

Uso de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes de ganado porcino: Revisión de Literatura

José Fernando Narváez Castillo

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras
Noviembre, 2020

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Uso de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes de ganado porcino: Revisión de Literatura

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para
optar al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

José Fernando Narváez Castillo

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2020

Uso de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes de ganado porcino: Revisión de Literatura

José Fernando Narváez Castillo

Resumen. La producción porcina genera una gran cantidad de efluentes, los cuales presentan un alto contenido de materia orgánica y nutrientes. Para el tratamiento de estos, se han desarrollado múltiples alternativas, dentro de las cuales se encuentran los humedales artificiales (HA), que integran procesos físicos, químicos y biológicos para la remoción de contaminantes. La presente investigación se enfocó en recopilar evidencia documentada sobre la aplicabilidad de los humedales artificiales para el tratamiento de efluentes porcinos. Se encontró que el desempeño del tratamiento está ligado a factores como la temperatura, el tiempo de retención hidráulica, los medios filtrantes, la vegetación y el sistema de flujo del humedal. Al operar en condiciones óptimas se alcanzan eficiencias de remoción entre 71 al 91% de Demanda Química de Oxígeno (DQO), de 21 al 80% para Nitrógeno Total (NT) y 67 al 91% para Fósforo Total (PT). Además, los HA tienen el potencial de remover metales, antibióticos y microorganismos patógenos presentes en efluentes porcinos. En esta industria se utilizan los HA como tratamiento secundario o terciario, ya que las altas concentraciones de materia orgánica y sólidos en suspensión características de este tipo de efluentes disminuyen la eficiencia de remoción que presentan los HA. Para su implementación, es necesario configurar diferentes etapas de tratamiento, incluyendo procesos de digestión anaerobia y separación de sólidos para reducir la carga de los contaminantes mayoritarios y mejorar el desempeño de los HA.

Palabras clave: Agua residual porcina, biorremediación, eficiencia de remoción, nutrientes.

Abstract. Pig production generates a large amount of effluent, which has a high content of organic matter and nutrients. Multiple alternatives have been developed to treat these effluents, among this are Artificial Wetlands (AW), which integrate physical, chemical, and biological processes for pollutant removal. This research was focused on gathering documented evidence on the applicability of constructed wetlands for the treatment of swine effluents. Treatment performance was found to be linked to factors such as temperature, hydraulic retention time, filter media, vegetation, and the flow system of the wetland. Under optimal conditions, reduction efficiencies of 71 to 91% for Chemical Oxygen Demand (COD), 21 to 80% for Nitrogen and 67 to 91% for Phosphorus are reported. In addition, AW have the potential to remove metals, antibiotics and pathogenic microorganisms present in swine effluents. The swine industry uses AW as secondary or tertiary treatment since the high concentrations of organic matter and suspended solids characteristic of this type of effluent affects its removal efficiency. For its implementation, it is necessary to configure different treatment stages, including systems such as anaerobic digestion and solids separation, to reduce the load of major pollutants and improve the performance of AW.

Key words: Bioremediation, nutrients, removal efficiency, swine wastewater.

ÍNDICE GENERAL

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Índice General	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexo	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	5
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	7
4. CONCLUSIONES.....	25
5. RECOMENDACIONES.....	26
6. LITERATURA CITADA	27
7. ANEXOS	34

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXO

Cuadros	Página
1. Palabras clave y resultados del buscador.....	6
2. Descripción de los materiales filtrantes en cada humedal.....	9
3. Composición de los tratamientos.....	10
4. Eficiencia de humedales artificiales en remover materia orgánica y nutrientes de efluentes porcinos.....	14

Figuras	Página
1. Diagrama de tratamiento (biodigestor + HSS-H).....	22
2. Diagrama de tratamiento (biodigestor + HSS-V).....	22
3. Diagrama de tratamiento (reactor + HSS-V + HSS-H).....	23
4. Diagrama de tratamiento (biodigestor + HSS-V en serie + HSS-H).....	24

Anexo	Página
1. Normativa de descarga de aguas residuales en Ecuador.....	34

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales son el producto de desecho líquido proveniente de actividades domésticas, industriales y agrícolas. En su mayoría, se descargan en el ambiente directamente y sin ningún tratamiento, contribuyendo al deterioro del suelo y el agua (J. González, 2010). La composición de las aguas residuales depende del proceso productivo que las genera y pueden contener materia orgánica, nutrientes, microorganismos patógenos y, en algunos, casos sustancias peligrosas (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP], 2017).

Una de las principales actividades a nivel mundial es la producción porcina, contando en el 2017 con 970,538,517 cabezas (División de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAOSTAT], 2020). Este rubro genera efluentes que contienen una alta cantidad de materia orgánica y nutrientes, conforme a la cantidad de animales y etapas productivas (B. Gallo y Gallo, 2016). Los purines son definidos como residuos orgánicos que se producen en la industria ganadera (Muelas, 2017). En las granjas porcinas, la composición del purín se encuentra determinada por la cantidad de sólidos, los cuales provienen de heces fecales, residuos de alimentos y en algunos casos, el material que compone las camas (por lo general aserrín). Estos se mezclan con el agua que se usa para el lavado de corrales, los bebederos y agua lluvia cuando la producción es a cielo abierto (B. Gallo y Gallo, 2016).

El 95% de los purines es agua y presenta altas concentraciones de algunos parámetros como: Nitrógeno Total (NT), Fósforo Total (PT), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Según Garzón-Zúñiga y Buelna (2014) la concentración de los contaminantes presentes en los efluentes porcinos varían de acuerdo a la cantidad de animales que posee la granja. Encontrando que granjas pequeñas, menores a 2,500 cerdos, presentan en su efluente una concentración de 996 a 1,697 mg/L de DBO, de 3,478 a 9,300 mg/L de DQO, de 524 a 1,179 mg/L de NT, de 24.4 a 214 mg/L de PT y de 942 a 19,857 mg/L de SST. En el caso de granjas medianas de 2,500 a 7,999 cerdos, el efluente presenta concentraciones de 1,657 a 9,188 mg/L de DBO, de 3,339 a 38,544 mg/L de DQO, de 550 a 2,033 mg/L de NT, de 28.6 – 180.1 mg/L de PT y de 1,130 a 25,166 mg/L de SST. Finalmente, las granjas grandes, que tienen más de 8,000 cerdos, presentan efluentes con concentraciones de 6,092 a 15,061 mg/L de DBO, de 34,310 a 40,498 mg/L de DQO, de 1,048 a 1,666 mg/L de NT, de 97.6 a 430.1 mg/L de PT y de 25,034 a 42,500 mg/L de SST.

La descarga de los efluentes se realiza directamente en terrenos como potreros, o en cuerpos de agua como ríos y red de alcantarillado entre otros; esta es una práctica común en diversos lugares, siendo los cuerpos de agua los principales receptores (Dúran, Balsa y Cárdenas, 2020). La descarga directa de estos residuos líquidos puede contribuir con la eutrofización, degradación de ambientes acuáticos, problemas con la salud humana, y los microorganismos pueden presentar resistencia a antibióticos. De igual forma, puede contaminar cuerpos de agua subterráneos mediante lixiviación e infiltración (Blanco, 2017). Por tal motivo, cada país cuenta con una norma técnica que fija los parámetros presentes en aguas residuales y sus límites máximos de descarga. Algunos parámetros establecidos en las normativas son la DBO, DQO, SST, NT, PT y coliformes fecales.

La DQO es un indicador utilizado para determinar la Materia Orgánica (MO) en el efluente y se calcula a partir de la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar este contaminante mediante reacciones químicas (Garaycochea, 2020). Otro indicador de la MO es la DBO, la cual es calculada con base en la cantidad de oxígeno necesario para degradar la MO por medio de procesos biológicos, realizados por los microorganismos en condiciones aerobias (Huerta, 2019). Es importante mencionar estos parámetros, ya que los contaminantes asociados a estos pueden ocasionar una desoxigenación del cuerpo hídrico receptor (R. Mayta y Mayta, 2017).

El nitrógeno total es la sumatoria de nitrógeno orgánico e inorgánico presente en el efluente, de igual forma, para el fósforo total se suma la cantidad de fósforo en forma orgánica e inorgánica. Tales nutrientes pueden provocar eutrofización en los cuerpos receptores, afectando en la calidad del agua de estos (Huanca y Flores, 2020). Finalmente, los coliformes fecales se encuentran en aguas residuales y pueden provocar efectos negativos a la salud humana, ya que se asocian con la presencia de microorganismos patógenos y pueden afectar los ecosistemas en donde son descargados (L. Ramos-Ortega, Vidal, Vilarly y Saavedra-Díaz, 2008).

Para el cumplimiento de las normativas que regulan la descarga en cuerpos receptores, la industria porcícola utiliza varios tratamientos. La selección de estas alternativas depende del tamaño de la granja, que a su vez influye en el volumen del residuo y la concentración de contaminantes presentes. Entre las más comunes se han identificado los sistemas de separación de sólidos, la digestión anaerobia (biodigestores), lagunas de estabilización, lodos activados y humedales artificiales. Cada sistema tiene ventajas y desventajas, y requiere de diferentes factores para su correcto funcionamiento.

La digestión anaerobia es uno de los tratamientos más usados en la industria porcícola, el cual consiste en la degradación de la materia orgánica proveniente de las aguas residuales, mediante procesos bioquímicos que ocurren en ausencia de oxígeno dentro de un biodigestor. Una de las ventajas de los biodigestores es el valor de los subproductos del proceso (biogás, biol y lodos digeridos), que pueden ser utilizados dentro de la granja o en sistemas productivos aledaños (Fernández, 2018). Las lagunas de estabilización son sistemas de tratamiento pasivo utilizados para remoción de MO y sólidos en suspensión mediante la acción de microorganismos (Nuñez y Fragoso-Castilla, 2020). Se presentan en tres tipos: anaerobias, facultativas y de maduración, generalmente configuradas en serie. Aunque su costo de construcción y mantenimiento es bajo, requieren de mucho espacio para su correcto funcionamiento (Cortés-Martínez et al., 2017).

De igual forma, los lodos activados son empleados para reducir MO y SST dependiendo de su configuración, pero presentan altos costos de construcción y mantenimiento por el uso de energía y otros insumos (C. Ramos, 2017). Finalmente, los humedales artificiales permiten lograr una buena calidad de agua conforme a algunas normativas: estos presentan bajos costos energéticos y de mantenimiento, y los requerimientos del terreno se asocian a las características del efluente a tratar (Arteaga-Cortez et al., 2019). En la actualidad, estos últimos se han incorporado como un tratamiento secundario o terciario para efluentes de granjas porcícolas. De acuerdo con Nagabhatla y Metcalfe (2018) estos sistemas promueven el desarrollo de reacciones físicas, químicas y biológicas para reducir contaminantes en aguas residuales provenientes de la producción porcícola. Los humedales artificiales se construyen para replicar los procesos que ocurren en los naturales. Su estructura incorpora una capa impermeable, que evita la pérdida del efluente, un medio poroso, que permite la reducción de sólidos presentes en el agua, donde; los microorganismos y la parte

vegetativa se encargan de la degradación de nutrientes que se encuentren en el afluente y culminando con las zonas de entrada y salida para el agua a tratar (Vymazal, 2018).

La correcta selección de los materiales para la construcción de humedales garantizará la eficiencia del sistema en remoción de contaminantes. En algunos casos, se utilizan materiales orgánicos como la casulla de arroz, que sirve como fuente de energía para los microorganismos. La vegetación también es un factor determinante en el desempeño de los humedales artificiales, ya que permite la remoción de materia orgánica y nutrientes de las aguas residuales. Esta debe responder positivamente a las condiciones climáticas del lugar, y a la concentración de nutrientes presentes en el efluente. Es recomendado el uso de vegetación proveniente de humedales naturales (Arias, Betancur, Gómez, Salazar y Hernández, 2010). Para iniciar el tratamiento del efluente, la vegetación necesita un tiempo de adaptación. Se estima un período de un mes antes de comenzar a ver los resultados del tratamiento (Solís, López, Bautista, Hernández y Romellón, 2016).

El flujo de agua es otro factor determinante en el proceso, pudiendo ser superficial o subsuperficial. En el humedal de flujo superficial o libre (HS), el efluente atraviesa los tallos, y se encuentra expuesto a la atmósfera. Por otro lado, en el humedal de flujo subsuperficial (HSS), el efluente circula por un medio granular en contacto con las raíces y rizomas, clasificándose en flujo vertical y horizontal (Delgadillo, Camacho, Péres y Andrade, 2010). Los HS se utilizan en el tratamiento complementario de efluentes, es decir, depuran contaminantes presentes en efluentes que ya pasaron por un tratamiento previo al humedal. Por otro lado, los HSS se diseñan tanto para el tratamiento complementario de efluentes como para su tratamiento directo, es decir, puede ingresar aguas residuales crudas (Tilley et al., 2018).

El Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es un factor determinante en los humedales artificiales debido a que es el período en el cual el efluente está en contacto con el tratamiento. Para dimensionar el humedal se considera el TRH, el cual depende de la concentración de contaminantes presentes en el efluente. Se estima que, a mayor tiempo de retención hidráulica se obtienen mayores eficiencias de remoción (Ghosh y Gopal, 2010). Según Asprilla, Ramírez y Rodríguez (2020) a mayor concentración del contaminante presente en el efluente, el TRH debe incrementar. Sin embargo, este varía de acuerdo con los sistemas de flujo, por ejemplo, en un humedal de flujo horizontal el TRH se encuentra dentro del rango de cuatro y 15 días, mientras que, con humedales de flujo vertical, el TRH varía de dos a seis horas, debido a su menor área y su funcionamiento por ciclos.

Actualmente, los humedales artificiales se han estado implementando de manera consistente en el campo agropecuario y agroindustrial. Por ejemplo, Rivas (2019) los incorporó a la depuración de lixiviados agrícolas recolectados en un invernadero, reportando eficiencias de remoción de un 73% en nitrógeno y un 82% de fósforo. El humedal se construyó con grava, arena, una capa de bambú y *Heliconia psittacorum*. Esta unidad de tratamiento presentó mayor eficiencia de remoción a comparación de la unidad de tratamiento que no incorporó la capa de material orgánico (bambú). En la agroindustria, López (2016) realizó un estudio donde se evaluó la remoción de nitrógeno, fosfatos y sólidos volátiles de aguas provenientes de plantas de procesamiento de alimentos, utilizando humedales artificiales como complemento de un tratamiento de fosa séptica y un Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA). El estudio determinó que existe una mayor remoción en fosfatos y nitrógeno total, cuando se alimenta con el efluente proveniente del FAFA, pero reduce a mayor cantidad los sólidos volátiles cuando se usa el efluente de la fosa séptica.

Finalmente, el uso de humedales en la industria porcina alcanzó eficiencias de remoción del 68% para DBO, 88% para nitrógeno total y hasta 98% de fósforo total. El humedal artificial fue construido a base de diferentes sustratos, los cuales sirvieron para el sostén de plántulas de berro (*Nasturtium officinale*). El efluente porcino provenía de una granja comunal, utilizando una fosa séptica como tratamiento primario antes de alimentar el humedal. El efluente presentó concentraciones promedio de 737 mg/L en DQO, 283 mg/L de NT y 50 mg/L de PT. La eficiencia de remoción antes mencionada fue observada a las tres semanas del inicio del experimento, con un TRH de 24 horas, y el uso de plántulas que tenían 4 meses (Sifuentes, 2018).

Se espera que la industria porcina aumente con el transcurso de los años y este proceso ocasionará que se genere una mayor cantidad de residuos líquidos, por lo que es necesario contar alternativas efectivas para mitigar el impacto al ambiente. Debido a las características que presenta el efluente proveniente de esta actividad, los humedales artificiales representan una tecnología aplicable para el tratamiento de estos, ya que se reduce principalmente la carga de contaminantes como materia orgánica, sólidos en suspensión, nitrógeno y fósforo total. En este contexto, el presente documento contiene una revisión de literatura sobre la aplicabilidad de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales generadas en granjas porcinas, fundamentando su desempeño en el análisis de la eficiencia en remoción de contaminantes mayoritarios. Para esto, se plantearon los siguientes objetivos:

- Identificar los factores que limitan el desempeño de los humedales artificiales para el tratamiento de efluentes porcinos.
- Analizar la eficiencia documentada de humedales artificiales en la remoción nutrientes y materia orgánica presentes en el efluente de ganado porcino.
- Proponer la configuración de unidades de tratamiento para efluentes porcinos que favorezca la implementación humedales artificiales.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación es de carácter cualitativo y recopila evidencia sobre humedales artificiales como alternativa de tratamiento para aguas residuales porcinas a través de una revisión de literatura. A partir de la información obtenida se analizó el estado actual sobre el uso de estos sistemas, enfocando la investigación en factores que influyen sobre el desempeño de este tratamiento, eficiencias de remoción de contaminantes y configuración de tratamientos para efluentes porcinos que integren el uso de humedales. La búsqueda de información se realizó a través de Google académico, recopilando documentación a través de diferentes bases de datos, principalmente “ScienceDirect”, “Springer Link” y “Scielo”. Adicionalmente, se consultó literatura secundaria como: tesis y artículos de revisión, que permitió obtener referencias de literatura primaria para el desarrollo de los resultados.

La selección de artículos se fundamentó en el análisis de resúmenes que desarrollan la temática de humedales, factores que influyen en el proceso depurativo y la aplicabilidad en la reducción de contaminantes presentes en las aguas residuales. También, se incluyeron artículos en los que se describe sistemas de tratamiento la incorporación de humedales artificiales. Se consideró la selección de publicaciones que oscilan entre el 2005 y 2020, las cuales provienen de diferentes revistas entre las cuales remarcan: “Environmental Science and Pollution Research”, “Ecological Engineering”, “Science of the Total Environment” y “Water Science and Technology”, siendo estas de las que se escogió un mayor número de documentos. Los artículos seleccionados fueron agrupados en tres secciones de acuerdo con la temática y contenido desarrollado, para la incorporación de hallazgos en esta investigación.

En la primera sección se agruparon los artículos que contienen información relevante sobre los parámetros que influyen durante el proceso de remoción de contaminantes. En esta sección se encuentran un total de 19 artículos. Dentro de la segunda sección se cuenta con 16 publicaciones, en las cuales se documenta las eficiencias que presentan los humedales artificiales removiendo contaminantes presentes en los efluentes porcinos, enfocándose principalmente en la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Finalmente, la sección número tres se encuentra compuesta de seis artículos, los cuales contienen información acerca de la configuración de sistemas de tratamiento en los cuales se integran humedales artificiales para aguas residuales provenientes de granjas porcinas. Para la búsqueda de estos artículos se realizó mediante el uso de palabras clave que se describen a continuación (Cuadro 1).

Es importante mencionar que el buscador proporcionó diversos resultados, incluyendo artículos con efluentes de áreas domésticas o de otras industrias. Para fines de esta investigación, solo se seleccionaron aquellos documentos que se referían a efluentes de ganado porcino, especificando eficiencias de remoción para materia orgánica y nutrientes. El análisis de la literatura permitió la comprensión del estado de la técnica y permitió la identificación de oportunidades para futuras investigaciones.

Cuadro 1. Palabras clave y resultados del buscador.

Palabra clave	Número de publicaciones encontradas	Número de publicaciones utilizadas
Efecto de temperatura + humedales artificiales + efluentes porcinos	583	2
Efecto de temperatura + humedales artificiales + efluentes porcinos	13,600	4
Tiempo de retención hidráulica + humedales artificiales + efluentes porcinos	970	3
Sustratos + humedales artificiales + efluentes porcinos	1,703	3
Vegetación + humedales artificiales + efluentes porcinos	3,800	3
Humedales artificiales de flujo subsuperficial + efluentes porcinos	4,410	3
Humedales artificiales de flujo superficial + efluentes porcinos	1,510	1
Eficiencia + humedales artificiales + efluentes porcinos	16,500	16
Sistemas de tratamiento + humedales artificiales + efluentes porcinos	12,200	6

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factores influyentes en el desempeño de humedales artificiales

Los efluentes provenientes de granjas porcinas contienen alta carga de materia orgánica y nutrientes. La materia orgánica está representada por la concentración de DBO y DQO presentes en el efluente. Los nutrientes que se encuentran en mayor cantidad son el nitrógeno y el fósforo, que generalmente se identifican como NT y PT, respectivamente.

Akratos y Tsihrintzis (2007) indican que los humedales artificiales integran diferentes procesos que permiten la remoción satisfactoria de los contaminantes antes mencionados. Sin embargo, Kotti, Gikas y Tsihrintzis (2010) plantearon que el proceso de remoción realizado por los humedales artificiales se encuentra influenciado por varios factores, entre los cuales la temperatura, el tiempo de retención hídrica (TRH), la composición del humedal, el tipo de vegetación y el sistema de flujo influyen principalmente durante este proceso. A continuación, se detalla cómo influyen cada uno de los factores en la remoción de contaminantes presentes en efluentes de ganado porcino.

Temperatura. Según Stein y Hook (2005) la temperatura es uno de los factores ambientales que más influye en el proceso depurativo de los humedales. Esto se debe a que los cambios bruscos de este parámetro provocan el deterioro de la vegetación; además, las temperaturas bajas evitan que las bacterias nitrificantes se reproduzcan o realicen sus funciones metabólicas. Huang, Cai, Zhong y Wang (2013) reportaron que a una temperatura ambiental de 10 °C, la eficiencia en remover nitrógeno se redujo en un 30%, mientras que los valores máximos se mostraron en verano. Dichos resultados fueron observados, cuando los humedales fueron alimentados con efluentes que tuvieron un tratamiento primario.

En adición a las condiciones ambientales, la remoción de contaminantes en los humedales está influenciada por la temperatura del efluente. Se evaluó el efecto de esta variable utilizando un efluente que provenía de granjas porcinas, el cual fue tratado previamente en un biodigestor. Se reportó que al registrar un valor de 21 °C en el efluente, la concentración de DBO se redujo un 76%, mientras que cuando esta descendió a 14 °C, solo se eliminó solo un 37% de la concentración. En el caso del nitrógeno total, se registró que cuando el efluente estuvo a 22 °C se removió un 82%, mientras que a 13 °C solo se redujo un 42%. Estos resultados muestran que la eficiencia de remoción es directamente proporcional a la temperatura del efluente, es decir, que cuando la temperatura de este sube, la remoción de los contaminantes aumenta (De la Mora-Orozco, Saucedo-Terán, Gonzáles-Acuña, Gómez-Rosales y Flores-López, 2020).

Mietto, Politeo, Breschigliaro y Borin (2015) argumentan que temperatura del agua está correlacionada al porcentaje de reducción tanto de NT y nitrógeno de nitratos (NO₃-N). Se estima que en temperaturas bajas del efluente se puede eliminar alrededor de 1.7 a 2.0% con cada grado centígrado que incrementa. Por otra parte, cuando la temperatura es superior a los 14 °C, se espera que con el aumento de la temperatura la remoción incrementa en un 6.6% especialmente en la eliminación de NO₃-N.

De acuerdo con la literatura, la temperatura ambiental y del efluente influyen directamente en el desempeño de los humedales. Bajas temperaturas pueden reducir la eficiencia en la remoción de contaminantes. Esto se debe a que este factor influye en los procesos microbiológicos, ocasionando un menor crecimiento de los microorganismos que se encargan de la reducción de ciertos contaminantes. Además, se encontró que pueden afectar a las plantas presentes en los humedales, lo cual provoca menores eficiencias reduciendo nutrientes. Por lo cual, mayores temperaturas para el humedal sin que estas superen los 30 °C pueden mejorar el proceso de remoción tanto de materia orgánica y nutrientes presentes en efluentes porcinos.

Tiempo de retención hidráulica (TRH). En el estudio realizado por L. González-Ángel, Muñoz-García, Gómez-Garrido, Terrero y Faz-Cano (2015), se evaluó la eficiencia de humedales artificiales con dos tiempos de retención hidráulica, tres y siete días, para remover materia orgánica, nitrógeno y fósforo presentes en efluentes porcinos. El efluente porcino pasó por un separador de fases antes de ingresar al humedal. Este fue construido con grava y se plantó carrizo (*Phragmites australis*) a una densidad de 10 plantas/m². Se registró una concentración de 5,123.3 mg/L de DQO, 960 mg/L de NTK y 67.4 mg/L PT en el efluente utilizado para operar con un TRH de siete días, obteniendo una remoción del 34% de DQO, 35% de NTK y 14% de PT; por otra parte el efluente utilizado para tres días de TRH presentó una concentración de 4,372.2 mg/L de DQO, 1,000 mg/L de NTK y 73.9 mg/L de PT alcanzando eficiencias de remoción de 12% de DQO, 13% de NTK y 40.5% de PT. El estudio registró las mejores eficiencias de remoción de materia orgánica y nitrógeno cuando aumentó el TRH, mientras que el caso del fósforo se encontró mayor eficiencia de remoción a menores tiempos de retención hidráulica.

Por otra parte, F. Fia, Matos, Fia, Borges y Cecon (2016), evaluaron la influencia de dos tiempos de retención hídrica en humedales, de 11.8 y 12 días, en la remoción de materia orgánica y nutrientes presentes en efluentes porcinos. El efluente fue sometido a decantación antes de ingresar al humedal, y el afluente de este último contenía 777 mg/L de DBO, 530 mg/L de nitrógeno y 161 mg/L fósforo, respectivamente. Los humedales se construyeron a base de grava, y se plantó espadaña (*Typha latifolia*) y pasto tifton (*Cynodon* spp.). En este estudio se reportó que, con un TRH de 11.8 días, se alcanzó una eficiencia de remoción de 83% para DBO, 37% de NT y 74% de PT; mientras que, al utilizar un TRH de 12 días, la eficiencia de remoción registrada fue de 86, 40 y 73% para DBO, NT y PT, respectivamente. Lo anterior confirma que a mayor TRH aumenta la remoción de DBO y NT, sin embargo, la mejor remoción de PT se registró con menor TRH.

Muñoz, Rosales, Gabarrón, Faz y Acosta (2016), mencionan que a mayor tiempo de retención hidráulica la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo aumentan. Sin embargo, el fósforo puede estar sujeto a variaciones debido a las características que presenta el sustrato del humedal provocando en ocasiones una menor reducción de este contaminante empleando un mayor tiempo de retención hidráulica.

La concentración de contaminantes en el efluente determina el TRH para el humedal, encontrando que a una mayor cantidad de contaminante es necesario un mayor TRH. Por lo tanto, el TRH influye en el desempeño de los humedales y su eficiencia de remoción de contaminantes. Se encontró que a mayor TRH se remueve una mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes, sin embargo, en algunos casos para el fósforo el aumento del TRH puede reducir la eficiencia de remoción. Esta reducción de la eficiencia está ligada a las características de los medios filtrantes utilizados, especialmente la capacidad de adsorción para este contaminante.

Composición del humedal. El humedal se compone por diferentes sustratos, los cuales pueden ser orgánicos o inorgánicos. Estos sirven como medio filtrante ayudando a la remoción de contaminantes por adhesión y en algunos casos sirven como fuente de energía. Wang, Dong, Liu, Zhu y Liu (2013), realizaron un estudio en el que se evaluó cuatro tipos de sustratos (concha de ostra, ladrillos rotos, rocas volcánicas y zeolita), para la remoción de fósforo en efluentes provenientes de ganado porcino, tratados previamente en un tanque anaeróbico, y con una carga de 83.64 mg/L de PT. La remoción de fósforo fue realizada mediante adsorción, proceso en el cual el nutriente se adhiere a la superficie de los sustratos obteniendo mayor eficiencia al utilizar concha de ostra alcanzando una adsorción de 32.9 mg PO₄/g sustrato. Seguido por el humedal compuesto de ladrillos rotos con una remoción de 0.59 mg PO₄/g sustrato. La menor adsorción se observó en el sustrato de rocas volcánicas y zeolita, en los cuales la remoción fue de 0.23 y 0.04 mg PO₄/g sustrato, respectivamente. Los autores concluyeron que las características fisicoquímicas de los sustratos permiten una mejor adsorción de fósforo.

Para la construcción de los humedales se deben escoger cuidadosamente los materiales que permitan la filtración del efluente. En un estudio realizado por Anh et al. (2020) se evaluaron cuatro humedales con diferentes composiciones (Cuadro 2), para remover MO y nitrógeno de un efluente porcino, con una carga de 210 mg/L de SST, 1,310 mg/L de DQO y 141 mg/L de NT. Las condiciones ambientales para todos los tratamientos fueron iguales. El estudio reportó que la mayor eficiencia en remoción de SST, NT y DQO fue el tratamiento tres (HA3), con eficiencias del 90, 77 y 82%, respectivamente. El humedal uno (HA1) fue el menos eficiente en remover SST (50.2%) y NT (56.9%), sin embargo, presentó mayor remoción en DQO (57.5%) que el humedal cuatro (HA4). El humedal dos (HA2) es el segundo mejor removiendo DQO (58%) y SST (75%), a pesar de ello fue menos eficiente que el HA4, reduciendo NT (57%). El último tratamiento HA4, presentó una eficiencia de 49, 63 y 67% en la reducción de DQO, SST y NT correspondientemente.

Cuadro 2. Descripción de los materiales filtrantes en cada humedal.

Tratamiento	Material filtrante	Altura en el humedal (cm)
HA1	Grava	80
HA2	Grava	40
HA3	Piedra caliza	40
	Grava	40
HA4	Piedra caliza	25
	Arena	15
	Grava	40
	Piedra caliza	25
	Cascarilla de arroz	15

Fuente: Anh et al. (2020)

HA: Humedal artificial

La aplicación de comunidades de microorganismos a los medios filtrantes que componen el humedal permite una mejor reducción de contaminantes. En un estudio realizado por L. Guo, Cui y Li (2020), se evaluaron diferentes combinaciones de medios filtrantes, a las cuales se añadió agentes microbianos compuestos. Se utilizó una cepa especial para el tratamiento de aguas

residuales, la cual contenía principalmente *Bacillus subtilis*, levaduras, bacterias ácido-lácticas, bacterias floculantes, y *Chlorella* (género de algas verdes unicelulares), los cuales se utilizaron como biosorbentes. El experimento se realizó en dos fases, con siete tratamientos, los cuales variaron en su composición (Cuadro 3). El efluente porcino utilizado en el humedal provino de un tratamiento de fermentación anaerobia. El experimento duró 30 días, dividido en dos fases de 15 días. En la primera fase, el efluente utilizado registró una concentración de 24.72 mg/L de PT y 11,400 mg/L de DQO. Para la segunda fase la concentración del efluente fue de 19.4 mg/L de PT y 8,627 mg/L de DQO.

X. Guo et al. (2020) reportaron que en la primera fase no se encontró diferencias significativas entre tratamientos para remover DQO. No obstante, el tratamiento 7 presentó mayor eficiencia de remoción, eliminando un 84.11% de DQO. En el caso de NT y PT, la primera fase arrojó diferencias significativas, y el mejor tratamiento en reducir NT fue el número 7, donde se redujo un 98.14% de NT. Para remover PT, el mejor tratamiento fue el número 6, el cual removió un 92.11% de PT. Durante la fase dos, aumentó la eficiencia en remover DQO y disminuyó la eficiencia en remover NT y PT. En esta fase, el mejor tratamiento en reducir DQO fue el número 6, que presentó una eficiencia de 98.77%. En el caso de remover NT, el tratamiento 7 fue el mejor, con un 80.02% de remoción. En la eliminación de PT, el tratamiento 4 tuvo una mayor eficiencia, removiendo un 82.82%. Con base en estos resultados, se observa que el uso de humedales compuestos de biocarbón, zeolita y biosorbentes, son óptimos para remover nitrógeno y fósforo presentes en efluentes porcinos, presentando altas eficiencias de remoción.

Cuadro 3. Composición de los tratamientos.

Tratamiento		Zeolita (g)	Biocarbón (g)	Agentes microbianos compuesto (g)	<i>Chlorella</i> (g)
Composición	Numero				
Z	1	100			
B	2		100		
Z + M	3	100		1	
Z + C	4	100			3
B + M	5		100	1	
B + C	6		100		3
Z + B + M + C	7	100	100	1	3

Fuente: (X. Guo et al., 2020)

Z: zeolita, B: biocarbón. M: agentes microbianos compuestos, C: *Chlorella*.

Los estudios descritos confirman que la composición del humedal es un factor importante para la remoción de contaminantes, ya que estos remueven contaminantes del efluente mediante adsorción. Se encontró que una de las mejoras eficiencias de remoción para el fósforo es la concha de ostra, ya que este sustrato presenta características que permiten una mejor adhesión de este nutriente. El nitrógeno se puede remover de mejor manera con la utilización de sustratos orgánicos, los cuales sirven como fuente de energía para los microorganismos, sin embargo, se reportó que se reduce la eficiencia de la remoción de materia orgánica presente en el efluente. Además, se encontró que al añadir microorganismos a los sustratos permiten una mejor remoción de los contaminantes presentes en efluentes porcinos.

Vegetación. En el estudio realizado por F. Liu et al. (2020), se comparó la eficiencia de humedales, incorporando tres especies diferentes de plantas para la remoción de DQO y nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) presente en efluentes porcinos. El efluente utilizado se trató previamente por digestión anaerobia, presentado concentraciones de 912 – 1,172 mg/L para DQO y de 271 – 366 mg/L para $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Se utilizó achira (*Canna indica*), cálamo aromático (*Acorus calamus*) y espinaca de agua (*Ipomoea aquatica*) en un sistema de flujo vertical. Se obtuvo como resultado que la achira reporta una mayor eficacia en remover estos contaminantes, con valores de 88.07% para DQO, y 75.02% para $\text{NH}_4^+\text{-N}$. La especie menos eficiente fue *Ipomoea aquatica*, con remoción de 82.20 y 68.47%, correspondiente a DQO y $\text{NH}_4^+\text{-N}$, mientras que el cálamo aromático eliminó el 84.7% de DQO y el 70.25% de nitrógeno de amonio.

La especie *Canna hybrids* es de gran uso para humedales debido a que es una planta que soporta altas concentraciones de contaminantes, se adapta a climas cambiantes y contribuye a la belleza paisajística (Sandoval, Marín-Muñiz, Zamora-Castro, Sandoval-Salas y Alvarado-Lassman, 2019). En el estudio de Mateo et al. (2019), se analizó la remoción que provee la especie mencionada, en humedales con sistema de flujo vertical a comparación de no usar especies vegetales. El efluente utilizado fue de granjas porcinas, el cual se combinó con agua de la llave en proporción del 50%. Las características del efluente antes de ingresar al sistema de humedales fueron de 1,214.1 mg/L de SST, 418.3 mg/L de DQO, 64.1 mg/L de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y 19.4 mg/L de PT. Luego del tratamiento se reportó que al comparar el desempeño de los humedales sin vegetación y unidades que incorporaron el uso de *Canna hybrids*, estas últimas incrementaron sus eficiencias de remoción de SST hasta un 22%. En el caso de la DQO, se registró una eficiencia de 66% de remoción, la cual solamente representa un incremento del 3%. La remoción de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ en presencia de *Canna hybrids* fue de 65.8%, superando al humedal sin vegetación por el 14.4%. Para PT y coliformes totales (CT), el humedal con vegetación removió un 41 y 66% respectivamente, siendo significativamente mayor en comparación al que no usó vegetación. Según los autores, los resultados reportaron diferencias significativas en remoción de SST, DQO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, PT y CT, obteniendo una mayor remoción con el uso de especie vegetal.

Por otro lado, Sandoval-Herazo et al. (2020) realizaron un estudio donde se utilizó un diseño de humedal de flujo vertical, el cual se alimentó con efluentes de granjas porcinas. El efluente pasó por un sedimentador y luego fue diluido al 50%, presentando en promedio 750 mg/L de DBO y 300 mg/L de $\text{NH}_4^+\text{-N}$. En este experimento se comparó la eficiencia de remoción al usar diferentes especies vegetales, utilizando *Canna hybrids* e *Iris germánica* (lirio azul). Se reportó que las dos especies vegetales presentan eficiencias de remoción similares, siendo que la especie *Iris germánica* la que presentó mayor eficiencia al remover DQO, NT y $\text{NH}_4^+\text{-N}$, sin embargo, *Canna hybrids* registró una mejor eficiencia de remoción de coliformes totales.

La vegetación es importante en el humedal ya que permite la absorción de nutrientes, aumentando así la eficiencia de estos sistemas. Se encontró que se puede aumentar hasta en un 14% la eficiencia de remoción de nitrógeno. Una de las especies más utilizados es la *Canna hybrids*, la cual presenta una gran adaptabilidad a las características de los efluentes y también a las condiciones climáticas, además de poseer una gran capacidad de remoción. *Iris germánica*, también presenta eficiencias de remoción similares a la de *Canna hybrids*, lo cual las hace una especie factible para usar en humedales de tratamiento de efluentes porcinos. Finalmente, se identificó que la achira, el cálamo aromático y la espinaca de agua pueden ser utilizadas en el tratamiento de efluentes porcinos mediante humedales, ya que presentan eficiencias de remoción superiores al 65%.

Sistema de flujo. Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de sistemas de flujo, el de flujo libre o superficial y el de flujo subsuperficial (horizontal o vertical). Son importantes porque de estos depende la presencia de microorganismos y la aeración al sistema. Según Vymazal y Kröpfelová (2008) los sistemas de flujo subsuperficial presentan mejores eficiencias debido a que se genera una biopelícula de microorganismos alrededor del medio poroso y de las raíces, mientras que en el de flujo superficial no se pueden adherir.

Udom, Mbajiorgu y Oboho (2018) realizaron un estudio en Nigeria, donde se evaluó humedales de flujo horizontal a escala piloto con dos diferentes tipos de vegetación. El efluente porcino tuvo un tratamiento previo de filtración seguido por una laguna de detención, ingresando al humedal con una concentración media de 205, 28 y 10 mg/L de DQO, NT y PT, respectivamente. Como resultado se reportó una eficacia de remoción para los dos tipos de vegetación de 64.95 y 66.53% para DBO, de 58.89 y 62.49% en NT, y hasta un 48.53% de PT en ambos tratamientos. Finalmente, los autores concluyeron que es factible el uso de humedales de flujo horizontal, ya que pueden tratar eficazmente los efluentes porcinos, removiendo materia orgánica y nutrientes.

En la investigación de Kizito et al. (2017) se implementaron humedales de flujo vertical, que se construyeron con grava, biocarbón de maíz y biocarbón de madera. El efluente utilizado proviene de una granja porcina, el cual fue tratado previamente mediante digestión anaerobia. Este efluente presentaba concentraciones de 1,500, 699, 581 y 37 mg/L de DQO, DBO, NT y PT, respectivamente. Luego de la etapa de humedales se reportó una remoción de DBO entre el 72 y 92%, de 78% en PT y en el caso de NT la eficiencia de remoción estuvo entre 36 y 71%. Según los autores la alta remoción de materia orgánica y nutrientes se debe a procesos de biodegradación y adsorción que se benefician de los ciclos de alimentación que presentan los sistemas de flujo vertical, formando una sinergia entre los mecanismos de remoción.

En la industria porcina son muy poco usados los sistemas de humedales de flujo superficial, sin embargo, estos también presentan un alto porcentaje de reducción. Hu, Chu y Ma (2020) evaluaron la remoción de los humedales de flujo superficial. El efluente utilizado recibió un tratamiento primario de fermentación anaeróbica, por medio de dos tanques en serie. El efluente presentó 772 mg/L de DQO, 287 mg/L de DBO, 571 mg/L de NT y 74 mg/L de PT. Al utilizar los humedales se alcanzó una remoción de 54% para DBO, 37% de NT y 47.5 % de PT. De acuerdo con los resultados, estos sistemas pueden mejorar su eficiencia si se incorporan humedales híbridos. El estudio se complementó con la implementación de un humedal superficial y dos de flujo horizontal diseñados en serie obteniendo una eficiencia de remoción de 88.4, 70.5 y 89.1% de las cargas de DBO, NT y PT respectivamente.

El flujo de los humedales es un factor relevante en su diseño, ya que este permite la aireación del sistema y favorece la presencia de microorganismos. Los sistemas de flujo subsuperficial ya sean estos horizontales o verticales, presentan una mayor remoción de contaminantes de efluentes porcinos en comparación a los de flujo superficial. Eso se debe a que en los de flujo subsuperficial, el agua pasa por medio de los sustratos, donde se pueden adherir los microorganismos; mientras que, el agua del de flujo superficial pasa por los tallos, lo cual no permite una formación de biopelícula por parte de los microorganismos. Otra alternativa son los sistemas híbridos, ampliamente utilizados en la industria porcina, ya que presentan altas eficiencias debido a que combinan los beneficios de remoción de los diferentes sistemas de flujo.

Eficiencia de los humedales artificiales

Los efluentes provenientes de granjas porcinas presentan altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes. Para la remoción de estos se pueden implementar diferentes tratamientos, entre ellos los humedales artificiales, que integran diferentes procesos que permiten una remoción satisfactoria de estos contaminantes. Sin embargo, la eficiencia de remoción que presenta este tratamiento se encuentra influenciada por diversos factores. Entre los principales se encuentran: la temperatura, el tiempo de retención hidráulica, la composición de los medios filtrantes, la especie vegetal y el sistema de flujo. Esto se debe a que los factores antes mencionados contribuyen a los diferentes mecanismos de remoción de contaminantes realizados dentro de los humedales.

De acuerdo con diversos estudios, existen variaciones en cuanto a la eficiencia de remoción para contaminantes presentes en aguas residuales de granjas porcinas, mediante el uso de humedales artificiales, requiriendo de la implementación de tratamientos preliminares, para asegurar su desempeño. Las características fisicoquímicas del afluente influyen en el proceso depurativo que realizan los humedales. También factores como el sistema de flujo, medios filtrantes, tiempo de retención hidráulica y especies vegetales (Cuadro 4). Para los sistemas de flujo se encontró humedales de flujo superficial (HS), de flujo subsuperficial horizontal (HH) y de flujo subsuperficial vertical (HV), así mismo, tratamientos de humedales combinados.

La composición de los medios filtrantes varió en cada humedal, y algunos de los materiales utilizados fueron: grava, roca volcánica, biocarbón, y arena. En la mayoría de los estudios se evaluó una sola especie vegetal, sin embargo, en algunos casos se combinaron dos especies vegetales en la misma unidad de tratamiento. El tiempo de retención hidráulica fue variable en cada estudio, existiendo casos con un período de horas, mientras que, en otros experimentos, la duración fue en días. Finalmente, se muestran las eficiencias de remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, mediante los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), indicadores de materia orgánica, nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT).

La DBO y DQO son parámetros indicadores de la presencia de materia orgánica, siendo removida dentro de los humedales mediante procesos microbiológicos. Por ello es necesaria la presencia de oxígeno, ya que permite la oxidación y nitrificación de este contaminante (L. Guo et al. 2016). Por otra parte, el nitrógeno se encuentra representado por NT. Según X. Li, Y. Li, Li y Wu (2019), los humedales realizan la remoción de este nutriente mediante procesos de adhesión, absorción, sedimentación y procesos microbiológicos. El fósforo es otro de los contaminantes mayoritarios de los efluentes porcinos, removiéndose en el humedal por procesos de adsorción física y química, sedimentación, precipitación de iones y por captación microbiana y absorción de la planta (Reddy, Forbes, Hunt y Cyrus, 2011)

Cuadro 4. Eficiencia de humedales artificiales en remover materia orgánica y nutrientes de efluentes porcinos.

Características del efluente porcino			Características del sistema				Eficiencias de remoción (%)				Fuente
Tp	Parámetro	mg/L	SF	MF	TRH	EV	DQO	DBO	NT	PT	
Separador de sólidos	DQO:	6,512	Híbrido:	Grava de	n/d	<i>Phragmites australis</i>	91	95	70	90	(Zhang et al., 2016)
	DBO:	1,952	3 HSS-V	pedra							
	SST:	3,073	+	pómez							
	NT:	1,395	1 HSS-H								
	NH ₄ :	1,130	+								
	PT:	151	1 HSS-V								
Digestión anaerobia Laguna de almacenamiento	DQO:	413	En serie:	Arena	10d	<i>Thypha sp.</i>	86.3	n/d	80	77.9	(De La Mora-Orozco et al., 2018)
	NT:	30.6	HSS-H	Arcilla	c/u	<i>Scirpus sp.</i>					
	PT:	10.2	+	Arena amarilla							
			HSS-H	Roca volcánica							
Separador de sólidos Digestión anaerobia	DQO:	565.16	HSS-V	Grava	3.29d	<i>Coles silvestres (Brassica)</i>	84.8	n/d	67	n/d	(Han et al., 2019)
	NT:	169.09		Ladrillo							
	NH ₄ -N:	156.97		Zeolita Piedra caliza							
Dilución con agua	DQO:	412 – 854	HSS-H Flujo ascendente y descendente	Lodos de alumbre Fibra de vidrio Cátodos Ánodos	1d	Caña (<i>Phragmites</i>)	84	n/d	58	85 – 86	(Doherty, Zhao, Zhao y Wang, 2015)
	NT:	63									
	PT:	8.9									
Dilución con agua	DQO:	412 – 854	HSS-H Flujo ascendente	Lodos de alumbre Fibra de vidrio Cátodos Ánodos	1d	Caña (<i>Phragmites</i>)	81	n/d	48	85 – 86	(Doherty et al., 2015)
	NT:	63									
	PT:	8.9									

Cuadro 4. Continuación.

Características del efluente porcino			Características del sistema				Eficiencias de remoción (%)				Fuente
Tp	Parámetro	mg/L	SF	MF	TRH	EV	DQO	DBO	NT	PT	
Dilución con agua	DQO:	412 – 854	HSS-H	Lodos de	1d	Caña	80	n/d	52	85 – 86	(Doherty et al., 2015)
	NT:	63	Flujo	alumbre		(<i>Phragmites</i>)					
	PT:	8.9	ascendente								
Lagunas de estabilización	DQO:	456 – 1,010	HS	Arena Limo Arcilla	11d	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	79 – 87	n/d	n/d	n/d	(Luo et al., 2018)
Dilución con agua	DQO:	414 – 854	HSS-H	Lodos de	1d	Caña	79	n/d	48	85	(Doherty et al., 2015)
	NT:	63	Flujo	alumbre		(<i>Phragmites</i>)					
	PT:	8.9	ascendente	Cátodos Ánodos							
Digestión anaerobia Laguna de almacenamiento Dilución	DQO:	454	En serie:	Arena	5d	<i>Thypha</i> sp.	78.6	n/d	57	67.4	(De La Mora-Orozco et al., 2018)
	NT:	44.3	HSS-H	Arcilla	c/u	<i>Scirpus</i> sp.					
	PT:	12.7	+	Arena amarilla Roca volcánica							
Digestión anaerobia	DQO:	2,300 – 2,800	HSS-V	Grava	72h	<i>Iris</i>	77.2	n/d	40	n/d	(Feng, Wang, Jia y Wu, 2020)
	NT:	1,400 – 1,800	+	Biocarbón		<i>pseudacorus</i>					
	NH ₄ -N:	1,300 – 1,600	aireación								
Separador de sólidos Tanque de aireación	DQO:	26,600	HSS-H	Arena	7d	<i>Phragmites</i>	77	54	52	97	(Terrero, Muñoz, Faz, Gómez-López y Acosta, 2020)
	DBO:	2,600		lavada		<i>asutralis</i>					
	SST:	26,100		Grava		<i>Suaeda vera</i>					
	NT:	3,500		gruesa							
	NH ₄ -N:	2,300		Grava fina							
	PT:	1,093									

Cuadro 4. Continuación.

Características del efluente porcino			Características del sistema				Eficiencias de remoción (%)				Fuente
Tp	Parámetro	mg/L	SF	MF	TRH	EV	DQO	DBO	NT	PT	
Dilución	DBO: SST: NH ₄ -N:	1,359 498 121	HSS-V	Grava	8h	<i>Phragmites australis</i>	n/d	75.2	n/d	n/d	(G. Sun, Zhao y Allen, 2005)
Digestión anaerobia	DQO: NT: NH ₄ -N:	2,300 – 2,800 1,400 – 1,800 1,300 – 1,600	HSS-V + aireación	Grava	72h	<i>Iris pseudacorus</i>	73.9	n/d	49	n/d	(Feng et al., 2020)
Separador de sólidos Digestión anaerobia	DQO: NT: NH ₄ -N:	616.46 330 306	HSS-V	Grava Ladrillo Zeolita Piedra caliza	2.76d	<i>Coles silvestres (Brassica)</i>	73.8	n/d	71	n/d	(Han et al., 2019)
Laguna de almacenamiento	DQO: NT:	12,300 453.3	HS	Grava	1.6d	<i>Typha angustifolia</i>	71.5	n/d	21 – 51	n/d	(Plaza de los Reyes y Vidal, 2015)
Dilución	DBO: SST: NH ₄ -N:	2,147 444 104	HSS-V	Grava	4h	<i>Phragmites australis</i>	n/d	57.4	n/d	n/d	(G. Sun et al., 2005)
Lagunas de estabilización	PT:	25 – 55	HS	Arena Limo Arcilla	11d	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	n/d	n/d	n/d	70 – 89	(Luo et al., 2017)

Elaboración propia

Tp: Tratamiento previo, SF: sistema de flujo, MF: material filtrante, TRH: tiempo de retención hidráulica, EV: especie vegetal, n/d: no hay datos, c/u: cada uno, d: días, h hora.

De acuerdo con las investigaciones detalladas anteriormente (Cuadro 4), la MO representada por DBO y DQO, fue removida satisfactoriamente, encontrándose eficiencias del 71.5 al 91% para DQO, y del 54 al 94% para DBO. Para el parámetro de DQO, la mejor eficiencia de remoción se obtuvo por el uso de un sistema híbrido, esto se puede deber a que el sistema de flujo incorporó más oxígeno al tratamiento, lo cual permitió una mejor remoción. Además, al incorporar medios filtrantes inorgánicos, se alcanza una mayor remoción de MO. La menor remoción de este parámetro se obtuvo en los estudios que utilizaron un flujo superficial y un bajo TRH, ocasionando una baja interacción con los microorganismos, por lo tanto, limitando su remoción. Por ello, se puede inferir que la reducción de la DQO se encuentra ligada al sistema de flujo, los materiales filtrantes y el TRH. De igual manera, la remoción de DBO presenta una mayor eficiencia a un mayor TRH y el sistema de flujo que obtuvo mejor eficiencia removiendo este parámetro fue el híbrido, seguido del humedal de flujo vertical, y el de flujo horizontal, con una menor eficiencia. Esto sucede porque un sistema de flujo vertical opera en ciclos, lo cual permite una mejor aireación del sistema que al combinarse en el sistema híbrido, mejora la remoción de DBO.

Uno de los principales nutrientes presentes en los efluentes porcinos es el nitrógeno y, de acuerdo con las investigaciones encontradas, los humedales presentan una eficiencia de remoción de NT entre el 21 y 80% (Cuadro 4). La mejor eficiencia de remoción para este parámetro se obtuvo en un sistema de humedales en serie, que utilizó dos especies vegetales con un mayor tiempo de retención hidráulica, favoreciendo la reducción de este nutriente por absorción; sin embargo, cuando la carga de nitrógeno en el efluente fue mayor, la eficiencia de este se redujo. La menor eficiencia se obtuvo con el sistema de flujo superficial que puede estar ligado a una baja interacción con los microorganismos e interferir en los procesos de absorción por parte de la vegetación. Finalmente, y de acuerdo con las observaciones, la eficiencia en remoción de nitrógeno aumenta con una mayor presencia de MO en el efluente, el aumento del TRH, mediante el uso de sistemas de flujo subsuperficial y el uso de varias especies vegetales.

El fósforo, al igual que los factores anteriores, es uno de los contaminantes mayoritarios presentes en efluentes porcinos. Los humedales pueden remover entre el 69 y 97% de PT y la remoción de este contaminante también se encuentra ligada al TRH, la vegetación, el sistema de flujo y los materiales filtrantes (Cuadro 4). La mejor remoción de este contaminante se realizó en un sistema de flujo horizontal, compuesto por materiales inorgánicos que permiten su remoción por adhesión, en combinación con dos especies vegetativas que mejoran la absorción. Las investigaciones muestran que cuando se utiliza arena como medio filtrante, se mejora la remoción de este contaminante. La menor reducción fue ocasionada por un bajo tiempo de retención hidráulica, ya que, utilizando los mismos materiales y especies vegetales, la eficiencia de remoción aumentó aproximadamente un 10% cuando incrementó el TRH.

Se identificó que la selección del sistema de humedales se encuentra ligado estrechamente con la concentración de los contaminantes en el efluente porcino. Donde a altas concentraciones de materia orgánica y nutrientes es necesario implementar un sistema de tratamiento que cuente con varios humedales, siendo el ms eficiente la implementación de humedales de flujo híbrido. En el caso de que el efluente presente bajas concentraciones de materia orgánica y nutrientes, es necesario implementar una solo unidad de humedales para el tratamiento, para lo cual se puede utilizar humedales de flujo subsuperficial, que permiten una mejor remoción de nutrientes. De igual forma, se puede hacer el uso combinado de especies vegetales y sustratos que mejoren la remoción.

Además de la remoción de materia orgánica y nutrientes que realizan los humedales artificiales, estos presentan también la remoción de otros contaminantes. Para efluentes porcinos, los humedales también se utilizan para remoción de metales, antibióticos y para reducir la presencia de microorganismos patógenos, especialmente, coliformes totales. Según R. Fia, Vilas Boas, Campos, Fia y De Souza (2014), la mayor parte del Cobre (Cu) y Zinc (Zn) presente en aguas residuales son removidas mediante la extracción vegetal, por lo cual, en su estudio se comparó los beneficios de dos especies vegetales en la remoción de estos contaminantes. La extracción de cobre y zinc se estimó mediante cortes de las plantas. La primera especie fue el pasto bermuda (*Cynodon dactylon*) a relación de 20 plántulas de semillero por m², en un humedal de flujo vertical con sustrato de fibra de vidrio y grava cero. Esta especie presentó una extracción de 2.05 a 6.67 g·ha⁻¹·d⁻¹ para Cu y de 24.78 a 54.75 g·ha⁻¹·d⁻¹ para Zn. Por otra parte, la especie dos fue la espadaña (*Typha* sp.), que se usó en humedal con igual composición de materiales filtrantes, pero con un sistema de flujo horizontal. Para la espadaña, se estimó que extrae 1.41 y 16.04 g·ha⁻¹·d⁻¹ para Cu y Zn, respectivamente.

Los microorganismos patógenos presentes en el efluente de ganado porcino pueden ser removidos en el humedal mediante radiación ultravioleta, adhesión, toxinas, predación y muerte natural. En la siguiente investigación utilizaron humedales de flujo subsuperficial horizontal con dos tipos de vegetación *Typha dominguensis* (TD) y *Typha latifolia* (TL) cuyo sustrato fue de grava y se tomaron en cuenta dos TRH de 24 y 48 horas. Cuando se usó 24 horas, TL obtuvo mayor eficiencia removiendo coliformes totales (CT), enterococos y *Salmonella*, donde las eficiencias fueron de 77, 59 y 84%, respectivamente. Por su parte, TD presentó eficiencias de 76, 58 y 82% en la remoción de CT, enterococos y *Salmonella*. Cuando el TRH fue de 48 horas, las eficiencias de remoción aumentaron al 86% para coliformes totales. En el caso de los enterococos y *Salmonella*, TD presentó una eficiencia del 97 y 98%, respectivamente para dichos microorganismos, mientras que TL removió el 96% de enterococos y 97% de *Salmonella* (Gíacomán-Vallejos, Ponce-Caballero y Champagne, 2015).

Finalmente, un aspecto asociado a la industria porcina es el uso de antibióticos para evitar enfermedades, por lo cual estos se pueden presentar en sus efluentes. En el estudio de L. Liu et al. (2019), se observó cómo los humedales artificiales pueden reducir el contenido de algunos antibióticos. Se utilizaron tres humedales: el primero, de flujo superficial (HS), compuesto por tierra roja y dos humedales de flujo subterráneo, uno de flujo vertical (HSS-V) y otro de flujo horizontal (HSS-H), ambos compuestos por tierra roja y concha de ostra. En los tres se plantó *Phragmites australis* y se obtuvo un TRH para HS de 15 días, HSS-V de 14 días y en HSS-H fue de 16 días. Se encontró que los tres presentan eficiencias mayores al 90% en remoción de Oxitetraciclina durante el verano, siendo el HSS-V el más eficiente en la remoción, durante invierno la eficiencia de remoción se redujo. En el caso de ciprofloxacina, la eficiencia de remoción fue superior al 86% en verano, donde de igual forma el HSS-V fue el más eficiente y en invierno las eficiencias de remoción fueron menores.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente los humedales, también, pueden remover contaminantes como: microorganismos patógenos, metales y antibióticos. Los cuales se pueden encontrar en efluentes porcinos. La evidencia recopilada muestra que el tratamiento de efluentes porcinos es viable a través de la implementación de humedales artificiales en combinación con etapas previas de tratamiento, proporcionando beneficios agregados como la remoción de estos contaminantes que pueden causar daños a la salud humana y de los ecosistemas.

Configuración de sistemas de tratamiento

A pesar de que los humedales artificiales son muy eficientes para remover MO y nutrientes, la incorporación de efluentes con altas concentraciones MO y sólidos puede reducir su eficiencia. Esto implica la necesidad de incrementar el TRH para alcanzar las eficiencias previamente discutidas, lo que se resultaría en una mayor extensión de terreno para su implementación. Debido a las características que presenta el efluente porcino, en esta industria se utilizan los humedales como tratamientos secundarios o terciarios. Para esto, se recopiló la evidencia de varias configuraciones en los tratamientos, que implementan mecanismos para la reducción de MO y sólidos antes de que el efluente ingrese a los humedales.

En el primer caso, se encuentra el estudio de Nehmtow et al. (2016) en el que se implementó un tratamiento compuesto por un tanque de polietileno donde se aireó el estiércol de cerdo por 28 días mediante una bomba. Posterior a este proceso, se diluyó el estiércol e ingresó a un sistema de humedales conformado por un humedal de flujo vertical, seguido de un humedal horizontal, en los cuales se usó puzolana como medio filtrante. En el HSS-V se plantaron individuos de las especies *Carex hispida* y *Typha latifolia*, para el HSS-H se utilizó *Alisma lanceolatum*, *Carex cuprina*, *Iris pseudacorus* y *Juncus inflexus*, para los humedales el TRH fue de 14 días. En este experimento, se obtuvo que durante la fase de aireación se redujo un 24.79% de DQO, 11.53% de sólidos totales (ST), 32% de DBO, en la fase de los humedales se removió 96.95, 99.79, 98.23 y 98.31% para DQO, DBO, NT y PT, respectivamente. Este tratamiento fue muy eficiente removiendo los parámetros asociados a la materia orgánica y nutrientes, sin embargo, se necesitó una gran cantidad de agua para realizar el proceso de dilución y así reducir la concentración de MO y sólidos. Por lo cual, este tratamiento presenta una baja aplicabilidad debido a que en algunos lugares este recurso es muy escaso y en otros muy costoso, provocando un incremento en los costos de producción.

Masi et al. (2017) realizaron una investigación en Italia, en la cual se utilizó un separador de sólidos como pretratamiento, un reactor de flujo ascendente anaerobio del manto de lodos (UASB) para tratamiento primario, dos humedales de flujo vertical para el tratamiento secundario y para el terciario, se usó un humedal de flujo horizontal. La separación de sólido-líquido se realizó mediante un espesador de alta eficiencia a base de lona. El reactor UASB posee un volumen de dos m³ y se construyó a base de polietileno de alta densidad, con un TRH de dos días. Para los HSS-V se usaron bombas para aireación y alimentarlos por la parte superior, además de ser impermeabilizados con capas de geomembrana. Para el sustrato, se emplearon diferentes capas de grava con distintos diámetros, en el primer humedal vertical (HSS-V1) se plantó *Typha latifolia* y en el segundo (HSS-V2), *Phragmites australis*. En el HSS-H se empleó grava pequeña en todo el lecho, con excepción de la entrada y salida, donde se usó grava más gruesa, en este se plantó *Phragmites australis* y se alimentó con el efluente proveniente del HSS-V2. Este tratamiento logró remover hasta un 99.96% de SST, 99.4% en DQO, para PT se removió 99,6%, en el caso de NH₄-N se registró una eficiencia de 99.6% y finalizando con que se eliminó hasta un 99.7% de NT.

La configuración antes mencionada es una de las más aplicables para efluentes con altas concentraciones de sólidos y MO, contaminantes que se reducen satisfactoriamente antes de ingresar al sistema de humedales. Sin embargo, este tratamiento está dirigido a producciones que presenten un alto recurso económico, el cual es necesario para el mantenimiento y funcionamiento de los reactores UASB.

H. Sun et al. (2017), diseñaron un sistema de tratamiento, en el que se utilizó un humedal de flujo superficial, en el cual se plantó *Myriophyllum aquaticum*. El efluente usado estaba compuesto con aguas residuales provenientes de granjas porcinas, las cuales se mezclaron con agua dulce. Este pasó primero por un estanque de sedimentación y, posteriormente, sirvió para alimentar a los humedales que estaban compuestos por tres celdas, que tuvieron un TRH de 11 días cada una. Este tratamiento se utilizó para un clima subtropical en China. Se obtuvo que se removió hasta un 88.2% de DQO, de la cual se removió la mayor cantidad en la primera celda del humedal. En promedio, se removió hasta 98.3% y 95.8% para NH₄-H y NT respectivamente. Durante el invierno, las eficiencias de remoción se comportaron diferentes, ya que para DQO se removió el 92.3%, se eliminó el 99.5% de NH₄-H y se redujo hasta en un 97.9% el NT.

Este sistema de tratamiento presenta grandes eficiencias al remover materia orgánica y nutrientes, esto se debe a la sedimentación y la dilución del efluente que se realiza antes de ingresar al humedal. El pretratamiento permite reducir los sólidos presentes en el efluente, mientras que la dilución promueve que los contaminantes mayoritarios reduzcan su concentración. Además, la presencia de la especie vegetal facilita que se dé una gran remoción de materia orgánica y nutrientes, especialmente fósforo (Cuadro 4). Otro de los factores que influyen en la remoción es el TRH, el cual tiene una relación directamente positiva con la eficiencia de remoción del humedal.

El sistema de tratamiento de Caballero-Lajarín et al. (2015), es un poco más complejo, al encontrarse compuesto por un tanque de almacenamiento, en el cual se homogenizó y oxigenó. Posterior a esto, se impulsó mediante una bomba al separador de sólidos, del cual la parte sólida se compostó, mientras que el efluente se almacenó en un tanque el cual presenta aireación. Este se envió a un espesante de lodos y después fue almacenado en un tanque de sedimentación por dos días, y la fase líquida fue enviada a los humedales. Los cuales estuvieron compuestos por 6 celdas de flujo horizontal, construidos a base de grava y arena, en los que se plantó carrizo (*Phragmites australis*). El efluente se descargó en la capa de grava, se alimentó el humedal por lotes, donde cada uno tenía un TRH de cuatro semanas y el intervalo para la siguiente carga fue de 90 días. En la aplicación de este tratamiento se redujo 91% de DQO, 90% de DBO, 89% de NT, 89% de TSS y 97% de PT.

En el caso anterior, el separador de sólidos, el espesante de lodos y el tanque de sedimentación permitieron la remoción de materia orgánica y los sólidos presentes en el efluente porcino. Además, la integración de los humedales permitió mejorar la depuración de materia orgánica y promovió la remoción eficiente de nutrientes. Sin embargo, este tratamiento presenta un alto consumo de energía, por lo cual aumentan los costos del tratamiento, además, los altos tiempos de retención hidráulica dificultan la aplicabilidad de este sistema de tratamiento.

El siguiente sistema de humedales utilizó *Typha angustifolia* y fue diseñado por Pincam y Jampeetong (2020), para tratar efluentes provenientes de la digestión anaerobia de aguas residuales porcinas de una granja de aproximadamente 800 cerdos. Mediante la digestión anaerobia se reduce la materia orgánica, y gran parte de los sólidos suspendidos. Aunque en este estudio se presentó diferentes diluciones del efluente, la mayor remoción se dio cuando el efluente no se encontraba diluido, reportando una eficiencia de remoción de 93, 99, 82, 99 y 80% para la remoción de SST, DBO, DQO, NH₄-H y ortofosfato respectivamente.

La digestión anaerobia es uno de los tratamientos más utilizados debido a que remueve una mayor cantidad materia orgánica y sólidos presentes en el efluente de granjas porcinas, además de que se puede implementar a diferentes tipos de escala, permitiendo la producción de biogás. Sin embargo, este tratamiento no presenta una alta remoción de nutrientes, por lo cual se implementan los humedales como un tratamiento secundario que permita la depuración de estos. Dada la alta eficiencia en cuanto a remoción de nutrientes y materia orgánica con un bajo costo, sumado al hecho de la producción de energía durante el proceso, resulta una alternativa viable para las granjas porcinas.

Según Wu et al. (2015), en la actualidad para el diseño de humedales artificiales se han implementado innovaciones que permiten mejorar la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales. Entre las principales técnicas que se implementan está la aislación térmica, que permite mantener la remoción de los contaminantes sin variaciones de temperatura, en especial para invierno. Otra técnica que se utiliza es la operación de flujo de marea que permite aeración, ya que se alimenta mediante períodos permitiendo la aireación. Además, se utiliza el aporte de carbono, que sirve para que mejore la eficiencia de remover nitrógeno especialmente. La bioaumentación es la acción de aumentar microorganismos, para este caso especializados en la degradación de nutrientes. La cosecha de biomasa es otra técnica que permite la remoción de nutrientes y micronutrientes presentes en los efluentes, ya que con esta acción se reduce la liberación de nutrientes absorbidos por las plantas. Finalizando con el uso de humedales híbridos, es decir, el uso combinado de humedales de diferentes flujos, el más usado es la combinación de HSS-H y HSS-V. Cada uno de estos presentan ventajas que permite mejorar la remoción de nutrientes. De igual forma, la aireación artificial permite mejorar la eficiencia de remoción. Además, se ha implementado el uso de reactores biológicos de lodos activados y lodos anaeróbicos, como pretratamiento para los efluentes, mejorando la eficiencia de los tratamientos, donde este último presenta complicaciones en la aplicación a gran escala.

Los humedales artificiales no se emplean como tratamiento primario, ya que las altas concentraciones de sólidos y materia orgánica reducen la eficiencia. Debido a que los efluentes porcinos presentan altas concentración de estos, se propone que el diseño de un tratamiento debe integrar un tratamiento primario, el cual permita reducir la carga de sólidos y MO. Posteriormente se puede hacer el uso de humedales artificiales, los cuales cumplirán la función de aumentar la reducción de materia orgánica y emplear una remoción de nutrientes satisfactoria para el cumplimiento de normativas y mitigar el impacto ambiental. De acuerdo con la literatura revisada, se propone distintas configuraciones de tratamientos para efluentes porcinos, las cuales se enfocan en las diferentes escalas de producción. Para pequeños productores, se puede hacer el uso de un biodigestor y la aplicación de humedales, sean estos de flujo horizontal o vertical (Figura 1 y Figura 2), los cuales se deben adaptar al espacio disponible para su implementación. Se propuso esta configuración ya que se puede aprovechar subproductos como el biogás, y, dependiendo de la especie vegetal usada, la generación de biomasa.

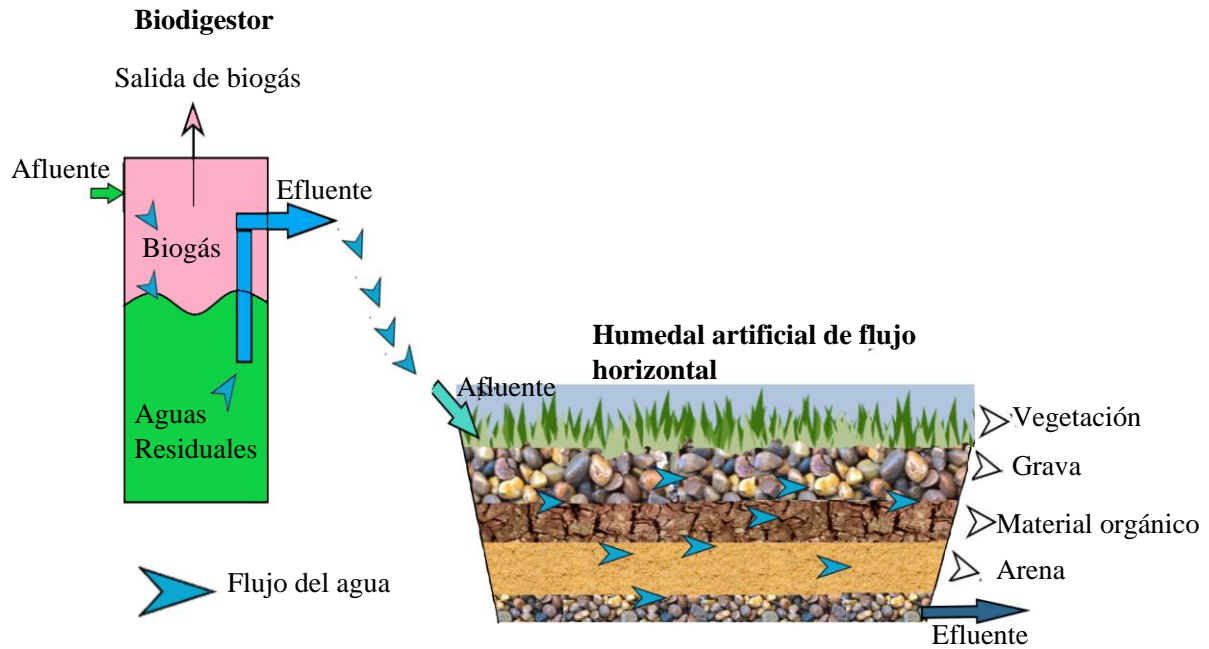


Figura 1. Diagrama de tratamiento (biodigestor + HSS-H).

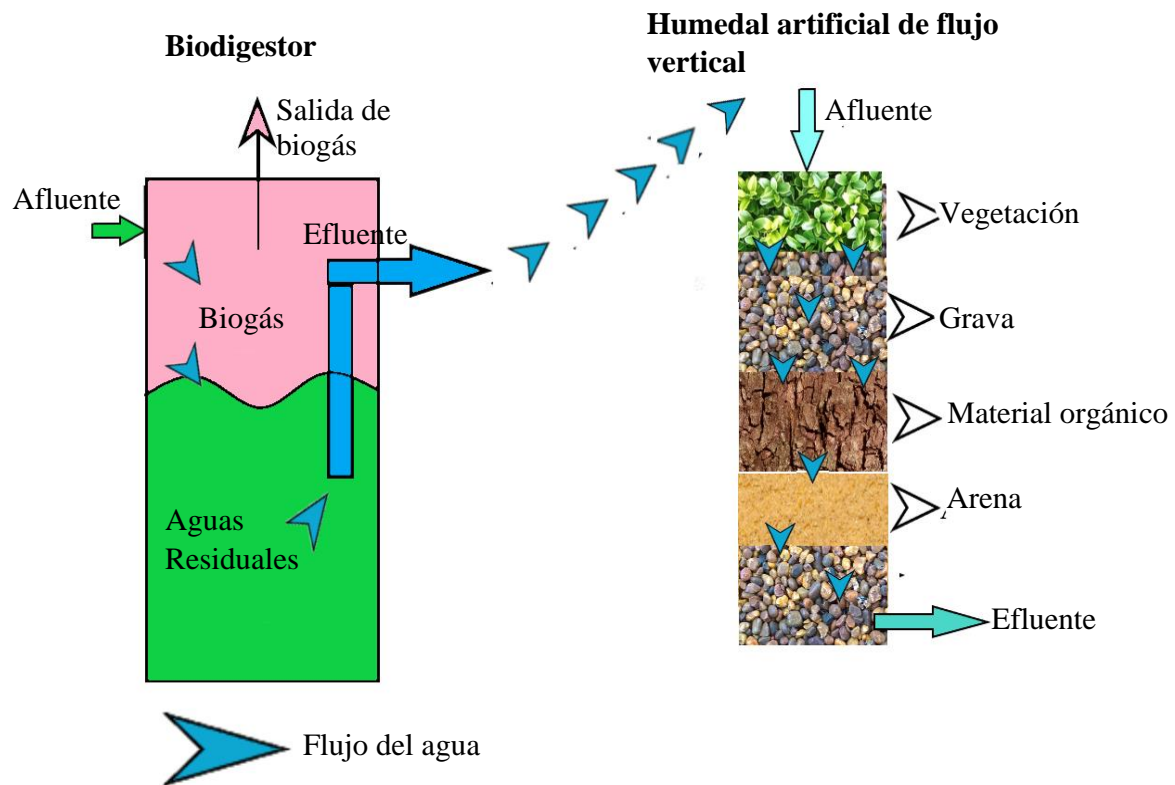


Figura 2. Diagrama de tratamiento (biodigestor + HSS-V)

La configuración enfocada para una granja de producción media puede usar la misma propuesta anterior, pero, si se cuenta con una mayor disponibilidad de espacio y recursos, se puede implementar el uso de reactores, con un sistema híbrido de humedales. Estos pueden estar compuestos por una unidad de tratamiento de flujo vertical y una de flujo horizontal (Figura 3). Aunque son mayores los costos de este tipo de tratamiento, se puede realizar una reutilización de agua, sea para riego o limpieza. Finalmente, para granjas con una gran producción, se propone la utilización de digestión anaerobia como tratamiento primario y un sistema de humedales híbridos. Este tratamiento se puede realizar con la implementación de un biodigestor, y la implementación de tres humedales en serie, de los cuales dos presentan un flujo vertical y el último un flujo horizontal (Figura 4). De igual forma este tratamiento permitirá la obtención de biogás, el cual sirve como una fuente de energía para la granja.

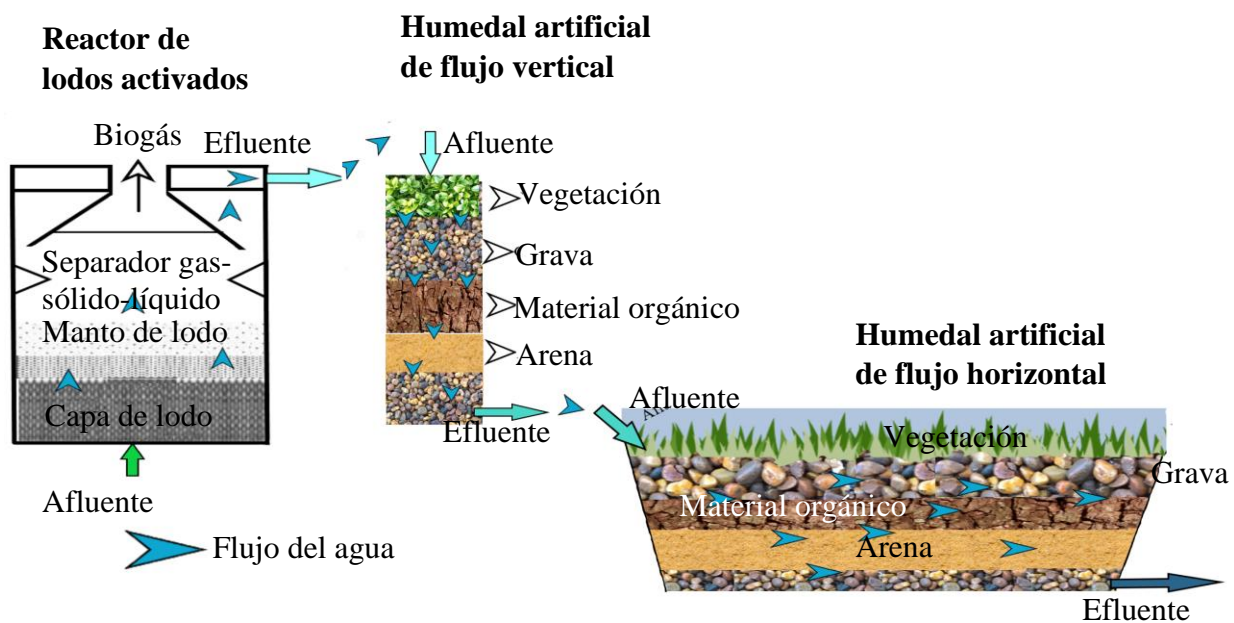


Figura 3. Diagrama de tratamiento (reactor + HSS-V + HSS-H).

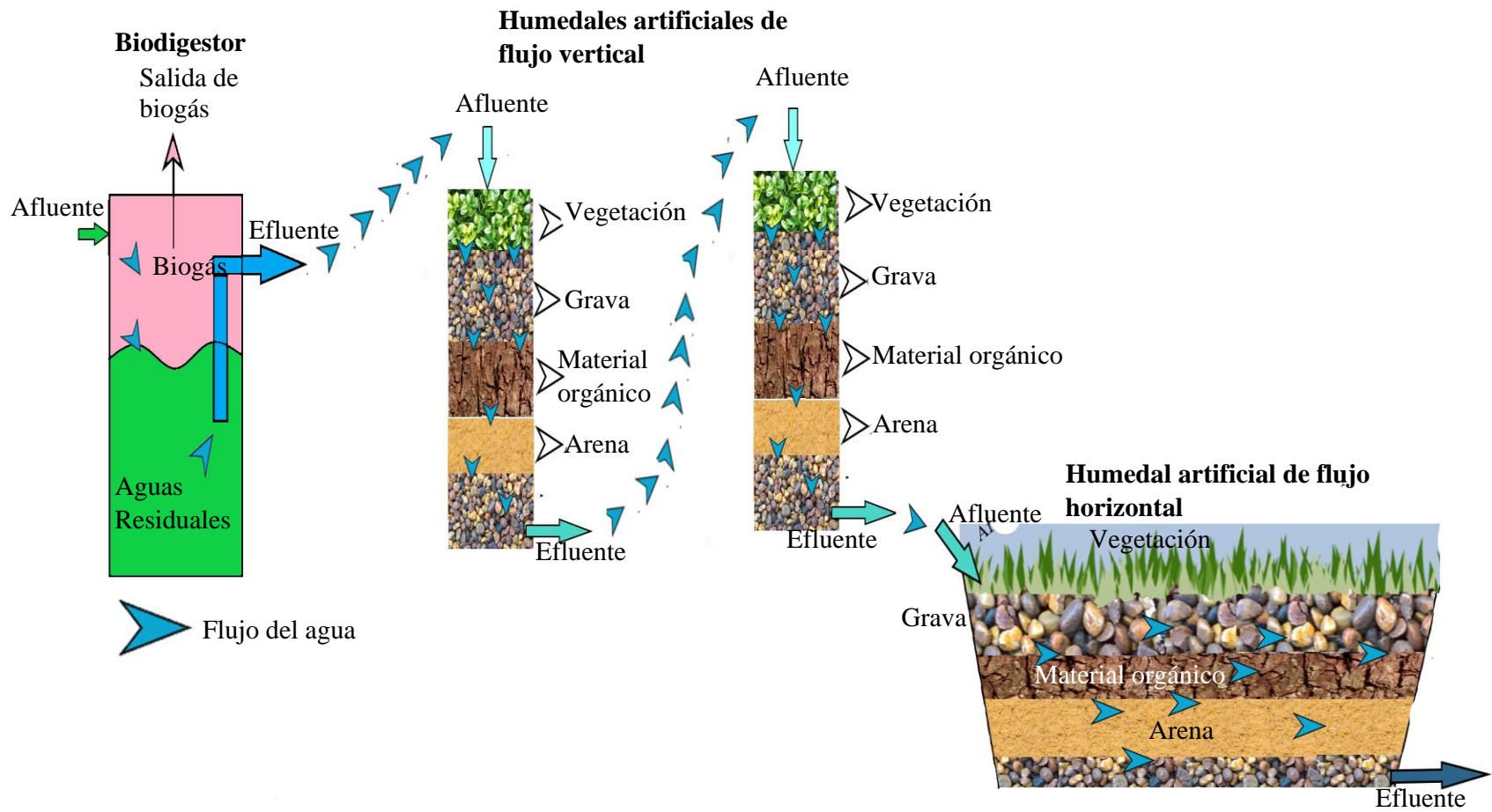


Figura 4. Diagrama de tratamiento (biodigestor + HSS-V en serie + HSS-H).

4. CONCLUSIONES

- El desempeño de los humedales utilizados para tratar efluentes porcinos está ligado a factores como la temperatura, el TRH, la composición, la vegetación y el tipo de flujo, obteniendo mejores eficiencias al operar con temperaturas de 22 - 30 °C, TRH entre 7 y 14 días y flujo subsuperficial.
- Los humedales artificiales como tratamiento secundario o terciario de efluentes porcinos presentan altas eficiencias de remoción de DQO, NT y PT, sin embargo, su aplicación como única etapa no implica el cumplimiento de las normativas requeridas para descarga en cuerpos receptores.
- Para implementar humedales artificiales en el tratamiento de efluentes porcinos, el efluente debe pasar por etapas previas de remoción de MO y sólidos, ya que altas concentraciones de MO y sólidos limitan su desempeño.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis de aplicabilidad de humedales artificiales para el tratamiento de los efluentes de la unidad de ganado porcino de Zamorano.
- Comparar los tres sistemas de flujo de los humedales artificiales para el tratamiento de efluentes porcinos donde no varíe la vegetación, los sustratos, la temperatura y el TRH.
- Evaluar el efecto de la aplicación de aislantes térmicos en la eficiencia en la remoción de contaminantes de efluentes porcinos durante épocas frías.
- Elaborar un estudio de factibilidad socioeconómica del uso de humedales artificiales por productores de ganado porcino a pequeña escala.
- Evaluar la adaptabilidad de diferentes plantas ornamentales como especies vegetativas en humedales artificiales con efluentes de granjas porcinas.

6. LITERATURA CITADA

- Akratos, C. S. y Tsihrantzis, V. A. (2007). Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 29(2), 173-191. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.013>
- Anh, B., Van Thanh, N., Phuomg, N., ha, N., Lap, B. Q. y Kim, D. D. (2020). Selection of Suitable Filter Materials for Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland Treating Swine Wastewater. *Water Air Soil & Pollution*, 231(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4449-6>
- Arias, S. A., Betancur, F. M., Gómez, G., Salazar, J. P. y Hernández, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador tecnico*, 74(1), 12-22. <https://doi.org/10.23850/22565035.5>
- Arteaga-Cortez, V., Quevedo-Nolasco, A., del Valle-Paniagua, D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á. y Ramírez-Zierold, J. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Water Science and Technology*, 10(5), 319-343. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-12>
- Asprilla, W. J., Ramírez, J. S. y Rodriguez, D. C. (2020). Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica. *Ingenierias USBMed*, 11(3), 65-73. Recuperado de <http://www.revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/4558/3677>
- Blanco, L. E. (2017). *Impacto Ambiental Generado Por La Producción Porcina En La Zona Urbana De Lomas De Lúcumo-Villa María Del Triunfo* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Villa El Salvador.
- Caballero-Lajarín, A., Zornoza, R., Faz, A., Lobera, J. B., Muñoz, M. A. y Domínguez-Oliver, S. G. (2015). Combination of Low-Cost Technologies for Pig Slurry Purification Under Semiarid Mediterranean Conditions. *Water Air & Soil Pollution*, 226(10). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2606-0>
- Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Espinoza-Fraire, A., Sáenz-López, A., Alcorta-García, M., González-Barrios, J., . . . de la Cruz-Acosta, F. J. (2017). Optimización en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales integrado por tres lagunas de estabilización. *Water Science and Technology*, 8(4), 139-155. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-09>
- De La Mora-Orozco, C., González-Acuña, I. J., Saucedo-Terán, R. A., Flores-López, H. E., Rubio-Arias, H. O. y Ochoa-Rivero, J. M. (2018). Removing Organic Matter and Nutrients from Pig Farm Wastewater with a Constructed Wetland System. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(5), 1031. <https://doi.org/10.3390/ijerph15051031>

- De la Mora-Orozco, C., Saucedo-Terán, R. A., Gonzáles-Acuña, I. J., Gómez-Rosales, S. y Flores-López, H. E. (2020). Efecto de la temperatura del agua sobre la constante de velocidad de reacción de los contaminantes en un humedal construido para el tratamiento de aguas residuales porcícolas. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11, 1-17. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4681>
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- División de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura [FAOSTAT]. (4 de Marzo de 2020). *FAOSTAT*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QA>
- Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X. y Wang, W. (2015). Nutrient and organics removal from swine slurry with simultaneous electricity generation in an alum sludge-based constructed wetland incorporating microbial fuel cell technology. *Chemical Engineering Journal*, 266, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.063>
- Dúran, J., Balsa, L. y Cárdenas, M. (2020). Situación ambiental de las granjas porcinas inspeccionadas por el ministerio con competencia ambiental en el estado de Táchira, Venezuela. *Revista de investigación*, 44(100), 226-240.
- Feng, L., Wang, R., Jia, L. y Wu, H. (2020). Can biochar application improve nitrogen removal in constructed wetlands for treating anaerobically-digested swine wastewater? *Chemical Engineering Journal*, 379, 122273. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122273>
- Fernández, M. Á. (2018). *Dimensionamiento de una planta para la valorización mediante digestión anaerobia de los purines generados en una granja porcina* (Tesis de pregrado). Universidad de Cádiz, Cadiz.
- Fia, F., Matos, A., Fia, R., Borges, A. y Cecon, P. R. (2016). Efeito da vegetação em sistemas alagados construídos para tratar águas residuárias da suinocultura. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(2), 303-311. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016123972>
- Fia, R., Boas, R. B., Campos, A. T., Fia, F. R. y Souza, E. G. (2014). Removal of nitrogen, phosphorus, copper and zinc from sine breeding wastewater by bermudagrass and cattail in constructed wetland system. *Engenharia Agrícola*, 34(1), 112-113. <http://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100013>
- Gallo, B. E. y Gallo, L. D. (2016). *Dimensionamiento de instalaciones para el tratamiento de purines de una empresa porcina en confinamiento* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de la Pampa, Santa Rosa.
- Garaycochea, A. (2020). *Remoción de la demanda química de oxígeno del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas* (Tesis de pregrado). Universidad Científica del Sur, Lima.
- Garzón-Zúñiga, M. A. y Buelna, G. (2014). Caracterización de aguas residuales porcinas y su tratamiento por diferentes procesos en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 56-79. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000100006

- Ghosh, D. y Gopal, B. (2010). Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36(8), 1044-1051. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.017>
- Giácoman-Vallejos, G., Ponce-Caballero, C. y Champagne, P. (2015). Pathogen removal from domestic and swine wastewater by experimental constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 71(8), 1263-1270. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.102>
- González, J. M. (2010). Tratamiento aerobio asistido de las aguas residuales. En E. García Gallegos, E. García Nieto y M. A. Gómez Camarillo, *Perspectivas de Investigación en Genética y Ambiente* (págs. 47-65). México: Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- González-Ángel, L., Muñoz-García, M. Á., Gómez-Garrido, M., Terrero, M. A. y Faz-Cano, Á. (2015). Eficiencia de depuración de purines de cerdo mediante humedales artificiales, con dos tiempos de retención hidráulica. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, 8, 15-17.
- Guo, L., Lv, T., He, K., Wu, S., Dong, X. y Dong, R. (2016). Removal of organic matter, nitrogen, and fecal indicators from diluted anaerobically digested slurry using tidal flow constructed wetlands. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(6), 5486-5496. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8297-2>
- Guo, X., Cui, X. y Li, H. (2020). Effects of fillers combined with biosorbents on nutrient and heavy metal removal from biogas slurry in constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 703, 134788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134788>
- Han, Z., Dong, J., Shen, Z., Mou, R., Zhou, Y., Chen, X., . . . Yang, C. (2019). Nitrogen removal of anaerobically digested swine wastewater by pilot-scale tidal flow constructed wetland based on in-situ biological regeneration of zeolite. *Chemosphere*, 217, 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.036>
- Hu, Z., Chu, Y. y Ma, Y. (2020). Design of a Combined Constructed Wetland System and Its Application on Swine Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 146(1), 04019093. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001602](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001602)
- Huanca, Y. E. y Flores, F. (2020). *Remoción de fósforo total con cal artesanal en aguas de la bahía Sur del lago Titicaca de Puno* (Tesis de pregrado). Universidad Peruana Unión, Juliaca.
- Huang, J., Cai, W., Zhong, Q. y Wang, S. (2013). Influence of temperature on micro-environment, plant eco-physiology and nitrogen removal effect in subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 60, 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.023>
- Huerta, E. E. (2019). *Uso de la planta Eichhornia Crassipes “Jacinto de agua” para la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno en el agua residual porcina de la empresa Campoy, distrito de Aucallama, Huaral* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Huacho.
- Kizito, S., Lv, T., Wu, S., Ajmal, Z., Lou, H. y Dong, R. (2017). Treatment of anaerobic digested effluent in biochar-packed vertical flow constructed wetland columns: Role of media and tidal operation. *Science of the Total Environment*, 592, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.125>

- Kotti, I. P., Gikas, G. D. y Tsihrintzis, V. A. (2010). Effect of operational and design parameters on removal efficiency of pilot-scale FWS constructed wetlands and comparison with HSF systems. *Ecological Engineering*, 36(7), 862-875. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.002>
- Li, X., Li, Y., Li, Y. y Wu, J. (2019). Enhanced nitrogen removal and quantitative analysis of removal mechanism in multistage surface flow constructed wetlands for the large-scale treatment of swine wastewater. *Journal of Environmental Management*, 246, 575-582. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.019>
- Liu, F., Sun, L., Wan, J., Shen, L., Yu, Y., Hu, L. y Zhou, Y. (2020). Performance of different macrophytes in the decontamination of and electricity generation from swine wastewater via an integrated constructed wetland-microbial fuel cell process. *Journal of Environmental Sciences*, 89, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.08.015>
- Liu, L., Li, J., Fan, H., Huang, X., Wei, L. y Liu, C. (2019). Fate of antibiotics from swine wastewater in constructed wetlands with different flow configurations. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 140, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.04.002>
- López, C. (2016). *Evaluación de humedales artificiales a escala piloto para el tratamiento secundario de efluentes agroindustriales* (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Valle de Yeguaire.
- Luo, P., Liu, F., Liu, X., Wu, X., Yao, R., Chen, L., . . . Wu, J. (2017). Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum*. *Science of the Total Environment*, 576, 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.094>
- Luo, P., Liu, F., Zhang, S., Li, H., Cheng, X., Wu, L., . . . Wu, J. (2018). Evaluating organics removal performance from lagoon-pretreated swine wastewater in pilot-scale three-stage surface flow constructed wetlands. *Chemosphere*, 211, 286-293. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.174>
- Masi, F., Rizzo, A., Martinuzzi, N., Wallace, S. D., Van Oirschot, D., Salazzari, P., . . . Bresciani, R. (2017). Up-flow anaerobic sludge blanket and aerated constructed wetlands for swine wastewater treatment: a pilot study. *Water Science and Technology*, 76(1), 68-78. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.180>
- Mateo, N., Nani, G., Montiel, W., Nakase, C., Salazar-Salazar, C. y Sandoval, L. (2019). Efecto de *Canna hybrids* en humedales construidos parcialmente saturados para el tratamiento de aguas porcinas. *RINDERESU*, 4(1-2), 59-68.
- Mayta, R. y Mayta, J. (2017). Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(3), 331-340. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2017000300008&script=sci_arttext&tlng=en
- Mietto, A., Politeo, M., Breschigliaro, S. y Borin, M. (2015). Temperature influence on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system in Northern Italy. *Ecological Engineering*, 75, 291-302. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.027>

- Ministerio del Ambiente de Ecuador [MAE]. (2015). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua*.
- Muelas, V. (2017). Colaboraciones en Ciencias de la Naturaleza: Purines. Su impacto medioambiental en España. *Revista 100cias@ uned, Nueva época, 10*, 101-105.
- Muñoz, M. A., Rosales, R. M., Gabarrón, M., Faz, A. y Acosta, J. A. (2016). Effects of the Hydraulic Retention Time on Pig Slurry Purification by Constructed Wetlands and Stabilization Ponds. *Water Air & Soil Pollution, 9*, 227-293. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2993-x>
- Nagabhatla, N. y Metcalfe, C. (2018). *Multifunctional Wetlands*. New York: Springer International Publishing.
- Nehmtow, J., Rabier, J., Giguel, R., Coulomb, B., Farnet, A. M., Perissol, C., . . . Laffont-Schwob, I. (2016). Evaluation of an integrated constructed wetland to manage pig manure under Mediterranean climate. *Environmental Science and Pollution Research, 23*(16), 16383-16395. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6808-9>
- Nuñez, J. C. y Fragoso-Castilla, P. J. (2020). Uso de macroinvertebrados acuáticos como sistema de evaluación de las lagunas de estabilización El Salguero (Colombia). *Información tecnológica, 31*(3), 277-284. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000300277>
- Pincam, T. y Jampeetong, A. (2020). Treatment of Anaerobic Digester Effluent Using *Typha angustifolia* L.: Growth Responses and Treatment Efficiency. *Journal of Water and Environment Technology, 18*(2), 105-116. <https://doi.org/10.2965/jwet.19-045>
- Plaza de los Reyes, C. y Vidal, G. (2015). Effect of variations in the nitrogen loading rate and seasonality on the operation of a free water surface constructed wetlands for treatment of swine wastewater. *Journal of Environmental Science and Health, Part A, 50*(13), 1324-1332. <http://doi.org/10.1080/10934529.2015.1059106>
- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP]. (2017). *Informe mundial de Naciones Unidas sobre la valorización de recursos hídricos 2017, "Aguas residuales, el recurso desaprovechado"*. Paris: UNESCO.
- Ramos, C. (2017). *Evaluación de un sistema de tratamiento de lodos activados para la remoción de la carga orgánica en aguas residuales domesticas generadas en el colegio San Viator* (Tesis de pregrado). Universidad de América, Bogotá.
- Ramos-Ortega, L. M., Vidal, L. A., Vilarity, S. y Saavedra-Díaz, L. (2008). Análisis de la Contaminación Microbiológica (Coliformes Totales y Fecales) en la Bahía de Santa Martha, Caribe Colombiano. *Acta Biológica Colombiana, 13*(3), 87-98. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v13n3/v13n3a7.pdf>
- Reddy, G. B., Forbes, D. A., Hunt, P. G. y Cyrus, J. S. (2011). Effect of polyaluminium chloride on phosphorus removal in constructed wetlands treated with swine wastewater. *Water Science and Technology, 63*(12), 2938-2943. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.652>
- Rivas, A. (2019). *Evaluación del desempeño de humedales artificiales a escala piloto en la remoción de nitrógeno y fósforo de lixiviados agrícolas* (Tesis de pregrado). Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Valle de Yegua.

- Sandoval, L., Marín-Muñiz, J. L., Zamora-Castro, S. A., Sandoval-Salas, F. y Alvarado-Lassman, A. (2019). Evaluation of Wastewater Treatment by Microcosms of Vertical Subsurface Wetlands in Partially Saturated Conditions Planted with Ornamental Plants and Filled with Mineral and Plastic Substrates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 167. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020167>
- Sandoval-Herazo, M., Nani, G., Sandoval, L., Rivera, S., Fernández-Lambert, G. y Alvarado-Lassman, A. (2020). Evaluación del desempeño de humedales construidos verticales parcialmente saturado para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2), 38.
- Sifuentes, L. (2018). *Eficiencia del berro (Nasturtium officinale) de diferentes edades en humedales artificiales para la depuración de los purines de la porcícola comunal de Acopalca-Huari-Ancash-2018* (Tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Lima.
- Solís, R., López, G., Bautista, R. G., Hernández, J. R. y Romellón, M. J. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40-47. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/339/33943362007.pdf>
- Stein, O. R. y Hook, P. B. (2005). Temperature, Plants, and Oxygen: How Does Season Affect Constructed Wetland Performance? *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 40(6-7), 1331-1342. <https://doi.org/10.1081/ESE-200055840>
- Sun, G., Zhao, Y. y Allen, S. (2005). Enhanced removal of organic matter and ammoniacal nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system. *Journal of Biotechnology*, 115(2), 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.08.009>
- Sun, H., Liu, F., Xu, S., Wu, S., Zhuang, G., Deng, Y., . . . Zhuang, X. (2017). Myriophyllum aquaticum Constructed Wetland Effectively Removes Nitrogen in Swine Wastewater. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1932. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01932>
- Terrero, M. A., Muñoz, M. Á., Faz, Á., Gómez-López, M. D. y Acosta, J. A. (2020). Efficiency of an Integrated Purification System for Pig Slurry Treatment under Mediterranean Climate. *Agronomy*, 10(2), 208. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020208>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R. y Zurbrügg, C. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento* (Segunda ed.). Dübendorf: Eawag.
- Udom, I. J., Mbajiorgu, C. C. y Oboho, E. O. (2018). Development and evaluation of a constructed pilot-scale horizontal subsurface flow wetland treating piggery wastewater. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 3179-3185. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.04.002>
- Vymazal, J. (2018). Constructed wetlands for wastewater treatment. En B. Fath, *Encyclopedia of ecology* (págs. 14-21). Elsevier. <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11238-2>
- Vymazal, J. y Kröpfelová, L. (2008). *Tratamiento de aguas residuales en humedales artificiales con flujo horizontal sub-superficial* (Vol. 14). Springer Science & Business Media.
- Wang, Z., Dong, J., Liu, L., Zhu, G. y Liu, C. (2013). Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater. *Ecological Engineering*, 54, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.017>

- Wu, H., Fan, d. J., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Liang, S., . . . Liu, H. (2015). Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment. *Environment Science Pollution Research*, 22, 14637-14650. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5151-x>
- Zhang, X., Inoue, T., Kato, K., Izumoto, H., Harada, J., Wu, D., . . . Sugawara, Y. (2016). Multi-stage hybrid subsurface flow constructed wetlands for treating piggery and dairy wastewater in cold climate. *Environmental Technology*, 38(2), 183-191. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1187206>

7. ANEXOS

Anexo 1. Normativa de descarga de aguas residuales en Ecuador

Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible en	
		Cuerpos de agua dulce	Cuerpos de agua salada
Coliformes fecales	NMP /100mL	Remoción > 99%	108
DBO ₅	mg/L	50.0	200.0
DQO	mg/L	100.0	400.0
NTK	mg/L	50.0	40.0
P Total	mg/L	10.0	-
SST	mg/L	80.0	250.0

Fuente: (Ministerio del Ambiente de Ecuador [MAE], 2015)