

Gestión de aguas residuales de rastros municipales en México: cantidades producidas, legislación existente, procesos de tratamiento aplicados y desafíos futuros

Jesús Castellanos-Rivera *, Luis Carlos Sandoval-Herazo y Graciela Elizabeth Nani González

Wetlands and Environmental Sustainability Laboratory, Division of Graduate Studies and Research, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Misantla, Veracruz, Km 1.8 Carretera a Loma del Cojolite, Misantla 93821, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: jcastellanosr@outlook.es; Tel.: (+522351104181)

Desarrollo Sustentable (Gestión y aprovechamiento de residuos). **Ponencia Virtual.**

Recibido: 7 de septiembre de 2023

Aceptado: 5 de octubre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: Las aguas residuales procedentes de rastros municipales siguen siendo un problema latente en el mundo actual, debido a sus características se han catalogado como una de las aguas más agresivas hacia el medio ambiente. México cuenta con 972 instalaciones registradas dedicadas al procesamiento de carnes, por lo que, es necesario establecer las mejores opciones de tratamiento con el fin de lograr un control eficiente de las aguas residuales producidas, reducir el consumo de agua y aumentar la eficiencia de los recursos naturales. El objetivo del presente estudio fue estimar las cantidades de aguas residuales de rastros municipales que se producen en México y dar a conocer la legislación aplicable a la disposición y descarga de estos efluentes. También se presentan las soluciones basadas en la naturaleza que se podrían aplicar y que son asequibles desde el punto de vista técnico y económico, así como las oportunidades futuras para el manejo sustentable de este tipo de aguas residuales. El estado de Jalisco es el estado que genera mayor cantidad de agua residual y residuos sólidos, ha habido avances en la transición de las políticas públicas del país hacia el modelo de sustentabilidad, y estos avances están sustentados en bases legales, marcos institucionales y órganos de gobierno. Las ventajas competitivas de soluciones basadas en la naturaleza como los humedales construidos frente a otras tecnologías de tratamiento son: bajo costo de operación y mantenimiento, fácil implementación, bajo consumo energético y son inocuos para la naturaleza y los cuerpos receptores. Si bien se han obtenido buenos resultados en el manejo y saneamiento de las aguas residuales de los mataderos, aún existen algunos desafíos relacionados con estas tecnologías utilizadas (parámetros de diseño y operación, escalamiento, procesos bioquímicos implicados, etc.) lo que a su vez se convierten en áreas excelentes de oportunidad para futuras investigaciones.

Palabras clave: Manejo de aguas residuales; rastros; legislación; soluciones basadas en la naturaleza

Wastewater management from municipal slaughterhouses in Mexico: quantities produced, existing legislation, treatment processes applied and future challenges

Abstract: Wastewater from municipal slaughterhouses continues to be a latent problem in today's world, due to its characteristics it has been classified as one of the most aggressive waters towards the environment. Mexico has 972 registered facilities dedicated to meat processing, so it is necessary to establish the best treatment options in order to achieve efficient control of the wastewater produced, reduce water consumption and increase the efficiency of natural resources. The objective of this study was to estimate the quantities of municipal slaughterhouse wastewater produced in Mexico and to provide information on the legislation applicable to the disposal and discharge of these effluents. It also presents the nature-based solutions that could be applied and that are technically and economically feasible, as well as future opportunities for the sustainable management of this type of wastewater. The state of Jalisco is the state that generates the largest amount of wastewater and solid waste, there has been progress in the transition of the country's public policies towards the sustainability model, and these advances are supported by legal bases, institutional frameworks, and government bodies. The competitive advantages of nature-based solutions such as constructed wetlands over other treatment technologies are low operation and maintenance costs, easy implementation, low energy consumption, and they are harmless to nature and receiving bodies. Although good results have been obtained in the management and sanitation of slaughterhouse wastewater, there are still some challenges related to these technologies used (design and operation parameters, scaling up, biochemical processes involved, etc.) which in turn become excellent areas of opportunity for future research.

Keywords: Wastewater management; slaughterhouses; legislation; nature-based solutions.

Introducción

Las aguas residuales procedentes de rastros municipales siguen siendo un problema latente en el mundo actual, dadas las características de estos efluentes se han denominado como una de las aguas más agresivas hacia el medio ambiente (Khalatbari-Limaki *et al.*, 2020). Aunque existen tecnologías eficientes para tratar este tipo de aguas residuales, como

son el tratamiento con microfiltros, filtros verdes, oxidación avanzada, tratamiento por membranas, electrocoagulación, destilación, etc. (Musa y Idrus, 2021; Brennan *et al.*, 2021; Ng *et al.*, 2022), aun no se convierten en una tecnología asequible para rastros municipales en comunidades rurales de bajos ingresos o con dispersión geográfica, como es el caso de México, donde el 97.7% del total de las localidades del país se consideran rurales y se clasifican con un índice de marginación alta (Bhunja *et al.*, 2019), esta situación es particularmente desafiante para este tipo de lugares. México cuenta con 972 instalaciones registradas dedicadas al procesamiento de carnes de las cuales 117 son rastros TIF, 1 TIF-353, 194 privados y 658 municipales (SADER, 2023; SENASICA, 2023), es necesario establecer las mejores opciones de tratamiento con el fin de lograr un control eficiente de las aguas residuales producidas, reducir el consumo de agua y aumentar la eficiencia de los recursos. Hasta el momento se dispone de información limitada sobre el manejo de aguas residuales procedentes de los rastros municipales, así como, la legislación existente en materia de descarga y posibles tratamientos adecuados (Philipp *et al.*, 2021; Chowdhury *et al.*, 2022). Con base en lo anterior el objetivo del presente estudio fue estimar las cantidades de aguas residuales de rastros municipales que se producen en México y dar a conocer la legislación aplicable a la disposición y descarga de estos efluentes. También se presentan las soluciones basadas en la naturaleza que se podrían aplicar y que son asequibles desde el punto de vista técnico y económico, así como las oportunidades futuras para el manejo sustentable de este tipo de aguas residuales.

Materiales y Métodos

En esta sección se describen los materiales y métodos empleados para el estudio.

Búsqueda de información.

Esta investigación es de tipo cualitativa, conformada por artículos integrados con una base de datos de un gran número de publicaciones de la última década, agregando algunas investigaciones de la penúltima y antepenúltima década para fortalecer aún más la búsqueda, especialmente cuando se trata de fundamentos teóricos.

La revisión estuvo estructurada por artículos, capítulos de libros, libros y tesis, los cuales han sido publicados tanto en inglés (80%) como en español (20%). Para la búsqueda se utilizó Google Scholar. (60%), Scimedirect (15%), 1findr (5%), Springer (10%), Proquest (5%) y EBSCO (5%). Los artículos seleccionados fueron revisados por pares académicos, quienes garantizaron la calidad de los datos recolectados. Al iniciar la búsqueda se utilizaron las siguientes palabras clave: soluciones basadas en la naturaleza, aguas residuales de matadero, tratamiento anaeróbico/aeróbico, aguas residuales de matadero avícola, lodos activados, caracterización de aguas residuales de matadero, humedales construidos, tratamiento biológico, condiciones de operación, entre otras.

Legislación ambiental de los mataderos municipales.

Para establecer una correcta descarga de las aguas residuales de los mataderos al medio ambiente se ha consultado la normativa internacional vigente, así como los límites máximos permitidos para el vertido de este tipo de efluentes en distintas jurisdicciones del mundo, se incluyen datos facilitados por la Australian y el Consejo Ambiental y de Conservación de Nueva Zelanda, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, el Consejo de las Comunidades Europeas, el Medio Ambiente de Canadá, la Junta Central de Control de la Contaminación de la India, el Ministerio de Protección Ambiental de la República Popular China, la EPA de EE. UU., Grupo del Banco Mundial, así como la legislación y normatividad ambiental nacional, regional y local.

Análisis teórico.

Este documento se organizó con todos los datos recopilados, destacando las principales características de las aguas residuales de los mataderos municipales, así como las principales normas y reglamentos ambientales para la descarga de efluentes de los mataderos municipales. Además, se presenta información relevante sobre los tratamientos biológicos anaerobios y aerobios utilizados durante los últimos 20-30 años en el manejo y gestión de aguas residuales de mataderos y de la industria alimentaria y cárnica.

Análisis estadístico.

Se aplicó estadística descriptiva, construyendo histogramas de frecuencia, tablas que describen los principales parámetros estudiados y el tipo de tecnología utilizada.

Resultados y Discusión

En esta sección se incluye una descripción precisa de los resultados experimentales, una discusión de los mismos y su interpretación desde la perspectiva de los trabajos previos. También se hace alusión a los desafíos futuros con respecto a los tratamientos de aguas residuales de rastros municipales.

Características de las aguas residuales de rastros municipales

Las aguas residuales de los rastros municipales contienen un alto nivel de proteínas, grasas y carbohidratos que se generan a partir de partículas de carne, viseras, piel y residuos de sangre (Ziara *et al.*, 2018). Los residuos de sangre y partículas de carne, además de los residuos de desinfectantes y productos de limpieza, son principalmente las fuentes de fósforo que pueden ser fosfatos orgánicos e inorgánicos (Baker *et al.*, 2021). Las características de este tipo de efluentes se muestran en la Tabla 1. Los contaminantes en este tipo de efluentes se determinan en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos en suspensión (SST), amonio (NH₄-H), fósforo total (PT), pH entre otros. Según los estudios de la Tabla 1, las concentraciones de DBO, DQO, sólidos suspendidos totales (TSS), NH₄-H, nitrógeno total (NT), carbono orgánico total (COT), TP, sulfuro total (ST) y el pH excede el límite estándar permitido por el Banco Mundial para efluentes de aguas residuales (Mozhiarasi y Natarajan, 2022).

Tabla 1. Parámetros típicos de las aguas residuales de rastros.

| Parámetro* | Valor mínimo | Valor máximo | Promedio ± EE |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------------|
| Alcalinidad | 12 | 433 | 222.30 ± 210.20 |
| AGVs | 833 | 1060 | 1306.67 ± 473.33 |
| pH | 6.5 | 7.28 | 6.88 ± 0.15 |
| K | | 0.04 | 0.04 ± 0.00 |
| SST | 1462 | 7267 | 4530.25 ± 1357.22 |
| DQO | 5577 | 15385 | 9718.50 ± 1716.41 |
| FOG | 600 | 666 | 633.00 ± 33.00 |
| NH ₄ -N | 30 | 417.96 | 223.98 ± 193.98 |
| PT | 26 | 43 | 36.10 ± 5.36 |
| COT | 862 | 5300 | 3081.00 ± 2219.00 |
| Sólidos totales | 4558 | 27390 | 16055.33 ± 6591.53 |
| Pb | | 34.3 | 34.30 ± 0.00 |
| DBO | 2300 | 10173 | 5955.38 ± 2033.29 |
| STV | 1310 | 18800 | 9685.25 ± 3942.86 |
| ST | 29 | 1496 | 762.43 ± 733.57 |
| Turbidez | 130 | 275 | 202.50 ± 72.50 |
| NT | 156 | 1520 | 838.00 ± 682.00 |
| PO ₄ ⁻³ | 8 | 120 | 64.00 ± 56.00 |

*Todos los parámetros están expresados en mg·L⁻¹ a excepción de pH, EE: error estándar

Cantidades producidas

La Figura 1 muestra las cantidades estimadas de generación de residuos de diferentes tipos de ganado en base a la cantidad de agua estimada por animal sacrificado, sangre y residuos sólidos. De esta figura se tiene que el estado de Jalisco es el estado que genera mayor cantidad de agua residual y residuos sólidos derivado del sacrificio de ganado para consumo humano. El estado de Veracruz ocupa la quinta posición en producción de aguas residuales y residuos sólidos derivado de la industria cárnica. El estado que produce menores cantidades de desechos y efluentes residuales es Baja California Sur.

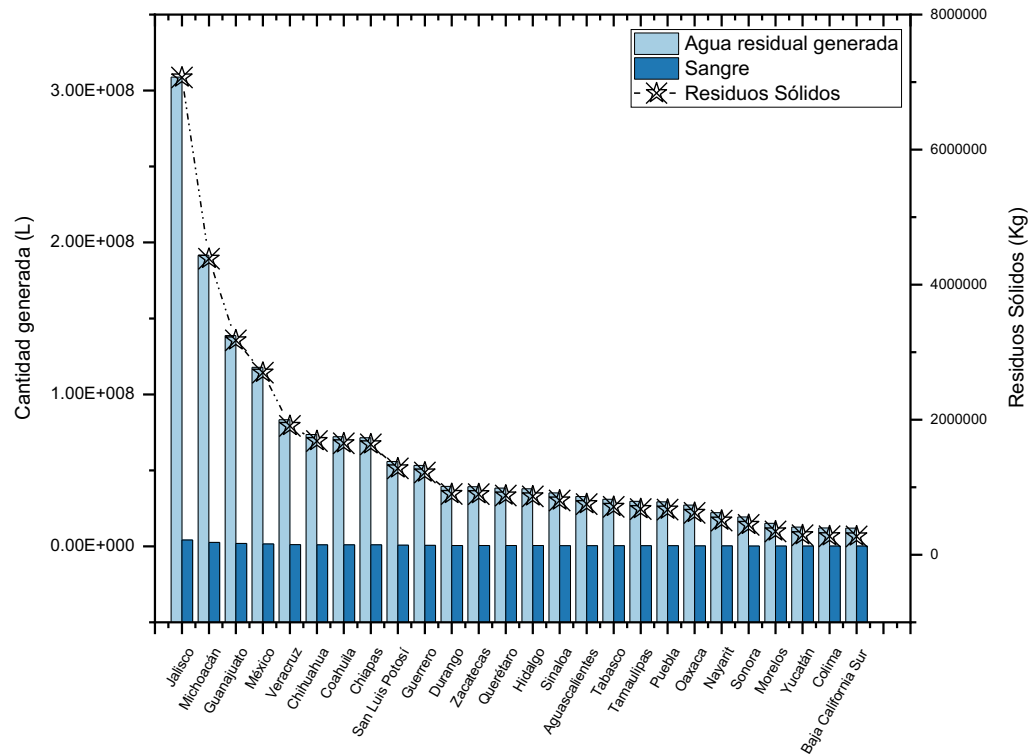


Figura 1. Residuos generados por el sacrificio de ganado en 2022.

Legislación existe

Las aguas residuales de rastros municipales han sido consideradas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) como las aguas residuales más peligrosas para la naturaleza y los seres vivos (Yetilmezsoy *et al.*, 2022). La descarga de este tipo de efluentes puede causar la desoxigenación de ríos, lagos, arroyos y la contaminación de otros cuerpos receptores naturales (Wizor y Nwankwoala, 2019). El tratamiento anaeróbico es el más utilizado debido a la gran cantidad de materia orgánica contenida en este tipo de efluentes (Khawer *et al.*, 2022). Sin embargo, normalmente, el tratamiento anaeróbico no es suficiente para una eliminación completa de la carga orgánica contenida en el efluente por lo que es necesario un post-tratamiento basado en sistemas aeróbicos (Aziz *et al.*, 2022). Por las propiedades fisicoquímicas de este tipo de efluentes, se recomienda no utilizar procesos anaeróbicos o aeróbicos de manera individual, ya que la descarga de efluentes debe cumplir con los límites y estándares establecidos por las diferentes organizaciones mundiales sobre descargas de aguas residuales (Musa y Idrus, 2021).

Los estándares y lineamientos son una parte esencial para abordar el efecto ecológico de las aguas residuales de los mataderos municipales en el marco industrial y comercial (Preisner *et al.*, 2020). La Figura 2 presenta los límites estándar permitidos para la descarga de efluentes de aguas residuales de mataderos municipales establecidos por el Banco Mundial, la Organización Ambiental de Canadá (2001-2012), el Consejo Ambiental Australiano (ANZECC, 2000), Calidad Ambiental de Malasia (2009) y las Comunidades Europeas (CCA, 1999), además de otras instancias.

Los límites de contaminantes permitidos de las aguas residuales y la legislación correspondiente cambian según el tipo de aguas residuales (alimentarias, agrícolas, industriales, etc.) (Parida *et al.*, 2021).

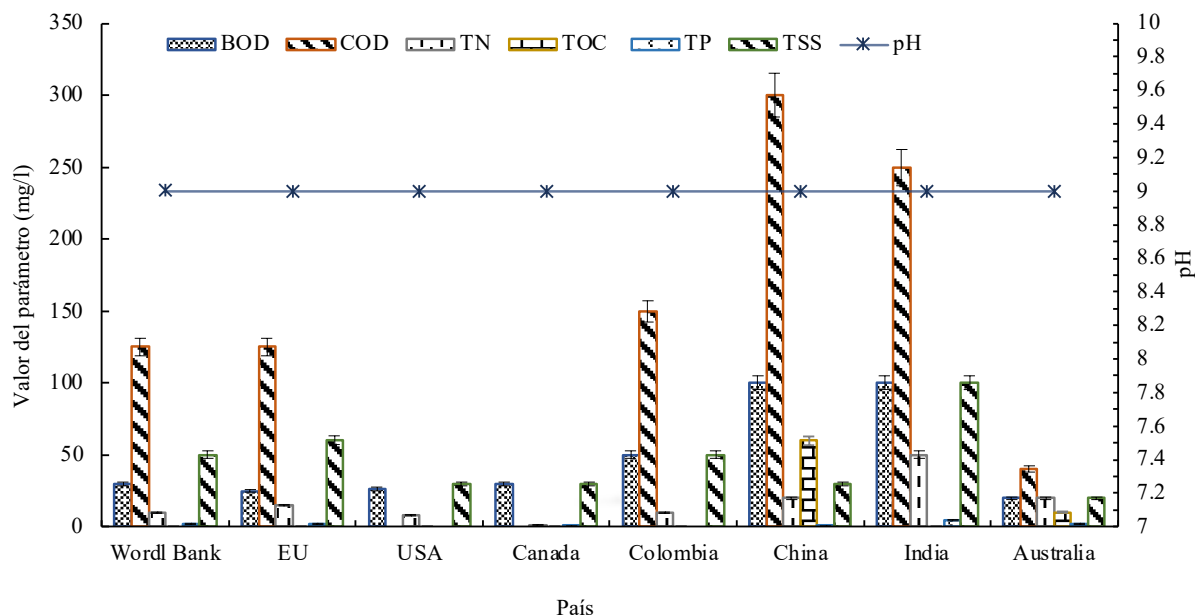


Figura 2. Comparación entre los límites estándar de varios países para la descarga de aguas residuales de los mataderos.

Tabla 2. Regulación ambiental aplicable a las aguas residuales de rastros.

| Regulación ambiental | Instrumento | Objetivo |
|----------------------|--|--|
| Nacional | Constitución Política Mexicana | Establece el derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar |
| | Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) | Propicia el desarrollo sustentable y establecer las bases para el cuidado del medio ambiente |
| | Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) | Regulación de residuos |
| | NOM-194-SSA1-2004 | Especificaciones técnicas que deben considerarse en un rastro, para abasto, almacenamiento, transporte, expendio; y las especificaciones sanitarias de los productos |
| | NOM-161-SEMARNAT-2011 | Criterios para Residuos clasificarlos y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo |
| | NOM-052-SEMARNAT-2005 | Identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos |
| Regional | NOM-002-ECOL-1996 | Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal |
| | NOM-001-SEMARNAT-2021 | Establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación |
| | Leyes Orgánicas Municipales | Señalan al servicio público de rastros como una atribución del municipio |
| Local | Ley de Salud Pública de los Estados | Establece que corresponde al estado en materia de salubridad local, la regulación, control y fomento sanitario de los rastros |
| | Reglamento del Rastro del Municipal | Regula todo lo relacionado con la operación de este servicio público |

De acuerdo con la Figura 2, el nivel más estricto de los límites estándar de contaminantes permitidos entre los estándares abordados son las pautas de las regulaciones canadienses y las establecidas por los Estados Unidos, mientras que los requisitos más bajos los establece el Ministerio de Medio Ambiente de la República Popular China, Protección y la Junta Central de Control de la Contaminación de la India. Los límites que tienen un mayor intervalo de tolerancia son los establecidos por Canadá. El margen permitido por las normas ambientales brinda un área de oportunidad para el uso de tecnologías basadas en la naturaleza (aeróbicas y/o anaeróbicas) con el propósito de minimizar los contaminantes característicos de este tipo de efluentes y al mismo tiempo obtener productos secundarios como como biogás (Baker *et al.*, 2021).

La Tabla 2 presenta los principales organismos reguladores de residuos procedentes de rastros municipales y el objetivo de su aplicación en México. Tal como se observa en la Tabla 2, ha habido avances en la transición de las políticas públicas del país hacia el modelo de sustentabilidad, y estos avances están sustentados en bases legales, marcos institucionales y órganos de gobierno. Desde sus inicios hasta la década de 1980, el dinamismo del marco jurídico contribuyó a la consolidación de leyes en México. En esta época, en 1988, se promulgó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la cual ha servido como fundamento para la implementación de la política ambiental desde entonces. Los instrumentos creados finalmente definieron el marco jurídico general para la regulación de los residuos en nuestra nación a nivel federal, el cual se basa en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los reglamentos correspondientes y las Normas Oficiales Mexicanas que aplican a través de todos los niveles de gobierno.

Procesos de tratamiento

En la Tabla 3 se aborda información sobre diferentes tecnologías aerobias y anaerobias basadas en la naturaleza utilizadas en los últimos 20 años en el tratamiento y manejo de aguas residuales de rastros municipales en México, involucrando la zona de estudio, tipo de tratamiento, eficiencias de remoción de contaminantes, etc. La Tabla muestra algunos de los tratamientos que se han desarrollado con la finalidad de resolver esta problemática ambiental.

La mayoría de las tecnologías mencionadas en la Tabla 3 aún no se convierten en una tecnología asequible para rastros municipales en comunidades rurales de bajos ingresos o con dispersión geográfica, como es el caso de múltiples ciudades de países en vías de desarrollo como es el caso de México, donde el 97.7% del total de las localidades del país se consideran rurales y se clasifican con un índice de marginación alta.

Dado las bondades y los excelentes resultados obtenidos al emplear soluciones basadas en la naturaleza como humedales de tratamiento se han convertido en una solución adecuada para tratar diferentes aguas residuales de origen doméstico e industriales, el uso de este tipo de tecnologías se ha extendido considerablemente, recientemente se han utilizado en el tratamiento de escorrentías pluviales, aguas residuales agrícolas, aguas hospitalarias, lixiviados de vertederos, y aguas residuales industriales, como por ejemplo, industria azucarera, granjas de cerdos y la industria de cárnicos (Vymazal *et al.*, 2021).

Estos tipos de aguas residuales contienen concentraciones de contaminantes similares a las procedentes de rastros municipales, por lo que, estos estudios realizados posicionan las soluciones basadas en la naturaleza como una alternativa a explorar en el tratamiento de aguas residuales de rastros municipales (Sharma *et al.*, 2023).

En vista de lo anterior dado que los contaminantes que presentan este tipo de efluentes se han podido depurar con éxito con estas soluciones o también podrían realizarse estos tratamientos en diferentes etapas disminuyendo los costos de construcción, implementación, operación y mantenimiento y generando una propuesta más amigable con las condiciones socioeconómicas y culturales donde se encuentran los rastros municipales, que se encuentran en zonas aisladas con difícil acceso y sin acceso a servicios eléctricos básicos, por eso tienen que ser soluciones basadas en la naturaleza (Hale *et al.*, 2023).

En este sentido resulta importante y atractivo explorar estas alternativas con la finalidad de lograr una optimización de parámetros ambientales y operacionales para su posterior escalamiento y aplicación a escala real.

Tabla 3. Principales tratamientos estudiados.

| Tipo de tratamiento | Zona de México | Tamaño | Eliminación de contaminantes | Observación | Referencia |
|--|---------------------|--|---|---|---|
| Reactores anaeróbicos de manta de lodos discontinuos y de flujo ascendente (UASB) | Saltillo, Coahuila | Escala Laboratorio | El coeficiente de rendimiento, Y_p , fue de 343 y 349 ml de CH_4/g de DQO, para reactores discontinuos y reactor UASB, respectivamente. | La velocidad de formación de metano puede verse influenciada por diferentes concentraciones de DQO. | Rodríguez-Martínez <i>et al.</i> (2002) |
| Tanque de sedimentación primaria, laguna anaeróbica y un humedal construido de flujo subterráneo, en serie | Estado de Hidalgo. | Gran escala | Eficiencia de remoción de DBO_5 : 91 %, DQO: 89 % y SST: 85 %. NTK: 80%, Coliformes: 5 logs | El efluente final no pudo cumplir con las regulaciones ambientales mexicanas para conteos de coliformes fecales, demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO_5) y sólidos suspendidos totales (TSS). | Gutiérrez-Sarabia <i>et al.</i> (2004) |
| Filtro anaeróbico (AF) acoplado a un reactor por lotes secuencial (SBR) aeróbico | Celaya, Guanajuato | Escala de laboratorio | Eficiencia de remoción de DQO: 50 - 81 % | La calidad del efluente tratado cumplió con los límites exigidos por la normatividad mexicana para la descarga de aguas residuales en aguas y tierras federales | López-López <i>et al.</i> (2010) |
| Adsorción química | Toluca, México | Escala laboratorio | Eficiencia de remoción de DQO: 73%; COT: 63% Color: 84% | La adsorción química es el principal mecanismo para la adsorción de COT por los materiales zeolíticos y la adsorción física para la eliminación de DQO | Torres-Pérez <i>et al.</i> (2014) |
| Biorreactores anaeróbicos | Saltillo, Coahuila. | Escala laboratorio | Eficiencia de remoción de DQO: 90% | El potencial de generación de electricidad a partir de las aguas residuales de los mataderos es suficiente para gestionar una fracción razonable de la operación del matadero | Hernández <i>et al.</i> (2018) |
| Reactores secuenciales discontinuos (SBR) | Ciudad de México | Escala Laboratorio | Eficiencia de remoción de DQO: 54%, NT: 60% | La prefermentación no logró mejorar la biodegradabilidad; sin embargo, el tratamiento con agua cruda en condiciones ácidas produjo un efluente con calidad para ser vertido de acuerdo a la Normativa Mexicana. | Hernández-Fydrych <i>et al.</i> (2018) |
| Digestión anaeróbica | León, Guanajuato | Condiciones ambientales y de laboratorio | Eficiencia de remoción de Amoníaco: 80.4% | Las estrategias de mitigación ligera, como el uso de lodos granulares, serán efectivas al aplicar el proceso del consorcio en condiciones ambientales. | Akizuki <i>et al.</i> (2019) |
| Fotólisis (PHO) y Foto-Fenton | Toluca, México | Escala laboratorio | PHO-HSPF logró eficiencias de 84,5–91,6% y 95,8–99,9% para DQO y color respectivamente. | La fotólisis directa demostró ser el mejor tratamiento al pH de la muestra (6.4). | Garduño-Pineda <i>et al.</i> (2022) |

Tabla 4. Diferentes aplicaciones de los humedales construidos en el tratamiento de aguas residuales de mataderos

| Tipo de Humedal | Tratamiento | Tipo de agua residual | Tamaño | TRH (días) | Contaminantes removidos | Vegetación | Referencia |
|--|----------------------------|--|-------------|------------|---|---|--|
| Flujo superficial | Primario | Procesamiento de carne | Gran escala | 8.7 | Nitrógeno | <i>Maximum glyceria.</i> | Russell <i>et al.</i> (1994) |
| Flujo subterráneo | Primario | Granja lechera | Gran escala | 3 | Nitrógeno | <i>Schoenoplectus validus</i> | |
| Flujo superficial | Cuatro humedales en serie | Procesamiento de carne | Gran escala | 7 | N: 87% | <i>Maximum glyceria</i> | Van Oostrom (1995) |
| Tanque de sedimentación primaria, una laguna anaeróbica y un humedal artificial de flujo subterráneo, en serie | Terciario | Aguas residuales de matadero | Gran escala | 10.6 | DBO ₅ : 91%; DQO: 89%; SST: 85%; Coliformes: 2 to 3.5 logs | <i>Phragmites australis (junco) and Typha latifolia (cattail)</i> | Gutiérrez-Sarabia <i>et al.</i> (2004) |
| Flujo horizontal | Secundario | Aguas residuales de matadero | NR | NR | Las aguas residuales cumplen con los requisitos de protección ambiental según los contaminantes orgánicos (DBO ₅) y biogénicos (N _{total} y P _{total}) | NR | Struseviciene y Strusevicius (2006) |
| Flujo vertical | Secundario | Procesamiento de animales | Microcosmo | NR | DQO: 167 mg/L; Amoníaco: 63 mg/L; SST: 15 mg/L, en el efluente | <i>Typha latifolia</i> | Scholz (2006) |
| Flujo vertical y horizontal | Sistema serial y combinado | Aguas residuales de mataderos | Microcosmo | NR | DBO ₅ : 99.9%; DQO: 97.4%; SST: 94.9; NH ₄ -N: 99.3%; NT: 78.2% | <i>Phragmites australis</i> | Soroko (2007) |
| Flujo subterráneo horizontal | Secundario | Aguas residuales de diferente composición química. | NR | NR | N: 37 - 44% | <i>Phragmites australis</i> | Gasiunas <i>et al.</i> (2005) |
| Flujo terrestre construido | Secundario | Aguas residuales de matadero | Gran escala | 111 | DBO ₅ : 95%; SST: 72%; SDT: 81%; PT: 88%; SRP: 97%; TKN: 87%; TAN: 87% | <i>Typha latifolia</i> | Carreau R. <i>et al.</i> (2012) |
| Flujo vertical | Secundario | Aguas residuales de matadero de cerdos | Gran escala | 5 | DQO: 36%; DBO: 66%; Bacterias coliformes: 97%; Bacterias fecales: 99% | <i>Typha</i> | Pitaktunsakul <i>et al.</i> (2015) |
| Flujo subterráneo horizontal | Terciario | Aguas residuales de matadero | Gran escala | 1.16 | NH ₄ -N: 76%; NT: 48%; o-PO ₄ -P: 46%; TP: 74%; DQO: 63%; Coliformes fecales: 100% | <i>Cyperus papyrus</i> | Odong <i>et al.</i> (2015) |
| Flujo subsuperficial vertical | Primario | Aguas residuales del matadero | Mesocosmos | 5 | DBO ₅ : 50%; DQO: 55%; SST: 82%; NH ₄ -N: 26.5% | NR | Mburu <i>et al.</i> (2019) |

NR: No Reportado

Humedales construidos

Los humedales artificiales han sido ampliamente utilizados para el manejo de las aguas residuales, por lo general, este tipo de tecnología de biorremediación se utiliza después del tratamiento primario y secundario, es decir, como tratamiento terciario. En este tipo de tecnología basada en la naturaleza se utiliza vegetación, consorcios bacterianos, suelo, material poroso y otros procesos naturales que en conjunto remueven los contaminantes presentes en los efluentes a tratar (Vymazal *et al.*, 2021). Las ventajas competitivas de estos frente a otras tecnologías de tratamiento son: bajo costo de operación y mantenimiento, fácil implementación, bajo consumo energético y son inocuos para la naturaleza y los cuerpos receptores (Moreira y Dias, 2020). Hay dos tipos de humedales artificiales, y se clasifican como humedales artificiales de flujo superficial y de flujo subterráneo. Teniendo en cuenta la dirección del flujo, se dividen en dos grupos: humedales de flujo horizontal y humedales de flujo vertical. Medios filtrantes utilizados en humedales, como tezontle, grava de río, piedra, entre otros; la remoción de contaminantes en humedales de flujo subterráneo es mucho mejor en comparación con las remociones logradas con humedales de flujo superficial (Parde *et al.*, 2021). Para evitar la filtración de efluentes por el fondo, los humedales se cubren con plástico de polietileno. A fines de la década de 1960, tuvo lugar la primera implementación a gran escala de humedales construidos. En primera instancia se trataban aguas residuales domésticas y municipales, sin embargo, a lo largo de los años se ha logrado tratar aguas residuales industriales, agrícolas, hospitalarias, alimentarias, lixiviados y mataderos (Kataki *et al.*, 2021).

La Tabla 4 resume algunas de las principales aplicaciones del tratamiento de aguas residuales de mataderos a lo largo del tiempo. Uno de los estudios enumerados en la Tabla 4 evaluó la eficacia de un sistema de humedales construidos a gran escala en México para el tratamiento de aguas residuales procedentes de mataderos (Gutiérrez-Sarabia *et al.*, 2004). En la unidad de tratamiento se estableció un sistema en serie compuesto por un tanque de sedimentación, laguna anaerobia y humedal artificial. Las eficiencias totales de eliminación fueron del 91% para la DBO₅, del 89% para la DQO y del 85% para los SST. Sin embargo, el sistema de humedal, que utilizaba grava de 12 mm de tamaño, sólo consiguió reducir la materia orgánica en un 30%. Sin embargo, la presencia de plantas de *Typha latifolia* y *Phragmites australis* también ayudó a erradicar algunas bacterias, incluidos los coliformes. Los autores hacen especial hincapié en la implementación de humedales construidos como unidad de tratamiento terciario de los efluentes de rastros municipales.

Desafíos futuros

Si bien se han obtenido buenos resultados en el manejo y saneamiento de las aguas residuales de los mataderos, aún existen algunos desafíos relacionados con estas tecnologías utilizadas, por lo que a continuación se presenta una evaluación de estos tratamientos, seguida de recomendaciones que a su vez se convierten en áreas excelentes de oportunidad para futuras investigaciones de acuerdo a lo reportado por Musa y Idrus (2021):

- Se han informado numerosos estudios sobre el tratamiento de aguas residuales de mataderos aplicando soluciones basadas en la naturaleza. Aunque se ha logrado una excelente remoción de contaminantes con la digestión anaerobia y al mismo tiempo se puede generar biogás como un producto de alto valor agregado, una desventaja de este proceso es que se generan altas cantidades de carga orgánica, lo que resulta en la inhibición de la producción de biogás, y menores remociones de DQO. Se recomienda investigar la codigestión anaeróbica en la que las aguas residuales del matadero se combinan con otro sustrato orgánico (grasa y aceite) para lograr una mayor producción de biogás, en comparación con la digestión anaeróbica sola.
- El uso de humedales construidos se ha utilizado para el tratamiento de aguas residuales de mataderos, los efluentes obtenidos luego del uso de esta tecnología, en general, el agua tratada no cumple con la normatividad para ser vertida al medio ambiente. Por lo tanto, se sugiere combinar estos métodos con algunas otras técnicas basadas en la naturaleza para cumplir con la normativa aplicable antes de su descarga.
- Una de las soluciones basadas en la naturaleza más prometedoras para la biorremediación del agua de los mataderos es la combinación de técnicas aeróbicas/anaeróbicas. Estas técnicas conjuntas son más efectivas para eliminar altas concentraciones de contaminantes presentes en efluentes como las aguas residuales de los mataderos. Si estas tecnologías combinadas se complementan con alguna técnica de desinfección, los efluentes generados pueden cumplir con las normas y reglamentos para la descarga de aguas residuales.

- Un área de oportunidad importante con respecto a las soluciones basadas en la naturaleza en la biorremediación de aguas residuales de mataderos es la optimización de las técnicas que se han reportado hasta el momento, ya que hasta el momento existe literatura limitada sobre el tema. Además, es importante explorar la eliminación de otro tipo de componentes orgánicos, como compuestos farmacéuticos y microorganismos patógenos presentes. Es necesario realizar más estudios *in situ*, y la aplicación de las tecnologías existentes a gran escala.
- Es muy necesario conocer los factores ambientales que influyen en la remoción de contaminantes, se requieren estudios más detallados para identificar el mecanismo de acción de cada factor ambiental, físico-químico o biológico en este proceso y su contribución a la eficiencia del tratamiento, para su posterior escalamiento.
- Los inconvenientes de las tecnologías anaeróbicas (control de temperatura, TRH largo, lavado de lodos, entre otros) y aeróbicas (costo energético, áreas de construcción, descamación ineficiente, producción de lodos, entre otros) hacen necesaria una mayor investigación sobre residuos. materiales orgánicos, inorgánicos o celulósicos para hacer más sostenibles las tecnologías basadas en la naturaleza estudiadas.

Tabla 5. Principales limitaciones de los tratamientos aerobios y anaerobios.

| Tipo de tratamiento | | Limitaciones |
|-----------------------|-----------------------------|--|
| Tratamiento Biológico | Aerobio | <ul style="list-style-type: none"> - Altos costos de puesta en marcha debido a los dispositivos de aireación - Consume una gran cantidad de electricidad - Genera un gran volumen de lodos, que requiere procesos adicionales para tratar - Los lodos solo se pueden eliminar mediante aplicación al suelo o medios de quema. - Propenso a la inhibición de toxinas. - Una proporción desequilibrada de nutrientes (DQO:N:P) puede impedir la viabilidad |
| | Anaeróbico | <ul style="list-style-type: none"> - Altamente dependiente del clima, la geografía y la accesibilidad a grandes espacios - Largo tiempo de retención hidráulica (HRT) - Largo período de puesta en marcha - Baja eficiencia - El efluente no satisface el límite de descarga (N y P) y puede requerir un tratamiento posterior - Problemas de olor - Propenso a la inhibición de toxinas. |
| Fisicoquímico | Flotación por aire disuelto | <ul style="list-style-type: none"> - Consume una gran cantidad de electricidad - El uso de productos químicos inutiliza los lodos - Averías frecuentes - Problemas de congelación |
| | Coagulación-Floculación | <ul style="list-style-type: none"> - Utiliza una gran cantidad de productos químicos coagulantes o floculantes - Genera un gran volumen de lodos, que requiere procesos adicionales para tratar - Los lodos solo se pueden eliminar mediante aplicación al suelo o medios de quema. |
| | Electrocoagulación | <ul style="list-style-type: none"> - Consume una gran cantidad de electricidad - Escasa rentabilidad |

Conclusiones

El objetivo del presente estudio fue estimar las cantidades de aguas residuales de rastros municipales que se producen en México y dar a conocer la legislación aplicable a la disposición y descarga de estos efluentes, así como, los tratamientos que se podrían aplicar y que son asequibles desde el punto de vista técnico y económico, y oportunidades futuras para el manejo sustentable de este tipo de aguas residuales. Los humedales construidos se han convertido en una solución adecuada para tratar aguas residuales agresivas como lo son los efluentes procedentes de rastros

municipales, cuando esta tecnología se utiliza en conjunto con otras como la digestión anaerobia se ha demostrado que la calidad del efluente tratado cumple con los límites exigidos por la normatividad mexicana para la descarga de aguas residuales en aguas y tierras federales. Sin embargo, aún existen algunos desafíos relacionados con estas tecnologías utilizadas (parámetros de diseño y operación, escalamiento, procesos bioquímicos implicados, etc.) lo que a su vez se convierten en áreas excelentes de oportunidad para futuras investigaciones.

Agradecimientos y financiamiento: El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) otorgó el apoyo económico para el desarrollo del proyecto con clave: CF-2023-I-2318: “EVALUACIÓN DEL USO DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN LA NATURALEZA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PRODUCIDAS EN RASTROS MUNICIPALES DE ZONAS TROPICALES”, en la Convocatoria Ciencia de Frontera 2023, proyecto del cual deriva esta investigación.

Expresiones de gratitud: El primer autor del presente estudio agradece al Instituto Tecnológico Superior de Misantla por permitir desarrollar este proyecto en el Laboratorio de Humedales y Sustentabilidad Ambiental, y por permitirle realizar sus estudios de posgrado en el programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería perteneciente al SNP-CONACYT, y finalmente al CONAHCYT por la beca otorgada para realizar sus estudios de doctorado.

Bibliografía

- Akizuki, S., Cuevas-Rodríguez, G., & Toda, T. (2019). Microalgal-nitrifying bacterial consortium for energy-saving ammonia removal from anaerobic digestate of slaughterhouse wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 31, 100753. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.014>
- Aziz, A., Rameez, H., Sengar, A., Sharma, D., Farooqi, I. H., & Basheer, F. (2022). Biogas production and nutrients removal from slaughterhouse wastewater using integrated anaerobic and aerobic granular intermittent SBRs – Bioreactors stability and microbial dynamics. *Science of The Total Environment*, 848, 157575. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157575>
- Baker, B. R., Mohamed, R., Al-Gheethi, A., & Aziz, H. A. (2021). Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(6), 880–899. <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1721007>
- Bhunia, S., Bhowmik, A., & Mukherjee, J. (2019). Use of rural slaughterhouse wastes (SHWs) as fertilizer in agriculture: a review. *2019 International Conference on Energy Management for Green Environment (UEMGREEN)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/UEMGREEN46813.2019.9221556>
- Brennan, B., Lawler, J., & Regan, F. (2021). Recovery of viable ammonia–nitrogen products from agricultural slaughterhouse wastewater by membrane contactors: a review. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 7(2), 259–273. <https://doi.org/10.1039/D0EW00960A>
- Carreau R., VanAcker S., VanderZaag A. C., Madani A., Drizo A., Jamieson R., & Gordon R. J. (2012). Evaluation of a Surface Flow Constructed Wetland Treating Abattoir Wastewater. *Applied Engineering in Agriculture*, 28(5), 757–766. <https://doi.org/10.13031/2013.42416>
- Chowdhury, M. W., Nabi, M. N., Arefin, M. A., Rashid, F., Islam, M. T., Gudimetla, P., & Muyeen, S. M. (2022). Recycling slaughterhouse wastes into potential energy and hydrogen sources: An approach for the future sustainable energy. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101133. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101133>
- Garduño-Pineda, L., Solache-Ríos, M. J., Martínez-Miranda, V., Linares-Hernández, I., Teutli-Sequeira, E. A., Castillo-Suárez, L. A., & Soto, M. E. (2022). Photolysis and heterogeneous solar photo-Fenton for slaughterhouse wastewater treatment using an electrochemically modified zeolite as catalyst. *Separation Science and Technology*, 57(5), 822–841. <https://doi.org/10.1080/01496395.2021.1942918>
- Gasiunas, V., Strusevicius, Z., & Struseviciene, M. S. (2005). Pollutant removal by horizontal subsurface flow constructed wetlands in Lithuania. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 40(6–7), 1467–1478. <https://doi.org/10.1081/ESE-200055889>
- Gutiérrez-Sarabia, A., Fernández-Villagómez, G., Martínez-Pereda, P., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2004). Slaughterhouse Wastewater Treatment In a Full-scale System With Constructed Wetlands. *Water Environment Research*, 76(4), 334–343. <https://doi.org/10.2175/106143004x141924>
- Hale, S. E., Tann, L. von der, Rebelo, A. J., Esler, K. J., de Lima, A. P. M., Rodrigues, A. F., Latawiec, A. E., Ramírez-Agudelo, N. A., Bosch, E. R., Suleiman, L., Singh, N., & Oen, A. M. P. (2023). Evaluating Nature-Based Solutions for Water Management in Peri-Urban Areas. *Water*, 15(5), 893. <https://doi.org/10.3390/w15050893>
- Hernández-Fydrych, V. C., Castilla-Hernández, P., Beristain-Cardoso, R., Trejo-Aguilar, G. M., & Fajardo-Ortiz, M. C. (2018). COD AND AMMONIUM REMOVAL IN SBR OPERATED UNDER DIFFERENT COMBINATIONS USING PRE-TREATED SLAUGHTERHOUSE WASTEWATER. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(2), 621–631. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n2/Hernandez>
- Hernández, S. C., Jiménez, L. D., & García, J. A. B. (2018). Potential of energy production from slaughterhouse wastewater. *Interciencia*, 43(8), 558–565. <https://doi.org/https://www.redalyc.org/journal/339/33957744004/33957744004.pdf>
- Kataki, S., Chatterjee, S., Vairale, M. G., Dwivedi, S. K., & Gupta, D. K. (2021). Constructed wetland, an eco-technology for wastewater treatment: A review on types of wastewater treated and components of the technology (macrophyte, biofilm and substrate). *Journal of Environmental Management*, 283, 111986. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111986>
- Khalatbari-Limaki, S., Hosseinzadeh, S., Shekarforoush, S. S., & Berizi, E. (2020). The morphological and biological characteristics of a virulent PI phage isolated from slaughterhouse sewage in Shiraz, Iran. *Iranian Journal of Microbiology*. <https://doi.org/10.18502/ijm.v12i6.5037>
- Khawer, M. U. Bin, Naqvi, S. R., Ali, I., Arshad, M., Juchelková, D., Anjum, M. W., & Naqvi, M. (2022). Anaerobic digestion of sewage sludge for biogas & biohydrogen production: State-of-the-art trends and prospects. *Fuel*, 329, 125416. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125416>

- López-López, A., Vallejo-Rodríguez, R., & Méndez-Romero, D. C. (2010). Evaluation of a combined anaerobic and aerobic system for the treatment of slaughterhouse wastewater. *Environmental Technology*, 31(3), 319–326. <https://doi.org/10.1080/09593330903470693>
- Mburu, C., Kipkemboi, J., & Kimwaga, R. (2019). Impact of substrate type, depth and retention time on organic matter removal in vertical subsurface flow constructed wetland mesocosms for treating slaughterhouse wastewater. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 114, 102792. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.07.005>
- Moreira, F. D., & Dias, E. H. O. (2020). Constructed wetlands applied in rural sanitation: A review. *Environmental Research*, 190, 110016. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110016>
- Mozhiarasi, V., & Natarajan, T. S. (2022). Slaughterhouse and poultry wastes: management practices, feedstocks for renewable energy production, and recovery of value added products. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02352-0>
- Musa, M. A., & Idrus, S. (2021). Physical and Biological Treatment Technologies of Slaughterhouse Wastewater: A Review. *Sustainability*, 13(9), 4656. <https://doi.org/10.3390/su13094656>
- Ng, M., Dalhatou, S., Wilson, J., Kamdem, B. P., Temitope, M. B., Paumo, H. K., Djelal, H., Assadi, A. A., Nguyen-Tri, P., & Kane, A. (2022). Characterization of Slaughterhouse Wastewater and Development of Treatment Techniques: A Review. *Processes*, 10(7), 1300. <https://doi.org/10.3390/pr10071300>
- Odong, R., Kansime, F., Omara, J., & Kyambadde, J. (2015). Tertiary treatment of abattoir wastewater in a horizontal subsurface flow-constructed wetland under tropical conditions. *International Journal of Environment and Waste Management*, 15(3), 257. <https://doi.org/10.1504/IJEWMM.2015.069160>
- Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101261. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Parida, V. K., Saidulu, D., Majumder, A., Srivastava, A., Gupta, B., & Gupta, A. K. (2021). Emerging contaminants in wastewater: A critical review on occurrence, existing legislations, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105966. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105966>
- Philipp, M., Masmoudi Jabri, K., Wellmann, J., Akrouf, H., Bousselmi, L., & Geißen, S.-U. (2021). Slaughterhouse Wastewater Treatment: A Review on Recycling and Reuse Possibilities. *Water*, 13(22), 3175. <https://doi.org/10.3390/w13223175>
- Pitaktunsakul, P., Chunkao, K., Dumpin, N., & Poommai, S. (2015). Vertical-Flow Constructed Wetlands in Cooperating with Oxidation Ponds for High Concentrated COD and BOD Pig-Slaughterhouse Wastewater Treatment System at Suphanburi-Provincial Municipality. *Modern Applied Science*, 9(8), 371–385. <https://doi.org/10.5539/mas.v9n8p371>
- Preisner, M., Neverova-Dziopak, E., & Kowalewski, Z. (2020). An Analytical Review of Different Approaches to Wastewater Discharge Standards with Particular Emphasis on Nutrients. *Environmental Management*, 66(4), 694–708. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01344-y>
- Rodríguez-Martínez, J., Rodríguez-Garza, I., Pedraza-Flores, E., Balagurusamy, N., Sosa-Santillan, G., & Garza-García, Y. (2002). Kinetics of anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in batch and upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Bioresource Technology*, 85(3), 235–241. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00141-4)
- Russell, J. M., Van Oostrom, A. J., & Lindsey, S. B. (1994). Denitrifying sites in constructed wetlands treating agricultural industry wastes: A note. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 15(1), 95–99. <https://doi.org/10.1080/09593339409385408>
- SADER. (2023). *Programas de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural 2023 | Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/programas-de-la-secretaria-de-agricultura-y-desarrollo-rural-2023>
- Scholz, M. (2006). Comparison of novel membrane bioreactors and constructed wetlands for treatment of pre-processed animal rendering plant wastewater in Scotland. *European Water Management Online*, 1–14.
- SENASICA. (2023). *Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria | Gobierno | gob.mx*. <https://www.gob.mx/senasica>
- Sharma, K. S., Panchalv, K., Chhimwal, M., & Kumar, D. (2023). Integrated Detection and Natural Remediation Technology as a Low-Cost Alternative for Wastewater Treatment. *Health Sciences Review*, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hsr.2023.100111>
- Soroko, M. (2007). Treatment of wastewater from small slaughterhouse in hybrid constructed wetlands systems. *Ecology and Hydrobiology*, 7(3–4), 339–343. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70117-9](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70117-9)
- Torres-Pérez, J., Solache-Ríos, M., & Martínez-Miranda, V. (2014). Chemical oxygen demand, total organic carbon and colour reduction in slaughterhouse wastewater by unmodified and iron-modified clinoptilolite-rich tuff. *Environmental Technology*, 35(12), 1541–1548. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.872198>
- Van Oostrom, A. J. (1995). Nitrogen removal in constructed wetlands treating nitrified meat processing effluent. *Water Science and Technology*, 32(3). [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00614-1](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00614-1)
- Vymazal, J., Zhao, Y., & Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106318>
- Wizor, C. H., & Nwankwoala, H. O. (2019). Effects of Municipal Abattoir Waste on Water Quality of Woji River in Trans-Amadi Industrial Area of Port Harcourt, Nigeria: Implication for Sustainable Urban Environmental Management. *International Journal of Geography and Geology*, 8(2), 44–57. <https://doi.org/10.18488/JOURNAL.10.2019.82.44.57>
- Yetilmezsoy, K., Dinç-Şengönlü, B., İlhan, F., Kıyan, E., & Yüzer, N. (2022). Use of sheep slaughterhouse-derived struvite in the production of environmentally sustainable cement and fire-resistant wooden structures. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132948. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132948>
- Ziara, R. M. M., Li, S., Subbiah, J., & Dvorak, B. I. (2018). Characterization of Wastewater in Two U.S. Cattle Slaughterhouses. *Water Environment Research*, 90(9), 851–863. <https://doi.org/10.2175/106143017X15131012187971>