporte y expendio. Especificaciones sanitarias de productos*. Disponible en: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/194ssa104.html>

- Noyola, A. Morgan-Sagustame, J.M., Güereca, L.P. (2013) *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. II-UNAM, México. Disponible en: http://www.pronatura-sur.org/web/docs/Tecnologia_Aguas_Residuales.pdf
- Sánchez, J. (2015) *Degradación fotocatalítica y caracterización estructural de tobas zeolíticas*. ESQUIE-IPN, México. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17850/1/25-1-16773.pdf>
- SENASICA (2015) *Establecimientos Tipo Inspección Federal (TIF)* Disponible en: <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/establecimientos-tipo-inspeccion-federal-tif>
- SIAP-SAGARPA (2007) *Directorio Nacional de Centros de Sacrificio de los Estados Unidos Mexicanos*. Disponible en: http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaBasica/Pecuario/Rastros/trabcam_p2.pdf
- Vallejo, R., López-López, A., Gallardo, J. (2019) *Manejo integral de efluentes residuales generados en los rastros municipales*. CIATEJ, México. Disponible en: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/683/1/1%20Libro%20rastros%20version%20final.pdf>
- Veall F. (1997) *Estructura y funcionamiento de los mataderos medianos en los países en desarrollo. Producción y Sanidad Animal*. Disponible en: <http://www.fao.org/3/T0566S/T0566S00.htm>
- Von Sperling, M. (2007) *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. Biological wastewater treatment series. IWA Publishing. Disponible en: <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402086.pdf>
- Wang, S.; Peng, Y. (2010) Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, **156**(1), 11-24.
- Zeolitas e Insumos Nacionales S.A de C.V. (2018) *¿Porque un proceso fisico-químico?*. Disponible en: <https://zeolitas.mx/porque-un-proceso-fisico-quimico>