



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL
TRATAMIENTO EFICIENTE DE LAS AGUAS RESIDUALES
MUNICIPALES**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. CUAUHTÉMOC GARCÍA LEÓN

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA

CODIRECTOR DE TESIS:

DRA. CINTHYA ALEJANDRA SOSA VILLALOBOS

ASESORES

DRA. ELENA RUSTRIÁN PORTILLA

DRA. MAGNOLIA GRISEL SALCEDO GARDUÑO

DICIEMBRE 2022

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO





ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: **A-01009-070120**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 10 del mes de octubre de 2020 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

“DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO EFICIENTE DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES”

Que presenta el (la) alumno(a):

CUAUHTEMOC GARCÍA LEÓN
Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

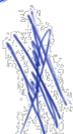
LA COMISIÓN REVISORA:



DRA. ITZEL GALAVIZ VILLA
Director



DRA. ELENA RUSTRIÁN PORTILLA
Co-Director



DRA. CINTHYA ALEJANDRA SOSA VILLALOBOS
Asesor



DRA. MAGNOLIA GRICEL SALCEDO GARDUÑO
Asesor



CONSTANCIA DE NO INCONVENIENCIA

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

La Maestría en Ciencias En Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Boca del Río está incluido en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) de CONACyT con la referencia 005071.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi madre. Sus esfuerzos fueron imprescindibles y su amor invaluable; “Madre, te dedico este logro desde el fondo de mi corazón”.

Cuauhtémoc García León

AGRADECIMIENTOS

A las doctoras Cinthya Alejandra Sosa Villalobos e Itzel Galaviz Villa por guiarme durante todo este proceso, gracias por su confianza.

A mi comité revisor de tesis por sus aportaciones para enriquecer este trabajo.

A las personas que contribuyeron en alguna parte del desarrollo de este trabajo.

Al cuerpo académico de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Boca del Río, Ver; por brindarme el apoyo para el desarrollo de esta investigación.

A CONACYT por el apoyo otorgado para el desarrollo de este proyecto.

A mi familia por estar en todo momento a mi lado, fue algo complicado por la pandemia, sin embargo, siempre me motivaron a seguir adelante.

A mis hijos, por otorgarme el tiempo necesario para lograr esta meta.

Agradecimientos especiales para mi esposa por guiarme con sus conocimientos, tiempo y paciencia; “Eres parte fundamental en este trabajo de grado, estuviste conmigo durante todas las adversidades que se presentaron durante este proceso. Plantaste en mi, la semilla de la ciencia, ahora es momento de recoger juntos los frutos obtenidos”

Gracias.

RESUMEN

Para cumplir con el objetivo de esta investigación se planteó la utilización de investigación aplicada, explicativa, método de investigación científico y diseño de investigación no experimental. Se realizó una caracterización bibliográfica en trabajos de diversos autores para identificar los tipos de contaminantes más comunes en las aguas residuales municipales (ARM). En este trabajo se propone diseñar un modelo de tratamiento conformado por un pretratamiento físico y biológico que en conjunto con un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal (HFSSH) coadyuven a la disminución de la carga de contaminantes presentes en este tipo de ARM. En el desarrollo de la investigación se obtuvo como resultado que los parámetros en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), tienen valores promedio de 393 y 260 mg/L respectivamente. En Sólidos Totales (ST) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) los datos reportan valores de alrededor de 851 y 257 mg/L respectivamente. Para el caso de los macronutrientes Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (PT), se identificaron valores de 82 y 12 mg/L. Al realizar la comparativa con los límites máximos permisibles establecidos en la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021., podemos aseverar que los parámetros identificados se encuentran por encima de los límites establecidos. A diferencia de DQO y DBO, en los macronutrientes (NT y PT) los valores son considerablemente más elevados con respecto a la normativa. Este mismo caso se presenta para las Grasas y Aceites (GyA), con valores de hasta 84 mg/L. Se estima teóricamente que el modelo de tratamiento propuesto con base en los requerimientos existentes en la remoción de contaminantes para ARM alcance porcentajes de remoción de hasta 93 y 94% para DBO y DQO respectivamente, 89% en ST, 73% en GyA, y 41 y 73% en PT y NT respectivamente.

ABSTRACT

To meet the objective of this research, the use of applied, explanatory research, scientific research method and non-experimental research design was proposed. A bibliographic characterization was carried out in works by various authors to identify the most common types of contaminants in municipal wastewater (ARM). In this work, it is proposed to design a treatment model consisting of a physical and biological pretreatment that, together with a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland (HFSSH), contribute to the reduction of the load of contaminants present in this type of ARM. In the development of the investigation, it was obtained as a result that the parameters in the Biochemical Oxygen Demand (BOD) and the Chemical Oxygen Demand (COD), have average values of 393 and 260 mg/L respectively. In Total Solids (TS) and Total Suspended Solids (TSS) the data report values of around 851 and 257 mg/L respectively. In the case of the macronutrients Total Nitrogen (NT) and Total Phosphorus (PT), values of 82 and 12 mg/L were identified. When making the comparison with the maximum permissible limits established in the MEXICAN OFFICIAL STANDARD NOM-001-SEMARNAT-2021, we can assert that the identified parameters are above the established limits. Unlike COD and BOD, in the macronutrients (NT and PT) the values are considerably higher with respect to the regulations. This same case occurs for Fats and Oils (G y A), with values of up to 84 mg/L. It is theoretically estimated that the proposed treatment model based on the existing requirements in the removal of contaminants for ARM reaches removal percentages of up to 93 and 94% for BOD and COD respectively, 89% in ST, 73% in G y A, and 41 and 73% in PT and NT respectively.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. ANTECEDENTES	17
2.1 AGUA Y SUS USOS.....	17
2.1.1 Disponibilidad de agua en México.....	18
2.2 AGUAS RESIDUALES.....	19
2.2.1 Clasificación y origen.....	20
2.2.2 Problemática mundial.....	20
2.2.3 Problemática en México.....	21
2.2.4 Problemática en Veracruz.....	22
2.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	22
2.3.1 Importancia del tratamiento de las aguas residuales.....	23
2.3.2 Tipos de tratamientos.....	23
2.3.2.1 Operaciones de pretratamiento.....	23
2.3.2.2 Tratamiento Primario.....	24
2.3.2.3 Tratamiento Secundario.....	25
2.3.2.4 Desinfección.....	25
2.3.3 Eficiencia de remoción de contaminantes de procesos convencionales.....	26
2.3.4 Tecnologías para tratamiento de aguas residuales.....	26
2.4 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	28
2.4.1 Clasificación de los humedales artificiales.....	29
2.4.2 Tipos de humedales artificiales.....	30
2.4.2.1 Humedales de flujo libre o superficial.....	30
2.4.2.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal.....	31
2.4.2.3 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical.....	32
2.4.3 Componentes de los humedales artificiales.....	32
2.4.4 Mecanismo de reducción de contaminantes.....	32
2.4.5 Interacción Sustrato-Planta- Microorganismo.....	33
2.4.5.1 Sustrato – Agua.....	33
2.4.5.1.1 Contenido de agua en el sustrato.....	33
2.4.5.2 Sustrato – Planta.....	34
2.4.5.3 Agua- Planta.....	34
2.4.5.3.1 Mecanismo de movimiento del agua en la planta.....	34
2.4.6 Dinámica de diseño en los humedales artificiales.....	35
2.4.6.1 Criterios del diseño.....	36
2.4.6.1.1 Aspectos geotécnico.....	36
2.4.6.1.2 Topografía.....	36
2.4.6.1.3 Caracterización geológica.....	37
2.4.6.1.4 Mecánica de suelos.....	37
2.4.6.1.5 Materiales.....	37
2.4.6.1.6 Canales y tuberías.....	38
2.4.6.1.7 Derivación de caudal.....	38
2.4.6.1.8 Bordos.....	38
2.4.6.1.9 Tipos de vegetación.....	38
2.4.6.1.10 Selección de vegetación.....	40
2.4.6.1.11 Adaptación de vegetación.....	40
2.4.7 Cálculo y dimensionamiento.....	40
2.4.7.1 Humedales de flujo superficial.....	41
2.4.7.2 Humedales de flujo subsuperficial.....	41
2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....	43
2.6 NORMATIVIDAD.....	44
2.6.1 Normatividad Nacional.....	44
2.6.2 Normatividad Estatal.....	45

3. JUSTIFICACIÓN	47
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	47
5. HIPÓTESIS.....	48
6. OBJETIVOS	48
6.1 GENERAL.....	48
6.1.1 Específicos	48
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.	48
7.2 PROPUESTA DE DISEÑO DE DEPURACIÓN	49
7.2.1 Perfil del proyecto.....	49
7.2.2 Zona de implementación	49
7.2.2.1 Factores ambientales	49
7.2.2.2 Consideraciones de topografía y geotecnia.....	50
7.2.3 Cálculo y dimensionamiento Pretratamiento.....	50
7.2.3.1 Cribado.....	50
7.2.3.2 Sedimentador Primario	50
7.2.3.2.1 Área superficial del sedimentador primario	50
7.2.3.2.2 Volumen del sedimentador primario	51
7.2.3.3 Trampa de grasas y aceites.....	51
7.2.3.4 Módulos de contacto y estabilización.....	51
7.2.3.5 Sedimentador secundario	53
7.2.3.5.1 Área superficial del sedimentador secundario	53
7.2.3.5.2 Volumen del sedimentador secundario	53
7.2.3.6 Materiales de construcción	53
7.2.4 Humedal Artificial de Flujo subsuperficial Horizontal.....	53
7.2.4.1 Cálculos y dimensionamiento.....	53
7.2.4.1.1 Caudal.....	53
7.2.4.1.2 Tiempo.....	54
7.2.4.1.3 Pendiente de fondo	54
7.2.4.1.4 Tiempos de retención hidráulica	55
7.2.4.2 Selección de materiales de construcción	56
7.2.4.2.1 Medio de soporte (granular).....	56
7.2.4.3 Selección de macrófitas	56
7.2.5 Diseño en planta del tren de tratamiento.....	57
7.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO.....	57
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
8.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA	58
8.2 PROPUESTA DE DISEÑO DE DEPURACIÓN	66
8.2.1 Perfil del proyecto.....	66
8.2.2 Zona de implementación	66
8.2.2.1 Consideraciones de topografía y geotecnia del área	67
8.2.3 Factores ambientales considerados.....	67
8.2.4 Cálculos y dimensionamiento del pretratamiento.....	68
8.2.4.1 Cribado.....	68
8.2.4.2 Sedimentador primario	69
8.2.4.3 Trampa de grasas y aceites.....	69
8.2.4.4 Módulos de contacto y estabilización, reducción de nitrógeno.....	70
8.2.4.5 Sedimentador secundario.....	72
8.2.4.6 Materiales de construcción	73
8.2.5 Humedal Artificial de Flujo subsuperficial Horizontal.....	74
8.2.5.1 Cálculos y dimensionamiento.....	74
8.2.5.2 Materiales de construcción	75

8.2.5.4 Medios de soporte.....	75
8.2.5.4.1 Materiales para el sustrato	75
8.2.5.4.2 Macrófitas	76
8.2.6 Diseño en planta del sistema de tratamiento.....	84
8.2.6.1 Diseño en 2D	84
8.2.7 Consideraciones de diseño	86
8.3 EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL HUMEDAL ARTIFICIAL (HA)	87
9. CONCLUSIONES.....	89
10. LITERATURA CITADA	90

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Porcentajes de eficiencias de remoción con base en diversos autores.	27
Cuadro 2.	Ecuaciones para el diseño hidráulico de HA, metodología EPA (1993).	43
Cuadro 3.	Comparativo de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización de ARM.	49
Cuadro 4.	Cálculos para la operación de los módulos de concentración y estabilización.	52
Cuadro 5.	Tipos de clasificación para aguas residuales.	58
Cuadro 6.	Caracterización de las ARM reportadas por diversos autores.	63
Cuadro 7.	Valores promedio de parámetros obtenidos en ARM.	65
Cuadro 8.	Características generales del municipio de Veracruz, Ver; México.	66
Cuadro 9.	Características estructurales del sistema de cribado.	68
Cuadro 10.	Características estructurales del sedimentador primario.	69
Cuadro 11.	Características estructurales de la trampa de grasas y aceites.	70
Cuadro 12.	Cálculos para el dimensionamiento de los módulos de contacto y estabilización.	70
Cuadro 13.	Dimensiones y capacidad del MC y ME para la reducción de nitrógeno.	71
Cuadro 14.	Características estructurales del sedimentador secundario.	72
Cuadro 15.	Especificaciones de las tuberías de PVC.	73
Cuadro 16.	Especificación de materiales para construcción obra civil pretratamiento.	73
Cuadro 17.	Parámetros de diseño del HFSSH.	74
Cuadro 18.	Dimensionamiento del diseño del HFSSH propuesto.	74
Cuadro 19.	Especificación de tuberías PVC para alimentación HFSSH.	75
Cuadro 20.	Especificación de materiales para construcción del HFSSH propuesto.	75
Cuadro 21.	Tipos de granulometrías recomendados para los HA.	76
Cuadro 22.	Tipos de sustratos recomendados para los HA.	76
Cuadro 23.	Macrófitas comúnmente utilizadas para HA en las regiones del estado de Veracruz.	77
Cuadro 24.	Clasificación taxonómica de <i>Typha spp.</i>	77
Cuadro 25.	Desempeño en la remoción de contaminantes de la especie <i>Thypha</i> .	78
Cuadro 26.	Valores teóricos de remoción por parámetro del HFSSH propuesto.	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Cuencas de México y disponibilidad de agua en el país.	18
Figura 2.	Acuíferos de México y disponibilidad de agua en el país.	19
Figura 3.	Clasificación de humedales artificiales.	29
Figura 4.	Humedal de flujo superficial o libre.	30
Figura 5.	Humedal de flujo subsuperficial horizontal.	31
Figura 6.	Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes.	39
Figura 7.	Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas.	39
Figura 8.	Esquema general del proceso de lodos.	52
Figura 9.	Esquema del cribado como pretratamiento.	68
Figura 10.	Esquema de sedimentador primario.	69
Figura 11.	Esquema de la trampa de grasas y aceites.	70
Figura 12.	Esquema del MC y ME.	71
Figura 13.	Esquema de sedimentador secundario.	73
Figura 14.	Propuesta de dimensionamiento del HFSSH.	74
Figura 15.	Esquema descriptivo de especies de <i>Thypha</i> .	78
Figura 16.	Esquema de diseño del HFSSH en 2D.	84
Figura 17.	Valores teóricos de remoción por parámetro en el HFSSH propuesto.	87

ABREVIATURAS

AR	Aguas Residuales
ARM	Aguas Residuales Municipales
C_e	Concentración efluente
CF	Coliformes fecales
C_o	Concentración afluente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
GyA	Grasas Y Aceites
HA	Humedales Artificiales
HFS	Humedales Artificiales de Flujo Superficial
HFSS	Humedales Artificiales de Flujo SubSuperficial
HFSSV	Humedales Artificiales de Flujo SubSuperficial Vertical
HFSSH	Humedales Artificiales de Flujo SubSuperficial Horizontal
K_s	Conductividad hidráulica
K_t	Constante de reacción de primer orden, depende de la temperatura
NT	Nitrógeno Total
NNH₄	Nitrógeno amoniacal
N-ORG	Nitrógeno Orgánico
OD	Oxígeno Disuelto
pH	potencial Hidrógeno
PT	Fósforo Total
SS	Sólidos Suspendidos
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
Ssed.	Sólidos Sedimentables
T	Temperatura

1. INTRODUCCIÓN

A nivel global, existe una importante brecha de desigualdad en el acceso a servicios de agua potable y de saneamiento, la cual se intensifica en las zonas rurales, y aún más, en países con un alto índice de pobreza (Rowan *et al.*, 2018). La contaminación de cuerpos de agua por el vertimiento de aguas residuales (AR) sin tratamiento previo, es un problema que afecta en mayor grado a países en vía de desarrollo, y que influye en la pérdida de calidad de los recursos hídricos (CONAGUA, 2016 La falta de tratamiento de las AR generadas es un obstáculo en México que limita el goce con plenitud del derecho humano al agua (Núñez, 2017). En México, el tratamiento de AR mantiene numerosas limitaciones (De Dios *et al.*, 2017). Son escasos los recursos gubernamentales destinados a tratar las AR producidas para ser reutilizadas. Asimismo, sólo algunas investigaciones están dirigidas al tratamiento de AR en países en vías de desarrollo, con métodos ecológicos que reduzcan costos de construcción y operación de los sistemas convencionales (Hernández-Salazar *et al.*, 2018). La demanda de sistemas de tratamiento de AR aumenta continuamente, hoy en día la atención se centra en los microcontaminantes con el potencial de causar efectos disruptores o alteradores endocrinos, y acumularse en el ciclo del agua o alterar los ecosistemas. La construcción de plantas de tratamiento en áreas urbanas, ha llegado a ser un problema por lo cual se han buscado opciones más compactas (Hernández-García, 2017). Actualmente, existen diversas tecnologías de tratamiento con excelentes resultados (Granados, 2019). Una de las tecnologías más implementadas son los Humedales Artificiales (HA). Los cuales, son sistemas específicamente diseñados y construidos por el hombre para el tratamiento de AR, en estos se aumentan las capacidades depuradoras de la vegetación y con ello la eficacia del sistema. Al optimizar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los ecosistemas de humedales naturales se contribuye de manera sustancial en la remoción de contaminantes (Vymazal, 2007). Dos procesos críticos influyen en el rendimiento del proceso de tratamiento en los humedales: la dinámica microbial y la hidrodinámica. Los procesos microbiales son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las AR en los humedales (Llagas Chafloque, 2006).

En general, en un humedal artificial se replican las características y capacidad de reciclaje de las aguas. Para ello, sobre una superficie expresamente excavada con fondo impermeabilizado, se siembra vegetación que proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, donde se facilita la filtración por la alta densidad vegetal y se propicia la adsorción de los constituyentes del AR; lo que permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar. En Latinoamérica, los sistemas de depuración de AR son poco efectivos y las condiciones ambientales, culturales y socio-económicas de nuestro país requieren tecnologías como los HA para optimizar y mejorar los tratamientos en AR. Algunos de los beneficios de la implementación de estas tecnologías son el bajo costo, facilidad de operación y buena eficiencia, comparada con los sistemas de tratamiento convencionales (Cardona, 2009).

2. ANTECEDENTES

2.1 Agua y sus usos

El agua es una de las mayores preocupaciones para la humanidad, tanto por el riesgo de escasez mundial, como por el creciente déficit en su calidad y las desigualdades en el acceso a este recurso. El desperdicio, la presión demográfica, la contaminación, la destrucción de los ecosistemas acuíferos y la escasez de sistemas adecuados de distribución y alcantarillado, son algunos de los problemas más ligados al agua (Navarro, 2004). Estos problemas surgen de su naturaleza, es una sustancia fundamental para la vida, interviene en los procesos individuales de los seres vivos, así como en los procesos del planeta y es indispensable para todas las actividades humanas, desde la agricultura rudimentaria hasta la industria más compleja (Guerrero, 2010). De acuerdo con los estudios sobre los balances hídricos del planeta solamente el 0.007% de las aguas dulces se encuentran realmente disponibles para todos los usos humanos directos. De esta porción dependen procesos sociales vitales (Toledo, 2002). Se estima que el consumo humano actual de este recurso ronda los 3600 km³ anuales, lo cual puede dar la impresión de que hay abundancia de agua, sin embargo; un volumen de ésta debe permanecer en la naturaleza para preservar ecosistemas acuáticos y diluir la contaminación. A este

volumen se le denomina caudal ecológico, y aunque es difícil de calcular, se estima en 2350 km³ anuales. Si al consumo humano sumamos el caudal ecológico, podemos decir que el agua económicamente disponible es de 6000 km³ /año, aproximadamente. Dado que el agua y la población no están uniformemente distribuidas, la situación ya es crítica en varios países y regiones, y es probable que este problema se intensifique en el futuro. La agricultura es el sector económico de mayor consumo de agua, ya que su gasto alcanza alrededor del 70% del agua total utilizada en el mundo. Si comparamos la cantidad de agua que empleamos en el aseo personal o directamente para beber, con la utilizada en la producción de alimentos o bienes de consumo, el nivel de uso de agua en los hogares es poco representativo y alcanza a ser tan sólo el 10% del gasto, frente al 70% de la agricultura y el 20% de la industria (Parada-Puig, 2012). La mayoría de los recursos de agua dulce del planeta se encuentran en sólo seis países: Brasil, Rusia, Canadá, Estados Unidos, China e India. Más del 40% de los ríos del mundo se encuentran en estos países. El mayor de ellos, el Amazonas, contribuye con el 16% de los montos totales descargados por los ríos del planeta (Toledo, 2010).

2.1.1 Disponibilidad de agua en México

Las aguas superficiales del país se distribuyen en 757 cuencas, de las cuales 649 cuentan con disponibilidad de agua (Figura 1). En cuanto a las aguas subterráneas, las unidades hidrogeológicas administrativas son 653, denominados acuíferos, de los que se han identificado 408 con disponibilidad (Figura 2) (DOF, 2018).

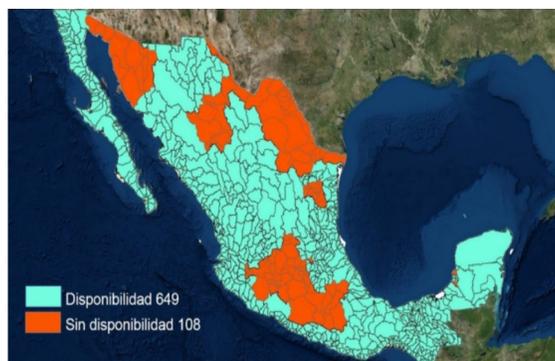


Figura 1. Cuencas de México y disponibilidad de agua en el país. Fuente: CONAGUA (2018).



Figura 2. Acuíferos de México y disponibilidad de agua en el país. Fuente: CONAGUA (2018).

La cifra de personas sin acceso adecuado al agua es de 1 100 millones y 2 400 millones sin acceso a servicios básicos de sanidad (Guerrero, 2010). Para esto es importante evaluar la calidad del agua, misma que se determina mediante su caracterización física y química de acuerdo con las normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado; por ejemplo: el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos (ONU, 2017). El deterioro de la calidad del agua ocurre por procesos naturales o antropogénicos, la evaluación de la calidad del agua se lleva a cabo con base en cuatro indicadores: DBO₅, DQO, SST y Coliformes Fecales (CF) (CONAGUA, 2018).

2.2 Aguas residuales

Las AR son aquellas cuya calidad ha sido afectada negativamente por la actividad humana, las cuales provienen de viviendas, poblaciones e industrias. Estas aguas representan un peligro para el medio ambiente y la salud humana, por tanto deben ser desechadas debido a que contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos (Cruz, 2017).

La composición de las AR depende de diversos factores. Entre estos, el consumo promedio de agua por habitante por día, que afecta su concentración (cantidad); y los hábitos de la población que altera la composición química (calidad). En general,

las AR contienen aproximadamente un 99.9% de agua y el resto está constituido por materia sólida. Los residuos sólidos están conformados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de los subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimiento. La materia orgánica proviene exclusivamente de actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas (Rojas R., 2002).

2.2.1 Clasificación y origen

La AR, se clasifican dependiendo sus orígenes:

- **Aguas residuales domésticas o municipales:** proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa.
- **Aguas residuales blancas:** pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos.
- **Aguas residuales industriales:** proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal.
- **Aguas residuales agrícolas:** procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales.

La eliminación de los residuos ha constituido un problema primordial para las sociedades humanas; debido a la necesidad de eliminar desechos como las excretas y restos alimenticios (Espigares, 1985). Por tanto, se debe considerar que la cantidad de AR depende directamente de la densidad poblacional, de esta forma se realiza la determinación del caudal del AR en función de la población equivalente. El caudal del AR es variable a lo largo del día y también a lo largo del año (Metcalf y Eddy, 1995). Durante las últimas décadas, se han analizado diversas opciones para resolver la problemática relacionada con la disposición de los residuos líquidos procedentes del uso doméstico, agrícola e industrial (Espigares, 1985).

2.2.2 Problemática mundial

En 2015, el 68% de la población mundial utilizaba algún tipo de saneamiento, de los cuales el 82% en zona urbana y el 51% en zonas rurales. En este mismo año, 2,400

millones de personas principalmente en Asia, África Subsahariana, América Latina y el Caribe, continuaban sin acceso a servicios de saneamiento mejorados. En 2018, se estimó que 946 millones de personas defecan al aire libre (CONAGUA, 2018).

2.2.3 Problemática en México

México está dividido políticamente en 32 entidades federativas, 2457 municipios, 31,873 ejidos y 34,362 comunidades rurales, sin embargo; la mayoría de estas poblaciones carecen de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Para el año 2017, se contaba con 2,526 PTAR, y para fines de 2018 apenas se incrementó a 2540 (CONAGUA, 2018). Cabe señalar que, del total de las PTAR construidas, un gran porcentaje se encuentran fuera de funcionamiento o inoperables. Lo anterior, significa que las AR no tratadas están siendo descargadas en los cuerpos naturales de agua tales como arroyos, ríos, lagos y océanos (Díaz-Cuenca *et al.*, 2012). En la actualidad, el porcentaje de ARM, que se trata en los países subdesarrollados apenas es del 10% (Reynolds, 2002). En América Latina es aproximadamente 14% (Silva, 2006). Esto se debe principalmente a los altos costos de las plantas de tratamiento (Kivaisi, 2001).

En México, solamente se tratan $135.60 \text{ m}^3/\text{s}$ de los $234.90 \text{ m}^3/\text{s}$ que se generan; es decir, sólo 57.73% (CONAGUA, 2016). El porcentaje que representa el agua empleada en usos consecutivos, respecto al agua renovable, es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico de un país, cuenca o región. El grado de presión puede ser muy alto, alto, medio, bajo y sin estrés. A escala nacional, México experimenta un grado de presión del 19.5%, lo cual se considera de nivel bajo; sin embargo, las zonas centro, norte y noroeste del país experimentan un alto grado de presión (CONAGUA, 2018). A pesar de que la Ley de Aguas Nacionales obliga a los usuarios a dar tratamiento al agua que se utilice, esto no se lleva a cabo. Únicamente, el municipio de Monterrey tiene la capacidad para tratar el 100% del agua que se utiliza. En la Ciudad de México, sólo se trata un 20% del agua residual, aproximadamente (CONAGUA, 2010).

2.2.4 Problemática en Veracruz

Veracruz, es un estado influenciado por más de 40 ríos, esto es el 35 % de las aguas superficiales del país; es también la entidad que arroja más descargas de aguas negras a las afluentes naturales y sólo el 5 % es procesada, lo que ha provocado que siete de cada diez cuencas veracruzanas se encuentren “altamente contaminadas”, según reportes de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017). El marco jurídico lo constituye la Ley de Aguas del Estado de Veracruz, donde se encuentra la distribución de competencias entre la autoridad estatal del agua (Comisión de Aguas del Estado de Veracruz, CAEV), los municipios y los organismos operadores. El artículo 71 de la Constitución del Estado de Veracruz recoge la posibilidad de que mediante convenio la prestación del servicio público del agua se ejerza por la autoridad estatal, tal como sucede, en conjunto, con organismos operadores municipales y uno intermunicipal (Domínguez, 2010).

2.3 Tratamiento de aguas residuales

A partir de los años 60, términos como contaminación del agua, protección del medio ambiente y ecología; pasaron a ser palabras de uso común. Antes de esas fechas estos términos pasaban desapercibidos para el ciudadano o se consideraban ideas confusas. Actualmente, el tratamiento de AR incluye tantos procesos de tratamiento y equipos, que fue evidente la necesidad de aplicar ingeniería en la resolución de los problemas del AR (Ramalho, 2021). En las últimas décadas, se han desarrollado una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de AR. Cada uno de estos se caracteriza por una serie de limitaciones relativas a su grado de aplicabilidad, eficiencia y costos económicos (Arnáiz *et al.*, 2000). El tratamiento de AR pretende eliminar los contaminantes hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales o internacionales. De acuerdo con la diversidad de contaminantes presentes en las aguas residuales, se define el tratamiento y las técnicas se clasifican según su operación; en convencionales y alternativas (Díaz-Cuenca, 2012).

2.3.1 Importancia del tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las AR es relativamente reciente. Su inicio data de finales de 1800 y principios del actual siglo y coincide con la época de la higiene. Esto se desarrolló como consecuencia de la relación entre contaminación de los cursos y cuerpos de agua, y las enfermedades de origen hídrico. En un principio, el tratamiento se hacía mediante el vertido de las AR al suelo, pero las superficies de los terrenos no fueron suficientes para absorber el cada vez mayor volumen de AR. En Inglaterra, después de la epidemia del cólera de mitad del siglo XIX, se inició la construcción de los sistemas de alcantarillado, pero el tratamiento de AR recibió pequeña atención. Debido a lo pequeño de sus ríos en longitud y caudal, la contaminación del agua se convirtió en un problema. Al principio, el tratamiento estuvo dirigido a evitar problemas con la industria y agricultura más que a los problemas de salud (Rojas, 2002). El no tratar las AR antes de ser depositadas en cuerpos de agua receptores trae como consecuencia enfermedades diarreicas como el cólera, tifoidea y disentería. Las cuales siguen causando decesos entre la población mundial que no cuenta con los adecuados servicios de saneamiento. Estas muertes podrían evitarse si se tomaran acciones en temas de alcantarillado y saneamiento, ya que la mayoría de estas enfermedades se propagan por el agua contaminada, saneamiento inadecuado y malos hábitos de higiene (Corcoran *et al.*, 2010).

2.3.2 Tipos de tratamientos

Rodríguez *et al.*, (2015) indica que las PTAR son utilizadas para efectuar la remoción de contaminantes presentes en el AR cruda y deben responder a una alta variabilidad temporal del flujo o caudal de entrada, así como a la variabilidad de las concentraciones o componentes propios de esta agua.

Las etapas en el tratamiento de las AR son:

2.3.2.1 Operaciones de pretratamiento

Una PTAR dependen de:

- La procedencia del AR (doméstica, industrial, etc).
- La calidad del agua bruta a tratar (mayor o menor cantidad de grasas, arenas sólidas, etc.)

- Del tipo de tratamiento posterior de la PTAR
- De la importancia de la instalación, entre otras.

Las operaciones son:

- Separación de grandes sólidos (Pozo de Gruesos)
- Desbaste
- Tamizado
- Dilaceración
- Desarenado
- Desaceitado-desengrasado
- Preaireación

En esta etapa, se retiran los sólidos como; madera, papel, trapos y plástico; se lavan, secan y eliminan en un botadero de basura autorizado. El cascajo y la arena que puedan dañar las bombas, también se eliminan de manera similar (Díaz-Cuenca, 2012).

2.3.2.2 Tratamiento Primario

Existen múltiples procesos que se pueden considerar incluidos dentro del tratamiento primario (filtración, tamizado, ciertos lagunajes, fosas sépticas, tanques Imhoff, etc.), los principales procesos se pueden clasificar según:

Procesos de separación sólido-líquido:

- Sedimentación (también llamada decantación primaria)
- Flotación
- Proceso mixto (decantación-flotación)

Procesos complementarios de mejora:

- Floculación
- Coagulación (proceso físico-químico)

En esta etapa, se decantan los sólidos (lodos) y pueden ser utilizados en la agricultura después de pasar por un nuevo tratamiento, llamado “tratamiento de lodos” (Díaz-Cuenca, 2012).

2.3.2.3 Tratamiento Secundario

La materia orgánica que queda disuelta y en suspensión así como el resto de las partículas sólidas que no se han eliminado en los tratamientos anteriores, son eliminadas mediante los denominados “Procesos Biológicos de Depuración Aerobia”, que en la línea de aguas constituyen los tratamientos secundarios. Podemos definir los “Procesos Biológicos de Depuración Aerobia”, como aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos) que en presencia de Oxígeno, actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el AR, transformándola en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación. La unión de materia orgánica, bacterias y sustancias minerales forma los flóculos y el conjunto de flóculos es lo que todos conocemos como fango biológico (Wiki, 2007). Es un proceso biológico, está basado en la presencia de microorganismos que descomponen la materia orgánica y purifican el líquido. Después de cualquier tratamiento secundario, el AR se decanta en estanques para separar el lodo biológico del agua residual purificada. En ocasiones, es necesario un tratamiento adicional para darle un “pulimento” al agua residual, el cual se conoce como tratamiento terciario y en el que se usan varios métodos como filtros de arena, lechos de caña o lotes de pasto. Básicamente, existen dos tipos de tratamientos biológicos aerobios; Procesos de Cultivo en Suspensión (Fangos Activados) y Procesos de Cultivo Fijo (Lechos Bacterianos) (Díaz-Cuenca, 2012).

2.3.2.4 Desinfección

La desinfección del agua significa la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento. Si estos microorganismos no son eliminados el agua no es potable, porque al beberla puede causar enfermedades (Díaz-Cuenca, 2012). La utilización del cloro como desinfectante es el método de desinfección más común, la cloración juega un papel muy importante en todo el mundo para evitar infecciones. Se están utilizando numerosos derivados clorados para llevar a cabo estas desinfecciones, como pueden ser cloro gas, hipoclorito o dióxido de cloro; el ácido hipocloroso es el

que efectúa una función germicida (Sabath, 2012). En la década de los 70 el descubrimiento de los trihalometanos (THM) presentes en el agua a causa de los procesos de cloración, generó distintas líneas de investigación para evitar la formación de estos productos. Lo que permitió la implementación del ozono como agente oxidante en la desinfección de aguas potables; el cual no es aplicable únicamente a aguas potables, también se emplea en la desinfección de AR (Beltrán, 2015). Además del uso de químicos u ozonificación, existen otros tipos de desinfectantes avanzados, como las plantas nucleares, cuyos equipos y técnicas son de elevados costos (Díaz-Cuenca, 2012).

2.3.3 Eficiencia de remoción de contaminantes de procesos convencionales

Ras (2000), indican que las eficiencia de remoción en procesos convencionales como los lodos activados para DQO y DBO₅ ascienden a 80 y 90% respectivamente, en NT alcanza eficiencias de hasta 30%, mientras que, para FT un 20%. Otros autores como Yañez (2005) coinciden con estos valores, reportando un 80 y 90% de remoción en DQO y DBO₅, respectivamente. Von Sperling (1996) reporta valores de 85 y 90% para DQO y DBO₅ respectivamente con lodos activados. Von Sperlin afirma que en la eficiencia de remoción de nitrógeno en lodos es de 50%, mientras que para FT es del 45%. De igual forma indica que el Oxígeno Disuelto (OD) juega un papel fundamental para obtener buenas eficiencias de remoción de estos contaminantes para este tipo de tratamientos convencionales.

2.3.4 Tecnologías para tratamiento de aguas residuales

En las últimas décadas se han desarrollado un gran número de tecnologías para el tratamiento de AR especializadas en la recuperación y reutilización del agua. (Subtil *et al.*, 2014). Para la selección de una tecnología se debe considerar la metodología apropiada al tipo de AR a tratar, así como la inversión económica. Por ello la tecnología debe basarse en factores de sostenibilidad, el análisis del ciclo de vida y los costos asociados a la inversión, operación y mantenimiento (Geldermann, 2004). Sin embargo, esto muchas veces no se toma en cuenta para la selección (Kalbar, 2012). En el cuadro 1 se observan las eficiencias de remoción de las diferentes tecnologías para el tratamiento de ARM.

Cuadro 1. Porcentajes de eficiencias de remoción con base en diversos autores.

TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO	REFERENCIA	EFICIENCIA DE REMOCIÓN (%)									
		SST	DBO5	DQO	N NH3	N ORG	N NO3	N TOTAL	P PO4	P TOTAL	COLIFORMES
DESARENADOR CONVENCIONAL	Ras (2000)	0-10	0-5	0-5							
	Metcalfe & Eddy (2001)	0-10	0-5	0-5							
	Metcalfe & Eddy (2001)	50-65	30-40	30-40		10-20			10-20		
SEDIMENTADOR PRIMARIO	Fair (1954)	40-70	25-40	20-35							25-75
	Yañez (1995)	40-70	25-40								25-75
TANQUE SÉPTICO	Batalha (1989)	50-70	40-62					<10	<10		<60
TANQUE SÉPTICO - FILTRO	Von Sperling (1996)		70.9					10.25	10-20		60-90
TANQUE IMHOFF	Tchobanoglous (2000)	50	40								
PRIMARIO AVANZADO	Yañez (2005)	70-90	50-85								40-80
	Ysukamoto (2002)	73-84	46-70					<30	10-20		80-90
FILTRO ANAEROBIO	Ras (2000)	60-70	65-80	60-80					30-40		
	Rodríguez et al. (2006)			75-85							
	Torres (2000)	60-80	60-70					10-25	10-20		60-90
UASB	Ras (2000)	60-70	65-80	65-80					30-40		
	Valencia (2002)	72	83	74							
	Lettinga Et Al. (1983)			55-78							
UASB - LAGUNA FACULTATIVA	CDMB (2006)	84	88								
UASB LODO ACTIVO	Van Haandel - Lettinga	85-95	85-85					15-25	10-20		70-95
UASB LODO ACTIVO SBR	Torres (2000)	84-86	87-93					20-90	23-72		
REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO PISTÓN RAP	Ras (2000)	60-70	65-80	60-80					30-40		
REACTOR ANAEROBIO DE CONTACTO	Rodríguez et al. (2006)			75-90							
REACTOR ANAEROBIO DE LECHO FLUIDIZADO	Rodríguez et al. (2006)			80-85							
	Ras (2000)	80-90	80-95	80-95		15-20			10-25		
LODO ACTIVADO CONVENCIONAL	Yañez (1995)	85-98	70-98								95-98
	Fair (1954)	55-95	55-95	50-80							90-98
	Von Sperling (1996)	80-90	85-93					30-40	30-45		60-90
LODO ACTIVADO - SBR	Von Sperling (1996)	80-90	85-95					30-40	30-45		60-90
LODO ACTIVADO - AIREACIÓN PROLONGADA	Von Sperling (1996)		93-98					15-30	10-20		65-90
	Yañez (1995)	70-90	60-85								90-95
FILTRO PERCOLADOR ALTA TASA	Metcalfe & Eddy (2001)	60-85	65-80	60-80	8-15			15-30	8-12		90-95
	Von Sperling (1996)	85-95	80-93					30-40	30-45		60-90
FILTRO PERCOLADOR SÚPER TASA	Ras (2000)	65-85	65-85	65-85	8-15	15-50			8-12		
LAGUNA AEROBIA	Ferrer (2009)		60-80								
	Mara (1980)		50-85								
LAGUNA ANAEROBIA	Arceivala (1984)		30-70								
	Ras (2000)	20-60	50-70								90-99.99
	Mara (1980)		80-95								
LAGUNAS AIREADAS	Mendoza (2000)		50-60								
	Ras (2000)	85-95	80-95								90-99.99
	Ras (2000)	63-75	80-90						30		90-99.99
LAGUNAS FACULTATIVAS	Fair (1954)	85-95	90-95	70-80							95-98
	Yañez (1995)	90-99	75-95								98-99.99
LAGUNAS DE MADURACIÓN	Mara (1980)		80-95								
	Ras (2000)	85-95	60-80								90-99.99
LAGUNAS HUMEDAL	Caicedo (2005)	87-93	80-90	94				37-48	45-50		
	Liu & Liptack (2000)		85-95								
BIODISCOS	Torres (2000)	85-95	85-93					30-40	30-45		60-90
	Metcalfe & Eddy (2001)	80-85	80-85	80-85	8-15			15.2	10-25		

Fuente: Miranda (2015).

2.4 Humedales Artificiales

Los HA se definen como áreas que se encuentran inundadas o saturadas bien sea por aguas subterráneas o superficiales; con una frecuencia, duración y profundidad suficiente para mantener especies de plantas predominantes, adaptadas a crecer en suelos saturados, con un lecho rocoso (gravas, arenas) y sedimentos finos (arcillas, limos), y vegetación emergente. Las cuales aprovechan las interacciones con los organismos y la atmósfera para remover la materia orgánica (Arias y Brix, 2003). El uso de los HA para el tratamiento de aguas se encuentra documentado desde 1912. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) fue la primera en realizar un muestreo en el periodo comprendido de los años 1960 a 1970. De igual forma, también se documentan los proyectos realizados en todo el mundo de 1972 a 1983; a partir de 1970 se inician los estudios sobre la depuración de N y P por medio de los HA. En la década de 1970 se estudian los humedales construidos con la finalidad de depurar pesticidas. Durante 1990 se estudió la depuración de nutrientes por medio de HA ubicados en ríos (Vymazal y Březinová, 2015). La NASA estudió esta Ecotecnología y desarrolló su propio sistema al cual llamaron “Sistema de tratamiento híbrido” debido a que utiliza microorganismos anaerobios y plantas emergentes *P. communis* (Rodríguez, 2003). Los HA son una alternativa viable y sustentable para la depuración de AR de tipo industrial, agropecuaria y doméstica (Kivaisi, 2001). Su implementación tiene un menor costo en comparación con los sistemas de tratamiento convencional, son amigables con el entorno paisajístico, no generan subproductos nocivos y se adaptan a las condiciones tanto climáticas como urbanas de México. Otra ventaja de estos sistemas es la posibilidad de combinarse con otros procesos depuradores ya existentes, a fin de optimizar su rendimiento (Luna-Pabello, 2014). Los HA son conocidos por ser un proceso de tratamiento eficiente y de bajo costo, por lo tanto, son considerados como ecosistemas de tratamiento natural que están diseñados para aprovechar los procesos naturales lo cuales proporcionan tratamiento a las AR. Los humedales artificiales se han utilizado para el tratamiento de ARM, industriales, ácidas y agrícolas (Bani-Melhem *et al.*, 2015). Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de

AR: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica (Yañez, 1999). En México, los HA se han implementado en los estados de Colima, Chihuahua, Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Tamaulipas y Tlaxcala (CNA, 2007). Actualmente, los HA son utilizados ya sea de manera individual o de manera combinada con otros procesos. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento, existen en México 2 337 PTAR en operación, de las cuales 211 (11.08 % del total) corresponden a HA. Lo que indica la importancia del desarrollo de esta alternativa de tratamiento, tanto en áreas rurales, así como en ciudades con caudales hasta de 120 litros por segundo (Conagua, 2012).

2.4.1 Clasificación de los humedales artificiales

De acuerdo con Delgadillo (2010), el tipo de macrófitas que utilicen para su funcionamiento (figura 3), pueden clasificar a los HA en:

- a) Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes: principalmente angiospermas sobre suelos anegados.
- b) Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas
- c) Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes

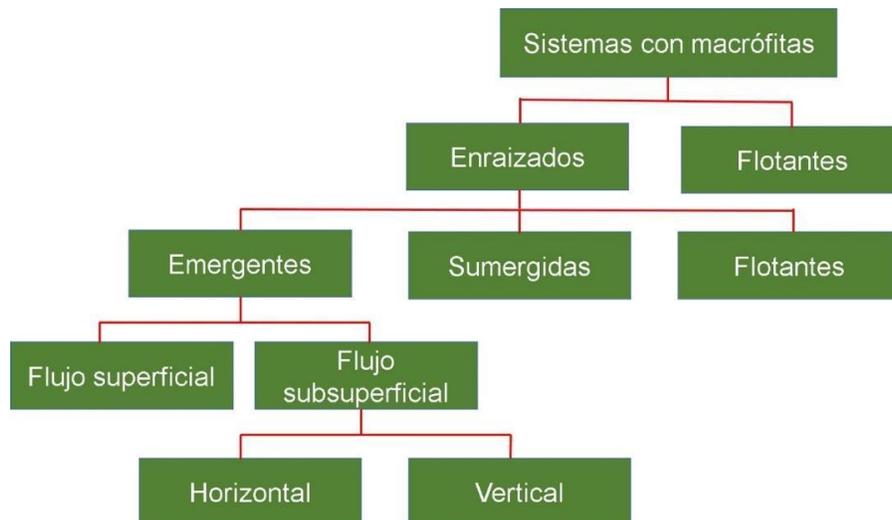


Figura 3. Clasificación de humedales artificiales. Fuente: Luna-Pabello (2014).

2.4.2 Tipos de humedales artificiales

Son muy diversas las clasificaciones que existen en la identificación de los HA, están en función de las características del material vegetal predominante. Para el tratamiento de AR existen diferentes alternativas siempre y cuando las plantas se puedan adaptar a las condiciones ambientales. Las plantas correspondientes al grupo de macrófitas emergentes han demostrado buena capacidad de adaptación y en especial son resistentes a las condiciones ambientales adversas predominantes (Arias y Brix, 2003).

2.4.2.1 Humedales de flujo libre o superficial

Los humedales artificiales de flujo superficial o de flujo libre (HFL) (Figura 4), son quizás los más antiguos, se utilizan como tratamiento secundario y para la depuración de pesticidas. Se diseñan para cargas superficiales bajas, y con una profundidad que oscila de entre 5 a 90 cm; sin embargo, es más común encontrarlos entre 30 y 40 cm, conformados por zanjas de 3 m de ancho y 100 m de largo, con una profundidad que oscila entre 0.30 y 0.40 m, donde la vegetación usada es *Scirpus lacustris*. La efectividad de remoción en los HFL es del 96% para SST; 96% para DBO; 87 para DQO, y 30% para PT (Rodríguez, 2003). Este tipo de HA se caracteriza porque el agua circula a través de los tallos de las plantas, el espejo del agua está dispuesto directamente hacia la atmósfera (Delgadillo *et al.*, 2010). La construcción de estos humedales consiste básicamente en un estanque de poca profundidad (menor a 60 cm), aislado del terreno natural por una geomembrana, el tipo de terrenos donde mejor se pueden adaptar, son aquellos que presentan una baja permeabilidad hidráulica (Volpedo *et al.*, 2005).

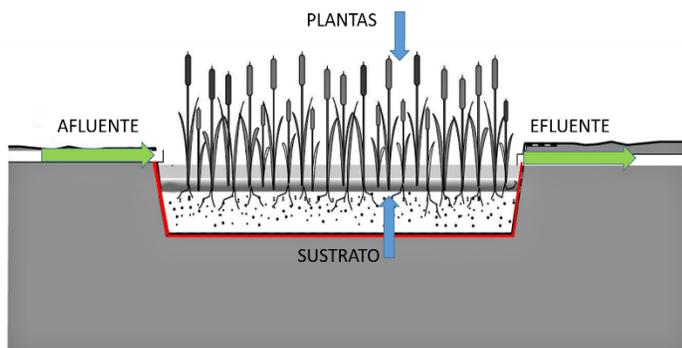


Figura 4. Humedal de flujo superficial o libre. Fuente: López-Angarita (2018).

2.4.2.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal

En este tipo de humedal el AR se alimenta a la entrada de éste y fluye a través del medio poroso debajo la superficie de la cama, en un camino más o menos horizontal, hasta llegar a la zona de salida, donde es recogida y descargada. En los lechos de filtración, la contaminación se elimina por degradación microbiana y procesos químicos y físicos en una red de zonas aerobias, anóxicas, anaeróbicas con zonas aeróbicas limitadas a las áreas adyacentes a las raíces donde el oxígeno se filtra al sustrato (Vymazal, 2010). Estos sistemas son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). En estos humedales el agua ingresa en forma permanente, es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El AR se trata a medida que circula lateralmente a través de un medio poroso. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m - 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 % (Delgadillo, 2010). Un humedal de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH) presenta una alta remoción de materia orgánica, DBO₅, DQO y sólidos suspendidos totales (SST). Sin embargo, presentan una menor eliminación de nutrientes. Por tanto, las plantas *T. latifolia* y *P. australis* son especies vegetales que se adaptan mejor a las AR de curtidurías en términos de supervivencia y propagación. Los HFSSH (Figura 5), son una alternativa viable para reducir el contenido de materia orgánica de las AR, pues toleran las fluctuaciones de flujo o intermitencias (Calheiros *et al.*, 2007). Asimismo, funcionan como protección contra la salinización secundaria del suelo.

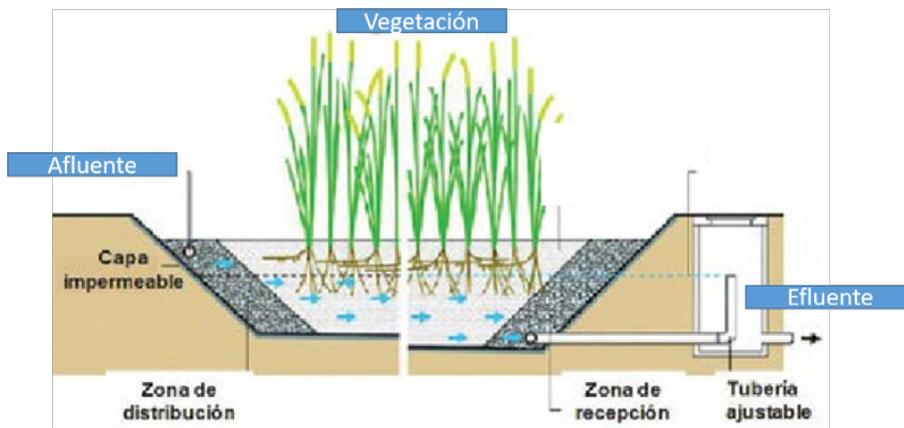


Figura 5. Humedal de flujo subsuperficial horizontal. Fuente: Tejada (2015).

2.4.2.3 Humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical

Este tipo de humedales son conocidos también como filtros intermitentes, la circulación de las AR de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías (Delgadillo, 2010). A diferencia del HFSSH, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo (CONAGUA, 2018) La principal ventaja de este tipo de sistemas radica en restaurar las condiciones aerobias durante periodos secos (Rodríguez, 2003). La eficiencia del proceso de depuración depende en gran medida de la aireación del sustrato; además, este tipo de sistemas son susceptibles a la obstrucción, por lo cual es recomendable limitar la alimentación de carga orgánica a 25 g DQO/m² por día, además de utilizar el sistema en forma rotatoria. De este modo, se logra la oxigenación del lecho, y se permite que el sistema tenga un tiempo de descanso, en el cual se le permite al lecho secarse (Ramírez Carrillo *et al.*, 2009). Los humedales de flujo subsuperficial vertical (HFSSV) se usan con mucha frecuencia para tratar ARM, especialmente cuando los límites de descarga se establecen para el nitrógeno amoniacal. Sin embargo, en la literatura se han publicado informes sobre el uso de este tipo de humedales para diversos tipos de AR que incluyen los efluentes de refinería (Aslam *et al.*, 2007).

2.4.3 Componentes de los humedales artificiales

Los componentes de los HA son las plantas, el sustrato y la población microbiana. Las plantas pueden ser de diferentes especies y hábitos de enraizamiento y entre sus principales funciones se encuentra la absorción de nutrientes, la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas (Brix *et al.*, 2001). El sustrato es el soporte para las plantas y un medio de fijación para los microorganismos en el sistema y funciona como conductor hidráulico (Faulkner y Richardson, 1989).

2.4.4 Mecanismo de reducción de contaminantes

Los HA se han estudiado como una nueva alternativa de tratamiento para las aguas contaminadas con fármacos (Ávila *et al.*, 2010). La remoción de contaminantes dentro de estos sistemas se da por medio de interacciones complejas de carácter fisicoquímico y microbiológico que ocurren al hacer pasar lentamente el AR a través

de un lecho de sustrato (arena, grava, arcilla), con raíces y rizomas de vegetación emergente (Matamoros *et al.*, 2008). Autores como Arias y Brix (2003), indican que los procesos que intervienen en la remoción de contaminantes mediante los humedales artificiales se clasifican en:

- **Físicos** (filtración, sedimentación y fisisorción)
- **Químicos** (precipitación, quimisorción, hidrólisis, oxidación y reducción)
- **Biológicos** (interacción de especies vegetales, microorganismos adheridos a las raíces de las plantas).

Las especies vegetales, los microorganismos y el medio filtrante, son aspectos que tienen una influencia directa sobre estos procesos fisicoquímicos y biológicos (Conagua, 2007a).

2.4.5 Interacción Sustrato-Planta- Microorganismo

2.4.5.1 Sustrato – Agua

La cantidad de agua retenida depende del tamaño y la disposición de los poros del terreno. En suelos gruesos y desagregados, el agua tiende a drenarse hacia abajo por la acción de la gravedad, dejando un remanente. Los compuestos por partículas finas suelen tener una porosidad total superior, por lo tanto, retienen cantidades de agua mayores que los suelos de textura gruesa. El sustrato proporciona anclaje mecánico a las plantas y es el medio en el que se almacena el agua y el oxígeno que absorben las raíces; la fracción coloidal interviene en los fenómenos de intercambio de cationes y constituye un depósito de nutrientes. Además, el sustrato contiene poblaciones microbianas (Reyes Rodríguez, 2008).

2.4.5.1.1 Contenido de agua en el sustrato

Reyes Rodríguez (2008), indica que el volumen de los poros del sustrato se llama porosidad total y se expresa como un porcentaje del volumen total del sustrato, y por lo tanto no tiene dimensiones. Los poros del sustrato están ocupados por agua; y cuando los poros están ocupados por agua se dice que el sustrato está saturado. El contenido de agua de un sustrato se puede expresar de varias maneras:

$$\emptyset g \text{ (Humedad gravimétrica en\%)} = \text{Mag/Ms} * 100$$

$$\emptyset v \text{ (Humedad volumétrica en\%)} = \text{Vag/Vt} * 100$$

Donde:

Mag = masa de agua

Ms = masa del sustrato seco

Vag = volumen de agua

Vt = volumen total o aparente del sustrato.

2.4.5.2 Sustrato – Planta

Gómez (2008), afirma que la absorción de elementos está determinada no sólo por la disponibilidad de los nutrientes retenidos por el sustrato, sino también por la proximidad de la superficie radicular. Los nutrientes son suministrados a la superficie radicales en tres formas:

- **Interacción Radicular**
- **Flujo De Masas**
- **Difusión**

2.4.5.3 Agua- Planta

El agua se mueve a lo largo de la planta y queda retenida por un sistema de polos. Después de que se ha drenado el exceso de agua sólo están disponibles para la planta dos tercios del agua. El agua es el principal componente de las plantas y en algunos de cuyos órganos está presente el 90% del peso. Actúa como disolvente y medio de transporte de gases, minerales y otras sustancias esenciales para el desarrollo normal de la vida vegetal (Gómez, 2008).

2.4.5.3.1 Mecanismo de movimiento del agua en la planta

En su recorrido a través de la planta, el agua se dirige desde el sustrato hasta la atmósfera. La última fase de este movimiento se produce en los estomas de las hojas, donde el agua líquida pasa al estado gaseoso saliendo a la atmósfera exterior. En los estomas por tanto se produce una especie de bombeo que eleva el agua desde el suelo hasta las raíces, xilema y hojas (Reyes-Rodríguez, 2008).

2.4.5.4 Microorganismos

Las bacterias constituyen alrededor del 95% de la biomasa microbiana presente en este tipo de sistema, inicialmente se observa un crecimiento libre y posteriormente el proceso de floculación (Evans y Furlong, 2003). Estos microorganismos desempeñan un papel importante en los procesos biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Llagas y Chafloque, 2006). La mayoría de los productos naturales y gran número de compuestos sintéticos son degradados por microorganismos. Independientemente de su peso molecular o complejidad estructural, se han convertido en un factor clave en la biorremediación (Bitton, 2005). La degradación biológica de los desechos acuosos, es actualmente el medio más económico y eficiente para eliminar los contaminantes (Jou y Huang, 2003). Las bacterias tienden a unirse formando flóculos, es decir, agregados que contienen partículas orgánicas e inorgánicas, así como un consorcio microbiano (bacterias formadoras de flóculo y bacterias filamentosas) unido mediante una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (Faner, 2017). En HA, los microorganismos son la parte fundamental para su funcionamiento, ya que de ellos depende la eficiencia en la remoción de los contaminantes: contribuyen a la degradación de la materia orgánica y a la transformación de compuestos nitrogenados y de fósforo contenidos en las AR, a compuestos más simples (Romero-Aguilar, 2009).

2.4.6 Dinámica de diseño en los humedales artificiales

Los HA son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje. Dos procesos críticos dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales: la dinámica microbiana y la hidrodinámica. Los procesos microbianos son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las aguas residuales en los humedales (Chafloque, 2006).

2.4.6.1 Criterios del diseño

Para el diseño de los HA es más frecuente el uso de modelos no mecánicos (aquellos que no consideran el análisis de incertidumbre estadística). Los más utilizados son los de la Environmental Protection Agency (EPA, 1998) y el modelo k-C* (Kadlec y Knight, 1996). La mayor variabilidad en los diseños se da por el uso de las constantes cinéticas, las cuales deberían ser obtenidas para cada zona geográfica en particular, ya que las reportadas en bibliografía generalmente fueron obtenidas bajo condiciones particulares de clima y condiciones hidráulicas particulares, por lo que es necesario tener sus reservas en el uso de estos valores (CONAGUA, 2015).

2.4.6.1.1 Aspectos geotécnico

Tanaka *et al.* (2011), afirma que, al elegir el sitio donde se construirá el HA se deben considerar varios puntos: ubicación cercana a la fuente de AR, área suficiente, ligera inclinación para facilitar el flujo hidráulico entre unidades de la planta y que no esté localizado en áreas inundables. Hasta el momento, no se han realizado investigaciones para determinar la inclinación óptima necesaria para la construcción de un HA. Autores como Chalk y Wheale (1989), recomiendan una pendiente de 0.5 a uno por ciento para un drenaje adecuado en los humedales artificiales. Por su parte Kadlec y Wallace (2009), señalan que los sitios más factibles para trabajar en términos de establecer un perfil hidráulico que fluye por gravedad son áreas con uno a tres por ciento de pendiente.

2.4.6.1.2 Topografía

Es necesario realizar estudios de topografía para representar el área del terreno. Mediante el estudio topográfico se determinan las curvas de nivel del terreno, las cuales son necesarias para ubicar y distribuir las unidades de tratamiento. Además, el estudio topográfico determina los perfiles longitudinales y transversales, a partir de los cuales se calculan los volúmenes de movimiento de tierra tanto del terreno como de los terraplenes que se construirán. La equidistancia entre las curvas de nivel dependerá del grado de inclinación del terreno, el cual si es plano requerirá

una equidistancia de 10 a 20 cm, sin embargo; cuando el terreno es muy inclinado podrían determinarse equidistancias entre 25 y 50 centímetros (CONAGUA, 2015).

2.4.6.1.3 Caracterización geológica

En esta se valora la actitud del terreno existente para ser excavado con facilidad, sus características de compactación, la estabilidad de las excavaciones para evaluar los ángulos máximos de los taludes a ejecutar, y su potencial de reutilización dentro de las obras. También debe estudiarse la presencia del nivel freático, con objeto de poder prever su agotamiento durante la ejecución de las obras y diseñar los drenajes adecuados (García *et al.*, 2004).

2.4.6.1.4 Mecánica de suelos

CONAGUA (2015), indica que el estudio de mecánica de suelos tiene como objetivo conocer las características del terreno donde se construirán los humedales, debiendo comprender desde una clasificación de los suelos, hasta las pruebas de laboratorio que definen parámetros de comportamiento y diseño. Los estudios de mecánica de suelos del predio propuesto deberán incluir los siguientes puntos:

- Localización de sondeos del predio propuesto
- Perfiles estratigráficos de los sondeos
- Pruebas en muestras alteradas de suelos
- Pruebas en muestras inalteradas de suelos

Flores (1996), refiere que en México no existe un reglamento que especifique los estudios de mecánica de suelos a realizar en el caso de las lagunas de estabilización, y de los humedales artificiales, sino que se han utilizado los conceptos empleados en la construcción de terraplenes para caminos, represas, pequeños diques de tierra y canales.

2.4.6.1.5 Materiales

Las aguas residuales, regularmente contienen cantidades importantes de arena, cenizas y grava, los cuales deben removerse a fin de evitar daños en tuberías y bombas. Las rejillas y desarenadores forman parte del pretratamiento, el cual evitará

que los humedales se saturen y las tuberías y canales se obstruyan o desgasten (García y Corzo, 2008).

2.4.6.1.6 Canales y tuberías

Toda la tubería instalada debe ser sometida a pruebas de flujo adecuadas antes de rellenar el humedal con el medio filtrante. Se debe determinar el tamaño, material, diámetro, pendiente de la tubería (CONAGUA, 2015).

2.4.6.1.7 Derivación de caudal

Al igual que todos los sistemas de tratamiento de AR, los HA deben incluir un sistema con estructuras hidráulicas con el fin de proteger los procesos de tratamiento, tal como un bypass (estructura utilizada para derivación de caudal); para que ingrese a la planta de tratamiento únicamente el caudal para el que fue diseñado. La pendiente debe determinarse para un rango de velocidad entre 0.3 m/s para el gasto mínimo de 1 L/s a 3.0 m/segundo (CONAGUA, 2015).

2.4.6.1.8 Bordos

Para el dimensionamiento de los bordos se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos: los bordos deben ser lo suficientemente altos como para contener el volumen esperado, al menos unos 15 cm de borde libre para la acumulación de agua (Hoffmann y Platzer, 2011). Así mismo, la acumulación de basura y sedimentos que se generan con el tiempo (EPA, 1995). Para sistemas a gran escala, la parte alta del bordo debería tener un ancho suficiente para colocar un camión o cualquier equipo necesario para el mantenimiento, usualmente tres metros de ancho. Los bordos de algunos humedales se construyen con concreto, otros utilizan una geomembrana anclada y otros con arcilla (Píriz, 2004).

2.4.6.1.9 Tipos de vegetación

La diversidad de vegetación es un factor importante respecto a la capacidad de eliminación de contaminantes en los humedales. La rizósfera de las macrófitas estimula el crecimiento de las comunidades microbianas, por lo tanto, cualquier modificación de la diversidad de la planta y su hábitat lleva a cambios en la

comunidad microbiana, y consecuentemente a la eficiencia de remoción de contaminantes (Corzo, Sanabria, & García, 2016). CIEMA (2005), indica el sistema de macrófitas presentes en cada tipo de HA:

◆ **Humedal artificial de flujo superficial**

Sistemas macrófitas flotantes: formados por grandes lagunas con bajos niveles de agua y provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie. Sus raíces sumergidas tienen un buen desarrollo (Figura 6).

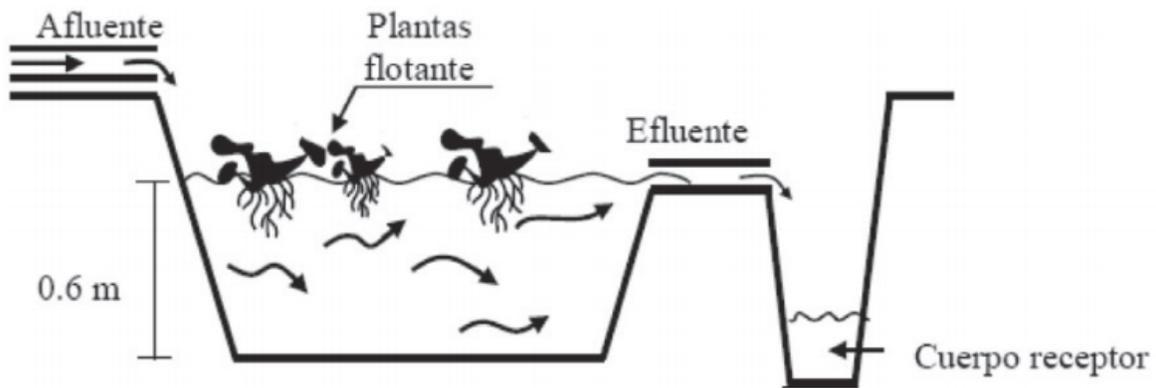


Figura 6. Humedal de flujo superficial con macrófitas flotantes. Fuente: CIEMA (2005).

Sistemas con macrófitas sumergidas: compuestos por lagunas con bajo nivel de agua y plantadas con plantas macrófitas cuyo tejido fotosintético está totalmente sumergido. Estas plantas solo crecen bien en aguas que contienen oxígeno disuelto, por lo cual no se utilizan para aguas residuales con alto contenido de materia orgánica biodegradable ya que la descomposición microbiana provoca condiciones anóxicas (Figura 7).

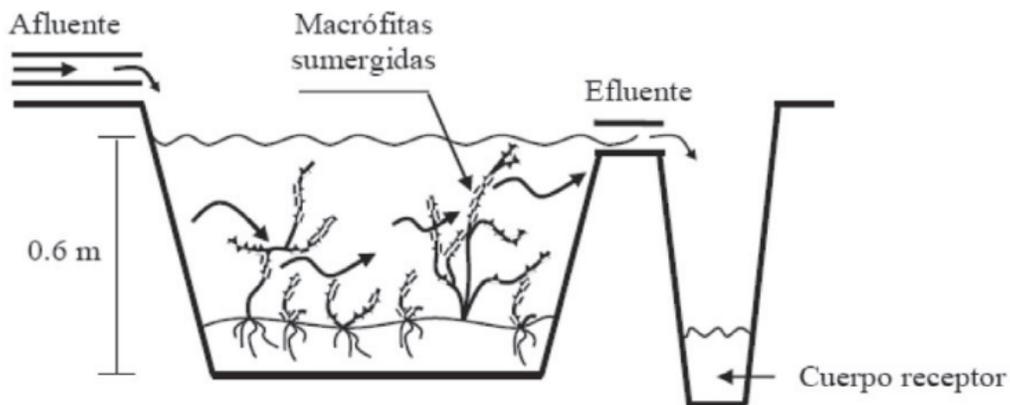


Figura 7. Humedal de flujo superficial con macrófitas sumergidas. Fuente: CIEMA (2005).

◆ **Humedal artificial de flujo subsuperficial**

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes que consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo, piedra volcánica, grava); en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas lo atraviesan de forma horizontal o vertical, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular.

2.4.6.1.10 Selección de vegetación

La selección de las especies vegetales y de los medios granulares para un humedal es en función de las especies de plantas nativas en humedales de la zona donde se implementa el HA. Deben caracterizarse por su potencial para ser utilizados en el proceso de fitorremediación en los humedales artificiales (Cerón y Vivas, 1995). Es imprescindible seleccionar los medios granulares teniendo en cuenta el costo de cada material, la disponibilidad en las zonas cercanas a los ensayos y las características del terreno donde se encuentran las plantas seleccionadas, con el fin de que estos no varíen mucho y sea más fácil la adaptación de las plantas (Arias-Martinez, 2010).

2.4.6.1.11 Adaptación de vegetación

La eficiencia de la remoción y el éxito de implementar un humedal están determinados en gran medida por el tipo de macrófitas utilizadas. Así, las macrófitas de mayor uso en humedales artificiales de flujo subsuperficial han sido los géneros *Phragmites*, *Scirpus* y *Typha*. Los cuales son de amplia distribución biogeográfica o cosmopolita (Saeed y Sun, 2012). La adaptación de la vegetación a los HA es una actividad que se desarrolla por medio de un ensayo pre experimental con el cual se identificaron y seleccionaron tres especies de plantas y un medio de cultivo para el diseño y la construcción de la unidad piloto (Bedoya-Pérez *et al.*, 2014).

2.4.7 Cálculo y dimensionamiento

Los HFS, así como los de HFSS deben diseñarse adecuadamente para que sean capaces de remover la materia orgánica. Por lo que se deben considerar las

variables hidráulicas y cinéticas que permitan conjuntar tanto las variables hidrodinámicas como el comportamiento de los microorganismos, las plantas y la adherencia al medio de soporte (Wilson *et al.*, 2020).

2.4.7.1 Humedales de flujo superficial

Este tipo de humedales consisten en zanjas con áreas expuestas donde el agua residual se encuentra en contacto con la atmósfera; el agua fluye libremente y la vegetación puede ser flotante o emergente (Kadleck y Wallace, 2009). La ecuación de Manning es la adecuada para la explicación física de estos sistemas, ya que define el flujo en canales abiertos que es lo generalmente aceptado para el diseño de este tipo de humedales, y con base en ella se determinan los parámetros específicos de diseño (Quintero, 2014).

(Ecuación 1)

$$v = \frac{1}{n} * y^{2/3} * s^{1/2}$$

Dónde:

v = velocidad de flujo, en m/s

n = coeficiente de fricción de Manning, en s / m^{1/3}

y = profundidad de agua en el humedal, en (m)

s = gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, en (m/m)

2.4.7.2 Humedales de flujo subsuperficial

La mayoría de metodologías para el diseño de HFSS se basan en la suposición que el movimiento del agua a través del humedal es de flujo pistón, y que se da una cinética de reacción de primer orden, debida a la degradación biológica que realizan los microorganismos (Frazer – Williams, 2010). El proceso para diseñar un HAFSS implica varios pasos. El tamaño final del humedal puede necesitar varias interacciones en este proceso. Dentro de los requisitos específicos para el diseño la EPA (1993), indica los siguientes:

- Determinar las condiciones existentes (DBO, SST del efluente, Temperatura de las AR, flujo diario de la fuente).
- Determinar la calidad deseada del efluente (DBO Y SST).
- Seleccionar la profundidad del lecho (se sugiere un máximo de dos pies o 0.62 m de la estructura del filtro).
- Tipo de estructura y tamaño (se recomienda roca dura e insoluble de dos a cinco pulgadas de diámetro).
- Seleccionar el valor para los espacios vacíos dentro de la estructura de roca.
- La proporción inicial de largo - ancho del humedal debe ser seleccionada con base en el área calculada para alcanzar la reducción deseada de DBO. La proporción final global de largo-ancho dependerá de los factores hidráulicos.
- Calcular el área de la superficie necesaria para el desarrollo del humedal.
- Determinar el área de la superficie y las dimensiones correspondientes basadas en la proporción inicial de largo-ancho. Se sugiere la ecuación de Darcy, para determinar la capacidad del diseño para conducir el flujo a través del humedal artificial.

(Ecuación 2)

$$Q = KsAS$$

Dónde:

Q = Flujo capaz de pasar a través del humedal artificial (Pie³ /día) (M³/día).

Ks = conductividad hidráulica de una unidad de área de la estructura de 2 a 5 pulgadas.

Ks = 328.100 Pie³ /Pie² /día (100,000 m³/m²/día) (se sugiere usar 0.3 Ks como factor de seguridad).

S = Gradiente hidráulico de la superficie del agua en el sistema (d/L) (se sugiere usar 0.1 del máximo de s como un factor de seguridad).

A = Área transversal del humedal artificial (pie²) (m²).

Si Q en la ecuación 2 no es igual o excede el flujo del diseño, la proporción largo-ancho debe ajustarse para disminuir la longitud mientras aumenta el ancho para mantener el área de superficie determinada por la ecuación 1. Se repite este proceso hasta que el flujo del diseño sea menor o igual al flujo determinado por la

ecuación 2. Siempre que se ajuste la proporción de largo ancho se debe revisar la capacidad hidráulica del flujo de la ecuación de Darcy (ecuación 2). El modelo de diseño para humedales de flujo superficial de la EPA (1993), se resume en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. Ecuaciones para el diseño hidráulico de HA, metodología EPA (1993).

PARÁMETRO	METODOLOGÍA EPA, (2003)
Parámetros de diseño (C_e)	DBO, SST
Calidad del efluente (C_o)	DBO, SST
Profundidad del lecho	0.62 m
Diámetro del sustrato	50.8 – 127 mm
Porosidad con plantas (n)	0.35
Porosidad sin plantas (n)	0.45
Proporción inicial largo –ancho	2:1
Determinación de la pendiente	$S = (K_s)(0.1)$
Límite de SST (mg/l)	
Límite de DBO (mg/l)	
Determinación del área superficial	$A_s = LW = Q [\ln (C_o/C_e)] + K_t h n$
Determinación del ancho y la longitud	$LW = Q [\ln (C_o / C_e)] + K_t h n$
Determinación del flujo hidráulico	$Q = K_s A_s$ (Ecuación de Darcy)
Determinación del tiempo de retención	$TR = V n / \text{flujo}$
Cálculo de la población equivalente	N/A
Cálculo del área máxima de concentración	N/A

Fuente: EPA (1993).

2.5 Ventajas y desventajas de los humedales artificiales

Entre las ventajas de este sistema se encuentra el bajo costo de instalación y mantenimiento, comparado con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales, así como la generación de un paisaje agradable (SEMARNAT, 2016). Los HA correctamente diseñados y construidos, pueden depurar las aguas

municipales, industriales y las de lluvia, y son especialmente eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como son sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, hidrocarburos y metales. Son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan adecuadamente (Miranda, 2000). Los menores costos de operación corresponden a los sistemas extensivos de tratamiento por sus mínimos requerimientos de energía eléctrica para su funcionamiento y por su operación simple (Mena *et al.*, 2008). En contraste, la principal desventaja de estos sistemas es que demandan áreas mucho mayores que los sistemas intensivos (como lodos activados) (García *et al.*, 2004). Además de la necesidad de dos o tres estaciones de crecimiento de las plantas para llegar a su máximo rendimiento. Aunado a esto, se deben considerar pérdidas de caudal por evaporación con aumento de la salinidad del efluente y el desconocimiento de procesos biológicos e hidrológicos que intervienen en el mismo (Reyes-Rodriguez, 2008).

2.6 Normatividad

El Foro Económico Mundial, en su Informe de Riesgos Mundiales 2019 (World Economic Forum, 2019), reconoce al agua como uno de los retos con mayor presión social, política y económica en el ámbito global y deja claro que casi toda actividad humana está entrelazada con el agua.

2.6.1 Normatividad Nacional

Los humedales asociados a las aguas nacionales, referidas en el artículo 27 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos son propiedad de la nación y por lo tanto la regulación de las actividades y obras que se desarrollen en ellos es de jurisdicción federal (SEMARNAT, 2016). Los humedales asociados a otras aguas no incluidas en la enumeración de las aguas nacionales, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaron en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten los Estados. Sin embargo, debido a la

multiplicidad de actores que inciden en los procesos naturales y sociales asociados a los humedales, esta política propone un marco de referencia general que articule y oriente los diferentes esfuerzos que se realizan en los ámbitos gubernamental, social, privado y de cooperación internacional hacia el cumplimiento de una meta común. Con ello, se busca reducir la duplicación de esfuerzos y crear sinergias para lograr la conservación, garantizar la preservación de los servicios ambientales que proporcionan y lograr un uso más sustentable de los humedales mexicanos (SEMARNAT, 2016).

En este sentido, la elaboración de la Política Nacional de Humedales consideró los lineamientos para elaborar y aplicar políticas nacionales de humedales (Resolución VII.6 de la 7a. Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes realizada en 1999) establecidos en el Manual para la Elaboración y Aplicación de Políticas Nacionales de Humedales (Ramsar, 2010). Asimismo, se consideraron las Directrices para la Aplicación del Concepto de Uso Racional de la Convención Ramsar, en las cuales se describen como componentes la necesidad de mejorar las disposiciones institucionales y de organización; incrementar la comprensión y la conciencia de los valores de los humedales; levantar inventarios y monitorear su situación; determinar las prioridades de los programas; y elaborar planes de acción para sitios determinados (SEMARNAT, 2016).

2.6.2 Normatividad Estatal

Las autoridades estatales en el reglamento de la Ley número 21 de aguas del estado de Veracruz-Llave, con su última reforma publicada en la Gaceta Oficial: 4 de junio de 2010 indica las siguientes disposiciones:

Artículo 13. Las concesiones o contratos en sus diferentes modalidades, tendrán como finalidad la construcción, operación y mantenimiento de los servicios públicos de agua potable, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales en los términos establecidos por el artículo 46 de la Ley. Pertenecen a las actividades señaladas en el párrafo anterior todas las relativas a la investigación y desarrollo de

nuevas tecnologías, lo mismo que los procedimientos para mejorar la eficiencia y eficacia en la prestación de los servicios públicos señalados en el párrafo anterior.

Artículo 14. El Consejo, en la formulación de los dictámenes y opiniones que le requiera el Congreso del Estado, podrá solicitar a la autoridad concedente, los siguientes elementos técnicos y documentales:

- I. Ubicación de la zona en que se prestarán los servicios, indicando características físicas, población y niveles de ingreso.
- II. Catastro y diagnóstico de servicios existentes con los cuales se relacionarán.
- III. Proyecciones de población y demanda para el periodo de concesión.
- IV. Alternativas técnicas y cronograma de obras. Se presentarán todos los antecedentes que sustenten las alternativas, tales como topografía, hidrología, hidrogeología, análisis e informes de laboratorios asociados con la calidad del agua.
- V. Análisis técnico económico para la selección de la alternativa que incluirá estimaciones de beneficios, costos, valor actualizado neto y rentabilidad asociadas para cada alternativa.
- VI. Anteproyecto de las obras definidas para los primeros cinco años, incluyendo las fuentes de financiamiento comprometidas.
- VII. Tarifas propuestas y aportes de terceros, calculados según la metodología que haya emitido el Consejo.
- VIII. Indicación de los bienes y derechos que se utilizarán en la prestación de los servicios incluidos en la concesión, tales como, derechos de dominio, de servidumbre, de usufructo, de arrendamiento y otros.
- IX. Todos aquellos elementos necesarios, legalmente accesibles, para la emisión de los dictámenes y opiniones correspondientes.

3. JUSTIFICACIÓN

La concentración de contaminantes en aguas es un tema que preocupa a las entidades gubernamentales porque deterioran la calidad hídrica de las fuentes receptoras. En varios países, se han iniciado investigaciones y desarrollo de metodologías para tratar este tipo de aguas (Peña Guzmán, 2012). Existen diversos tratamientos para AR que han comprobado su eficacia, entre los más utilizados se encuentran los HA; Los HA, como sistemas de tratamiento extensivos, han tenido gran éxito debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento; sin embargo, en países tropicales como México, la documentación acerca del funcionamiento de estos sistemas no ha sido suficiente como para generar información y criterios de diseño específicos (Conagua, 2016). Entre las ventajas de este sistema se encuentra el bajo costo de instalación y mantenimiento, comparado con sistemas físicos, químicos y biológicos convencionales, así como la generación de un paisaje agradable. Los HA correctamente diseñados y construidos, pueden depurar las ARM, industriales y las de lluvia, y son especialmente eficaces en la eliminación de contaminantes del agua, como son SST, NT, PT, hidrocarburos y metales. Son una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan adecuadamente (Miranda, 2000). En México, los HA se han implementado en los estados de Colima, Chihuahua, Distrito Federal, Estado de México, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Tamaulipas y Tlaxcala (CNA, 2007). Los HA tienen una eficiencia de remoción alta de los diferentes parámetros, inclusive es superior a otros sistemas de tratamiento de aguas residuales. El objetivo de la presente investigación es diseñar un humedal artificial como tratamiento biológico para las aguas residuales municipales tomando en consideración todos los factores que influyen para lograr un diseño eficiente y se logre la disminución de los contaminantes presentes en las aguas residuales municipales.

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el diseño más eficiente de un humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales municipales?

5. HIPÓTESIS

Un sistema híbrido de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con lodos activados, es una propuesta de diseño eficiente para la eliminación de materia orgánica, nutrientes y otros contaminantes presentes en las aguas residuales municipales.

6. OBJETIVOS

6.1 General

Diseñar un humedal artificial para el tratamiento eficiente de las aguas residuales municipales.

6.1.1 Específicos

1. Establecer teóricamente las características fisicoquímicas de las aguas residuales municipales.
2. Elaborar una propuesta de diseño del humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales municipales.
3. Determinar la eficiencia teórica del humedal artificial en el tratamiento de aguas residuales municipales.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales municipales.

Se realizó una revisión bibliográfica de las diferentes clasificaciones de AR. Para esta actividad se utilizaron buscadores como Elsevier, SciELO, Dialnet, World Wide Science, Academia.edu, Springer Link, Ciencia.Science.gov, Eric, entre otros. Los datos obtenidos de estas clasificaciones, se organizaron en grupos con base en el tipo de agua residual, tomando en consideración su origen (Metcalf y Eddy, 1995). Para determinar los valores de referencia de los parámetros físico-químicos de las AR, se analizaron los reportes de diversos autores, posteriormente esta información se integró en un cuadro de texto (Cuadro 3); tomando como referencia la NORMA

OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales.

Cuadro 3. Comparativo de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización de ARM.

Año	Autor	Parámetros Fisicoquímicos									
		T (°C)	pH (UpM)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	G y A (mg/L)	OD (mg/L)

Con base al conjunto de datos obtenidos, se determinarán los rangos mínimos, máximos y promedio de cada contaminante en ARM (Metcalf y Eddy, 1995). Los valores promedios resultantes se tomaron como partida para elaborar la propuesta de diseño del HA.

7.2 Propuesta de diseño de depuración

7.2.1 Perfil del proyecto

Aguilera Palencia (2003) determinaron criterios preliminares de diseño antes de la implementación física del tratamiento. Dichos criterios se basan en las características de las AR a tratar.

7.2.2 Zona de implementación

Para implementar los HA es necesario considerar y/o determinar las características del sitio de implementación, tipo de suelo, altitud, temperaturas predominantes así como el número de población existente en el área (Delgadillo *et al.*, 2010).

7.2.2.1 Factores ambientales

Para el diseño del HA se considera la temperatura ambiental máxima y mínima y promedio del agua, estacionalidad y velocidad, y las temporadas climáticas (estiaje y lluvias) de la zona (EPA, 2000b). Para identificar estas variables en el área de implementación del HA se realizan consultas en las páginas oficiales de

instituciones que emiten información fidedigna actualizada y/o en tiempo real, tales como; INEGI, CONABIO, CONAGUA, entre otras.

7.2.2.2 Consideraciones de topografía y geotecnia

En el sitio seleccionado para la implementación del HA, se debe realizar una campaña topográfica para representar fielmente el área del terreno misma que debe contener datos específicos requeridos para la correcta implementación del HA (Aguilera Palencia, 2003).

7.2.3 Cálculo y dimensionamiento Pretratamiento

7.2.3.1 Cribado

Es la operación que se utilizará para separar el material grueso del agua, mediante el paso de ella por una criba o rejilla. El sistema de rejilla es efectivo para remover el material contaminante grueso como basuras, las rejillas son de limpieza manual o mecánica. Para el dimensionamiento se utilizarán los cálculos recomendados por CONAGUA (2018) y Ponce Bonilla (2002).

7.2.3.2 Sedimentador Primario

7.2.3.2.1 Área superficial del sedimentador primario

Se determina a partir del caudal del afluente de entrada como caudal máximo de operación y la carga superficial. El objetivo es eliminar, mediante sedimentación, las arenas, gravas, barro, y partículas finas de origen inorgánico; de manera que la arena retenida no arrastre materias contaminadas presentes en el agua captada (Ponce Bonilla, 2002).

Para el dimensionamiento se utilizarán los cálculos recomendados por CONAGUA (2018).

(Ecuación 3)

$$\text{Área superficial} = \frac{Q_0}{CS}$$

Dónde:

Q_o = Caudal del afluente residual a tratar.

CS = Carga superficial

7.2.3.2 Volumen del sedimentador primario

El sedimentador es de cuerpo cilíndrico y fondo cónico, y su relación-volumen respecto al aireador establece su capacidad máxima. El área superficial se toma como referencia para fijar el diámetro mínimo de este equipo CONAGUA (2018).

7.2.3.3 Trampa de grasas y aceites

El módulo de recuperación de grasas y aceites estará dividido en tres secciones. Para su elaboración se utilizará tubería PVC y concreto. El afluente fluirá del cribado y el efluente hacia el sedimentador primario. Área total y la capacidad estará delimitada por el caudal proveniente del cribado. La finalidad es retirar la mayoría de las grasas y aceites transportados en las AR tratadas (Ponce Bonilla, 2002).

7.2.3.4 Módulos de contacto y estabilización

Este proceso incorpora un módulo anaerobio (ausencia de oxígeno) seguido por un módulo aerobio (presencia de oxígeno) y sedimentación secundaria. El efluente del sedimentador primario se mezcla con el lodo que contiene microorganismos activos anaerobios, posteriormente, la mezcla para a un módulo donde es aireada por un período de tiempo que fluctúa entre 0,5 y 24 horas donde se producen reacciones bioquímicas complejas que coadyuvan en la eliminación de NT (Perez Sandoval, 2019). Los sólidos sedimentados son recirculados al reactor de aireación para mantener una concentración apropiada de microorganismos (Metcalf y Eddy, 1995). En la figura 8 se observa la representación esquemática del proceso de lodos activados. El modelo es conservador y se aplica para cualquier modalidad bajo las cuales puede operar este sistema (Perez Sandoval, 2019).

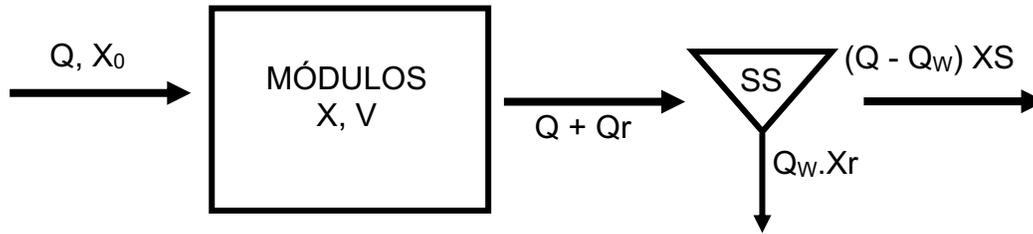


Figura 8. Esquema general del proceso de lodos. Fuente: Perez Sandoval (2019).

Donde:

Q: Caudal del sistema. (l/d)

Qr: Caudal de reciclaje en el sistema. (l/d)

Qw: Caudal de purga del sistema. (l/d)

Xo: Concentración de DBO en el afluente. (mg/l)

Xs: Concentración de DBO en el efluente. (mg/l)

Xr: Concentración de DBO en el reciclaje. (mg/l)

X: Concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla. (mg/l)

V: Volumen del tanque de aireación. (m³)

SS: Sedimentador secundario del sistema.

Para calcular los parámetros estimados de operación en ambos módulos (contacto y estabilización) se utilizaron las siguientes fórmulas representadas en el cuadro 4:

Cuadro 4. Cálculos para la operación de los módulos de concentración y estabilización.

Parámetro	Fórmula
Volumen (m ³)	$V = L \cdot A \cdot P$
Tiempo de Retención Hidráulica (hr)	$TRH = \frac{V}{Q}$
Caudal (m ³ /h)	$Q = \frac{V \cdot CVa}{DQO}$
Carga Volumétrica Aplicada (g DBO/m ³ ·d)	$CVa = \frac{SQ}{Vr}$

Fuente: Metcalf y Eddy (1995).

7.2.3.5 Sedimentador secundario

7.2.3.5.1 Área superficial del sedimentador secundario

Se determina a partir del caudal de entrada proveniente de los módulos biológicos, mismo que se toma como caudal máximo de operación (Ponce Bonilla, 2002). La ecuación utilizada es la siguiente:

(Ecuación 4)

$$\text{Área superficial} = \frac{Q_o}{\text{Carga superficial}}$$

Dónde:

Q_o = Caudal del afluyente residual

CS = Carga superficial

7.2.3.5.2 Volumen del sedimentador secundario

El sedimentador es de cuerpo cilíndrico y fondo cónico. El área superficial se toma como referencia para fijar el diámetro mínimo de este equipo CONAGUA (2018).

7.2.3.6 Materiales de construcción

Para la evaluación y selección de los materiales utilizados en la construcción del pretratamiento, se realiza un análisis cualitativo de las características que deben cumplir los materiales propuestos para ser aceptados como parte del tren de tratamiento (EPA, 1993a).

7.2.4 Humedal Artificial de Flujo subsuperficial Horizontal

7.2.4.1 Cálculos y dimensionamiento

7.2.4.1.1 Caudal

Para la determinación del área superficial se consideró el uso de los siguientes valores de carga hidráulica: 0.032m²/L/día (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio), y 0.021m²/L/día (para zonas donde haya restricciones de espacio). Este método incluye la cinética del proceso (EPA, 1993a):

(Ecuación 3)

$$A_s = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C_e)}{(K_T \cdot h \cdot n)}$$

Dónde:

As: Área (m²)

Q: Caudal

LnCo: Carga orgánica (DBO) afluente

LnCe: Carga orgánica (DBO) efluente

K_T: Coeficiente de permeabilidad

h: altura

n: Porosidad del medio

7.2.4.1.2 Tiempo

Para determinar el área de la sección transversal se empleó la Ley de Darcy, cuyo uso es recomendado:

(Ecuación 4)

$$A_t = \frac{Q}{K_s * S}$$

Dónde:

At: Área de sección transversal.

Q: Caudal.

K_s: Coeficiente de permeabilidad.

S: Pendiente del Lecho.

La conductividad utilizada en el diseño no debe ser mayor que la del medio de soporte. Se debe reducir dicha conductividad en un orden de magnitud, de acuerdo con los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales (EPA, 1993a).

7.2.4.1.3 Pendiente de fondo

- » Se recomienda no usar la pendiente de fondo para ganar cabeza pues se corre el riesgo de dejar la entrada seca cuando haya condiciones de bajo caudal = 1%.

- » Usar piedra entre 50 y 100 mm para una longitud de 0.6 m alrededor del influente distribuidor, y las tuberías colectoras del efluente para reducir el taponamiento.
- » Usar solo sustrato lavado para eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato que, posiblemente, causen flujo superficial.
- » Construir la berma al menos 150 mm por encima del sustrato y al menos 150 mm por encima de la superficie de la tierra.

Pendiente exterior 3H:1V

Pendiente interior 2H:1V

Ancho mínimo de la berma = 0.60 m.

Carga orgánica máxima = 4m²/kg. de DBO5/día.

Tiempo de llenado del lecho con agua = 1 - 2 días.

La profundidad media del lecho sea 0.6 m y que la profundidad en la entrada no debe ser menor de 0.3 m. Con profundidades mayores a 0.6 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse. Es recomendado que los lechos se construyan con al menos 0.5 m de cabeza sobre la superficie del lecho. Para lechos pequeños, esta puede reducirse (EPA, 1993a).

7.2.4.1.4 Tiempos de retención hidráulica

Para HFSS, se deben medir las pérdidas entre la entrada y la salida del sistema, ya que el humedal debe manejar flujos sin crear problemas de estancamiento e inundación (Silva y Zamora, 2005). Se requiere una primera suposición del área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Por lo general, se asume que el caudal de entrada y salida son iguales (Yañez-Arancibia, 1999). Se implementará el flujo a pistón uniforme a través de la sección del humedal, esto con la finalidad de minimizar flujos preferenciales. Los cortos circuitos serán disminuidos con el uso de celdas o mamparas. Un diseño válido requiere considerar aspectos hidráulicos y térmicos, así como la cinética de remoción (Yañez-Arancibia, 1999). Ferrer (2013), indica que la eficiencia hidráulica para sistemas de

tratamientos: lagunas, RAFA y humedales o cualquier otro; se calcula a través de la siguiente ecuación:

(Ecuación 5)

$$EH = \frac{TRH}{TRT}$$

Donde:

TRH = tiempo de retención hidráulico experimental en cada fase de la investigación (min).

TRT = tiempo de retención teórico de los humedales (min).

7.2.4.2 Selección de materiales de construcción

Para la evaluación y selección de los materiales utilizados en la construcción de HA, se realiza un análisis cualitativo de las características que deben cumplir los materiales propuestos para ser aceptados como parte de un HA (EPA, 1993a).

7.2.4.2.1 Medio de soporte (granular)

Las gravas de aproximadamente 2 cm de diámetro son materiales óptimos como medio granular, las celdas del HA se llenarán con este tipo de material a una altura de 0.5 m para asegurar el correcto soporte de las macrófitas (Silván, 2016).

7.2.4.3 Selección de macrófitas

Con base en la literatura consultada se seleccionaron cuatro especies diferentes de macrófitas que presentan gran capacidad de adaptación, absorción y depuración de AR para ser sembradas en el HA; el número de individuos por nivel y la ubicación dependerá de sus requerimientos y tamaño.

La siembra se debe realizar cuando ya se ha introducido el agua a los lechos (Jenssen *et al.*, 2005). Se recomienda realizar la siembra en los inicios de la temporada de lluvias con el objeto de reducir el riesgo de que el humedal no tenga la suficiente agua, para que cubra la zona de las raíces de las macrófitas.

La elección de la vegetación depende del tipo de residuos, radiación solar, temperatura, estética, vida silvestre deseada, especies nativas y profundidad del

humedal. Se deben usar dos celdas en serie. Las celdas deben impermeabilizarse para evitar la infiltración. Es esencial que las raíces tengan siempre acceso a agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), se recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2 a 5 cm por debajo de la superficie del lecho (CONAGUA, 2018).

7.2.5 Diseño en planta del tren de tratamiento

El diseño en planta se realiza con base en las dimensiones obtenidas de los cálculos correspondientes, para graficar y escalar el HAFSS se utiliza el software AutoCAD 2018.

7.3 Evaluación de la eficiencia de remoción del tren de tratamiento

Se realiza una evaluación teórica de los valores de remoción obtenidos por diversos autores en HA. En esta evaluación se consideran los parámetros de DQO, DBO, FT, NT, ST y SST.

Utilizando la ecuación 7 (Metcalf y Eddy, 1995), se calcularon las eficiencias de remoción alcanzada por los HAFSS en cada parámetro:

(Ecuación 7)

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{CE - CS}{CE} * 100$$

Dónde:

CE = Concentración de entrada

CS = concentración de salida

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Caracterización fisicoquímica

La revisión bibliográfica realizada permitió identificar tres clasificaciones para las AR (Cuadro 5). El orden de clasificación presentado está indicado en el manual de la Directiva Europea 91/271 CEE.

Cuadro 5. Tipos de clasificación para aguas residuales.

AGUAS RESIDUALES		
Domésticas	Industriales	Urbanas
Viviendas y actividades humanas.	Comercio o industria.	Mezcla de domésticas e industriales.

Moyano (2018), afirma que las ARM tienen origen en viviendas y están producidas en esencia por el metabolismo humano y por las actividades domésticas. Crespi (2010), señala que las AR de tipo industrial son todas aquellas que han sido vertidas desde un lugar con finalidad comercial o industrial. Crombet (2016), afirma que las ARM contienen aguas residuales domésticas e industriales, también se consideran en este tipo aquellas que derivan de las aguas de corriente pluvial. El AR seleccionada para esta investigación fue de tipo urbana. Estas AR son las más predominantes en el área geográfica propuesta que corresponde a la zona conurbada Veracruz, Boca del Río (Jaraba, 2018). Los contaminantes más sobresalientes (cuadro 6), se describen con base en las características descritas por diversos autores para este tipo de AR.

Cuadro 6. Caracterización de las ARM reportadas por diversos autores.

Número	Año	Autor	T (°C)	pH (UpM)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	ST (mg/L)	SST (mg/L)	NT (mg/L)	PT (mg/L)	GyA (mg/L)	OD (mg/L)
1	2003	Rivas-Lucero <i>et al.</i>		7	168	463	1375		33		34	
2	2009	Ramírez Carrillo <i>et al.</i>	20	9.3		122			6.11	2		2
3	2010	Li <i>et al.</i>		6.4-8.1	50-300	100-633		7-505	3.6-19.4	0.11 - >48		
4	2010	Crespi, R.; O. Plevich.		7.8	112.5	265	842	252	108	8		
5	2012	Rodríguez-González.		7		141		29	42			
6	2012	Sánchez Ortiz		7.2-0.2	424-168	235-90	409	169				
7	2012	Cortés Lorenzo		6.9-7.8	57	135		139				
8	2013	Martínez <i>et al.</i>		6.9	400	1000		350	85	15		
9	2014	Bedoya-Pérez <i>et al.</i>	24	8.7	255	326	538	67	202	13		37
10	2014	Suárez <i>et al.</i>	23	7.3	267	268		856		5		6
11	2015	Rodríguez Miranda <i>et al.</i>			110-550	140-550		15-150	1.7-100	6-10		
12	2015	Figuroa <i>et al.</i>	20			80		112				75
13	2015	Ramos Chalen			200		800	240	35	10		
14	2016	Charris <i>et al.</i>	28	8		246						1
15	2016	Crombet, <i>et al.</i>	28	7	112	306	1197			18	67	
16	2016	Silván <i>et al.</i>	25	7.2					202	15		
17	2016	Marín	27	7.8	408	859		309	80	15		
18	2016	SEMARNAT		6-7	400	1000	1200	350	85	15	150	
19	2017	Ramon Vilanova			25	125		35	15	1		
20	2018	Javier R. Moyano			208	320	447	300			87	
21	2019	Ocaña <i>et al.</i>	26	8.3	289			250	146	5		

Las ARM se caracterizan por contar con una composición diversa. Son ricas en componentes causantes de daños a la salud y medio ambiente. Estas AR son vertidas a cuerpos de agua receptores sin ningún tipo de tratamiento previo a la descarga. Es por esto, que este tipo de aguas se consideran como una problemática constante (Rodríguez Rodríguez, *et al.*, 2015). En el cuadro 5 se concentran resultados de diversos autores y se describen los contaminantes más relevantes encontrados en las ARM así como sus valores en mg/L. Autores como Martínez *et al.*, (2013) y Marín-Muñiz (2017), indican que la DQO en ARM pueden registrar valores de entre 800 y 1000 mg/L. Estos valores son muy altos en comparación de los reportados por Figueroa *et al.*, (2015) quien indica que para este tipo de AR encontró valores de hasta 80 mg/L. Esta diferencia entre autores, puede atribuirse al tipo de fuente donde se captó la muestra, también debe considerarse la hora de la toma de muestra ya que esto, puede influir significativamente en los resultados. De igual forma en los resultados de DBO, se puede apreciar una variabilidad considerable comparando los resultados reportados por Ramon Vilanova (2017), quien obtiene valores de 25 mg/L, mientras Miranda *et al.*, (2015) sugiere rangos de hasta 550 mg/L. En PT los valores reportados por autores como Silván *et al.*, (2016), Martínez *et al.*, (2013) y Bedoya-Pérez *et al.*, (2014) coinciden en un rango más específico dentro de los 13 a 15 mg/L. Para NT se reportan valores de alrededor de 100 mg/L, a excepción de Silván *et al.*, (2016) y Bedoya-Pérez *et al.*, (2014) quienes nuevamente en su estudio afirman que este parámetro puede llegar a presentar valores de hasta 202 mg/L. Los ST por su parte, presentan valores de entre 400 y 1200 mg/L. En cuanto a la temperatura y pH específicamente para este tipo de AR oscila entre 6-8 y 20-28 respectivamente. Como se mencionó anteriormente, las AR cuentan con una composición variada, esto limita la obtención de características específicas en ellas (Moyano, 2018). Cabe señalar que los valores antes mencionados pueden ser resultado de diversos factores como: el uso del agua, ya que los contaminantes dependen directamente de la finalidad a la que fue destinada. La temperatura juega un papel importante ya que estas, coadyuva a la descomposición de los residuos orgánicos presentes en las AR. Desechos

industriales, estos agregan directamente sustancias que pueden elevar de manera acelerada los niveles de contaminantes en las AR Martínez *et al.*, (2013).

En general, las ARM, se caracterizan por su alta concentración de partículas en suspensión, materia orgánica, nutrientes, compuestos antropogénicos y patógenos que pueden causar eutrofización, daños a la vida acuática y a la calidad de las fuentes hídricas (Salazar, 2018). Del cuadro 6 se analizan y extraen los valores promedio de cada parámetro, mismo que se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7. Valores promedio de parámetros obtenidos en ARM.

Parámetro	Unidad	Promedio
Temperatura	°C	24
pH	UpM	7
DQO	mg/L	393
DBO ₅	mg/L	260
Sólidos Totales (ST)	mg/L	851
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	257
Nitrógeno Total (NT)	mg/L	82
Fósforo Total (PT)	mg/L	12
Grasas y Aceites (GyA)	mg/L	84

Los resultados obtenidos (cuadro 7) se compararon con la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SEMARNAT-2021. Derivado de esto, podemos afirmar que todos los parámetros analizados se encuentran por encima de los límites máximos permisibles para descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Específicamente en esta revisión, encontramos que los valores NT, SST y GyA, están más elevados en comparación a los demás parámetros analizados (Metcalf y Eddy, 2003). Con base en estos resultados y analizando los diversos sistemas convencionales y tecnologías existentes para el tratamiento de ARM, se determina proponer un tren de tratamiento que consiste en un HFSSH y un pretratamiento físico y biológico, que en conjunto coadyuven a disminuir la concentración de contaminantes eficientemente en este tipo de AR.

8.2 Propuesta de diseño de depuración

8.2.1 Perfil del proyecto

Con base en la literatura se propone un diseño de HFSSH. Arias (2003), indica que estos HFSSH presentan eficiencias de remoción de materia orgánica de hasta un 90%. Los resultados obtenidos de la caracterización teórica de las AR a tratar, indican que estos efluentes residuales contienen altas concentraciones en NT, PT y GyA. Caicedo (2007) y Chafloque (2006), afirman que en cuanto a NT, PT y GyA, los HFSSH por sí solos carecen de buenas eficiencias de remoción.

Por lo anterior, para realizar una propuesta de diseño óptima, que cumpla eficientemente con los requerimientos de remoción de contaminantes, se plantea colocar un pretratamiento adicional al HFSSH, que coadyuve en la eliminación de dichos contaminantes. Considerando la implementación de un pretratamiento previo al HFSSH, se esperan eficiencias de remoción óptimas para el tratamiento de ARM.

8.2.2 Zona de implementación

La zona considerada como lugar de implementación es el municipio de Veracruz, Ver. En el cuadro 8 se concentran las características significativas del estado obtenidas de la base de datos de INEGI:

Cuadro 8. Características generales del municipio de Veracruz, Ver; México.

Tipo De Suelo	Feozem y Luvisol
Altitud	1 M.S.N.M
Clima	Tropical cálido
Temperatura media anual	30.3 °C
Población 2020	607, 209

Fuente: INEGI (2020).

El clima del estado de Veracruz es tropical cálido húmedo, con una temperatura media anual de 25.3 °C y precipitación media anual de 1500 mm. Durante los meses de septiembre a febrero se presenta el fenómeno conocido como "nortes", que son rachas de viento proveniente del norte que alcanzan velocidades de 50 a 130

kilómetros por hora, aproximadamente. En algunas ocasiones la temperatura desciende varios grados, aunque su duración es breve (INEGI, 2020).

8.2.2.1 Consideraciones de topografía y geotecnia del área

- Para desarrollar esta propuesta de diseño del HFSSH, se deben determinar las curvas de nivel del terreno, esto permite ubicar y distribuir las unidades de tratamiento y reducir el movimiento de la tierra (García *et al.*, 2004).
- Determinar los perfiles longitudinales y transversales, a partir de los cuales se calcula el volúmen de movimiento de tierra, tanto del terreno, como de los terraplenes que se construirán (Delgadillo *et al.*, 2010).
- Para la caracterización geotécnica del área se valora la actitud del terreno existente para ser excavado con facilidad; características de compactación, la estabilidad de las excavaciones para evaluar los ángulos máximos de los taludes a ejecutar, y su potencial de reutilización dentro de las obras (Delgadillo *et al.*, 2010). Es importante estudiar la presencia del nivel freático, para prever su agotamiento durante la ejecución de las obras y diseñar los drenajes adecuados (García *et al.*, 2004).
- Se debe realizar un estudio de mecánica de suelos para conocer las características del terreno donde se construirán los HA, comprendiendo desde una clasificación de los suelos, hasta las pruebas de laboratorio que definen parámetros de comportamiento y diseño (Flores, 1996).

8.2.3 Factores ambientales considerados

Varón *et al.* (2003), resalta la factibilidad de los HFSSH en climas tropicales debido a la temperatura de las aguas residuales, lo que a su vez acelera los procesos de bioconversión, reduciendo significativamente los costos de la implementación del sistema. Es por esto que para diseñar la propuesta del HFSSH se considera un rango de temperatura de entre 20 y 39 °C. Por tanto, el clima que presenta el municipio de Veracruz es factible para el tipo de humedal a implementar.

8.2.4 Cálculos y dimensionamiento del pretratamiento

8.2.4.1 Cribado

El pretratamiento considerado para esta propuesta consiste en un proceso físico denominado cribado (Figura 9); mediante el cual, se clasifican y separan por tamaños los sólidos existentes en el afluente residual. Charris *et al.* (2016), afirma que las ARM no se consideran portadoras de grandes cantidades de macro sólidos, sin embargo; autores como Rojas (2002), reporta que este tipo de proceso físico preventivo es muy efectivo ya que el AR atraviesa la zona de criba seleccionando y retirando los sólidos existentes.

Cuadro 9. Características estructurales del sistema de cribado.

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)
Cribado	1.00	1.80	0.60	0.32
Rejilla	0.60	-	0.80	-

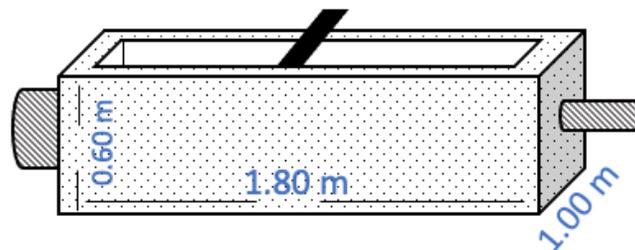


Figura 9. Esquema del cribado como pretratamiento.

Las dimensiones del sistema de cribado serán de 0.60 m de alto, 1 m de ancho y 1.80 m de largo; con un volumen útil de 0.32 m³. Cuenta con una rejilla de acero con medidas de 0.60 m de ancho, 0.080 m de alto, tamaño de poro de 2x2 y una inclinación es de 60° (Cuadro 9). Hernández García (2017), indica que en medidas más pequeñas de poro podría existir saturación de sólidos provocando taponamiento total o parcial de la rejilla, por lo tanto, sugiere una medida mínima de 2 x 2. Por su parte Henze M. (1997), recomienda limpiezas periódicas en rejillas para evitar saturación de sólidos en el sistema.

8.2.4.2 Sedimentador primario

El sedimentador primario (Figura 10), tiene la finalidad de eliminar sólidos suspendidos mediante la sedimentación. Cuenta con dimensiones de 1 m de ancho, 2 m de largo y 1.50 m de alto, cuenta con un volumen útil de 3 m³ (Cuadro 10).

Cuadro 10. Características estructurales del sedimentador primario.

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)
Sedimentador primario	1.00	2	1.50	3

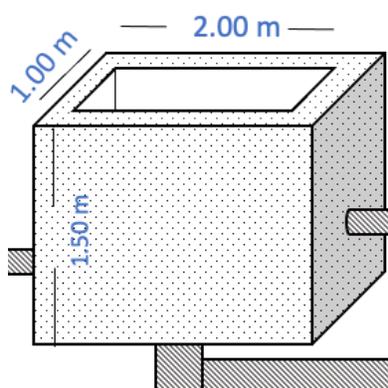


Figura 10. Esquema de sedimentador primario.

El sedimentador primario se diseñó de manera convencional considerando lo indicado por Rojas (2002), quien afirma que, colocar un sedimentador primario, reduce la turbulencia y la velocidad de corriente que ingresa al siguiente módulo. Tilley (2014), coincide que el sedimentador permite que las partículas sedimentables se hundan y se acumulen en la parte baja en forma de lodos, mientras los componentes que pesan menos que el agua, flotan a la superficie. Aunado a esto, el tanque almacenará temporalmente y suministrará el AR.

8.2.4.3 Trampa de grasas y aceites

La estructura para trampa de GyA cuenta con 1 m de ancho, 1.50 m de largo, 0.60 m de alto y un volumen útil de 0.9 m³ (Cuadro 11). La trampa de GyA (Figura 11) separa las grasas y sólidos suspendidos del agua (Olivo, 2010). El agua entra en la primera cámara, el material flotante como las grasas, ascienden al segundo compartimento de la cámara ya que es menos densas que el agua, mientras el material más denso se asienta como lodo en el fondo de la trampa (Tacias, 2016).

En el tercer compartimento de la cámara, el agua clarificada sin grasa sale como efluente (Hernández García, 2017). Las GyA quedarán retenidas en la cámara intermedia (Perez Sandoval, 2019). El agua clarificada seguirá su curso libre, evitando taponamientos de tuberías por acumulación de grasas.

Cuadro 11. Características estructurales de la trampa de grasas y aceites.

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)
Trampa de GyA	1.00	1.50	0.60	0.9

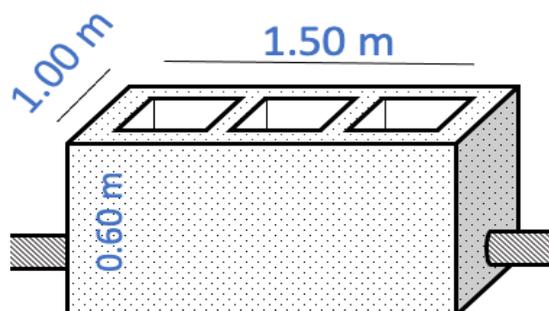


Figura 11. Esquema de la trampa de grasas y aceites.

8.2.4.4 Módulos de contacto y estabilización, reducción de nitrógeno.

Para el dimensionamiento del sistema aerobio y anaerobio, donde se llevará a cabo la desnitrificación y nitrificación; se consideraron las aportaciones de Claros Bedoya (2012) y Palma-Acosta (2005) quienes indican que los módulos deben dividirse en dos secciones, módulo de contacto (MC) y módulo de estabilización (ME) (Figura 12). En esta investigación se calcularon los parámetros de operación para la proyección de los MC y ME, tal como se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Cálculos para el dimensionamiento de los módulos de contacto y estabilización.

Parámetro	Módulo de contacto (MC)	Módulo de estabilización (ME)
Vol. (m ³)	1.80	9.60
TRH (hr)	0.75	4.00
Q (m ³ /h)	2.40	2.40
CVa (g DBO/m ³ ·d)	346.67	65.00
pH (UpM)	6-9	6-9
T (°C)	22-40	22-40

Para el cálculo de los volúmenes útiles, se tomaron como base las dimensiones de cada módulo, obteniendo 1.80 y 9.60 m³ para el MC y ME, respectivamente (Cuadro 13). Arias-Hoyos (2017), indica que la cuantificación del volumen útil es fundamental para el funcionamiento del sistema. El valor del caudal es de 2.4 m³/h. Con los cálculos antes mencionados se obtiene un TRH de 8 h y la CVa que entrará al sistema es de aproximadamente 346.67 g DBO/m³·d.

Cuadro 13. Dimensiones y capacidad del MC y ME para la reducción de nitrógeno.

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)
MC	1.00	2.00	0.90	1.80
ME	4.00	2.00	1.20	9.60

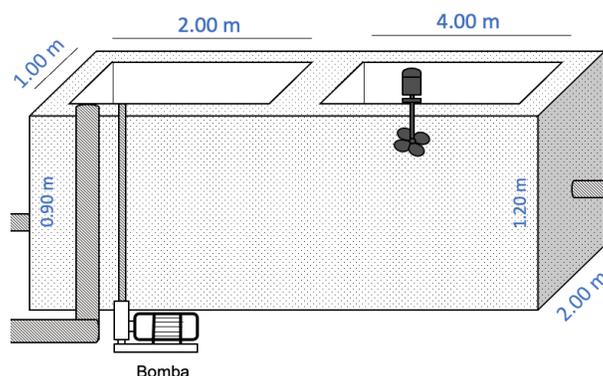


Figura 12. Esquema del MC y ME.

destinadas a procesar nutrientes (Perez-Sandoval, 2019). En el MC predominan procesos de nitrificación y asimilación de nitrógeno natural (N-NAT) (Claros Bedoya, 2012). Esto genera una disminución de la carga de N-NAT de ingreso al HA. Es importante verificar detalladamente el proceso ya que algunos autores como Ferrer Polo (2018), reportaron concentraciones de N-NAT mayores de salida con respecto a la entrada del sistema. Esto fue atribuido a procesos de amonificación que pueden estar relacionados con espacios muertos del MC por posibles problemas de aireación, que generan acumulación y descomposición de materia orgánica. Monroy (2010), indica que es imprescindible el monitoreo constante de la CVa en el sistema, ya que al incrementar este parámetro de operación puede presentarse una disminución de OD favoreciendo la aparición de microorganismos filamentosos en el sistema y ocasionando que el lodo adquiera una coloración oscura y olores

desagradables. En el ME se espera el incremento de N-NAT y reducción en la carga nitritos (N-NO₂) y nitratos (N-NO₃) (Van Haandel y Marais, 1999). Dado que es una zona donde la disponibilidad de OD es nula y existe presencia de Nitrógeno orgánico (N-Norg) en la biomasa, es posible que se presenten procesos de amonificación que pueden incrementar la carga de N-NAT (Ferrer Polo, 2018). No obstante, la presencia de N-NO₂ también puede generar procesos de oxidación anaerobia del amonio (N-NH₄) mismos que se reflejan en algunos valores de reducción del N-NAT (Ferraz de Abreu, 2001). Si adicionalmente se presenta una reducción en la carga N-NO₃ se puede evidenciar una posible desnitrificación, corroborando así las afirmaciones de Van Haandel y Marais (1999) y Ferraz de Abreu (2001). Amorocho González (2014), evaluó el desempeño de dos sistemas de lodos activados para la reducción de materia orgánica carbonácea y Nitrógeno Amoniacal Total (NAT) en AR. Donde implementó un sistema de lodos activados similar a esta propuesta, con TRH de 7 h, CVa de 260 gDBO/m³·d, alcanzando eficiencias de 38% de remoción de NAT. De igual forma Kutty (2011), diseñó una propuesta sistema de lodos activados similar para la degradación de NAT en ARM, con TRH de 8 h, y obtuvo 60% de eficiencia de remoción en este parámetro. Los lodos activados han demostrado ser una opción viable como tratamiento para reducción de nitrógeno.

8.2.4.5 Sedimentador secundario

El sedimentador secundario (Figura 13) sedimenta los sólidos suspendidos que puedan ingresar después de los módulos MC y ME. Este sedimentador estará conectado directamente al HFSSH y dosifica el volumen de agua que recibirá el sistema. El sedimentador secundario tiene dimensiones de 1 m de ancho, 2 m de largo y 1.50 m de alto, con un volumen útil de 3 m³ (Cuadro 14).

Cuadro 14. Características estructurales del sedimentador secundario.

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m³)
Sedimentador primario	1.00	2	1.50	3

El sedimentador secundario cuenta con una purga de lodos integrada que permite la cosecha de lodos Rojas (2002). Estos lodos son ricos en microorganismos, los

cuales, posterior a un tratamiento con cal, pueden ser utilizados para compostaje o cultivo (Woo Reza, 2003).

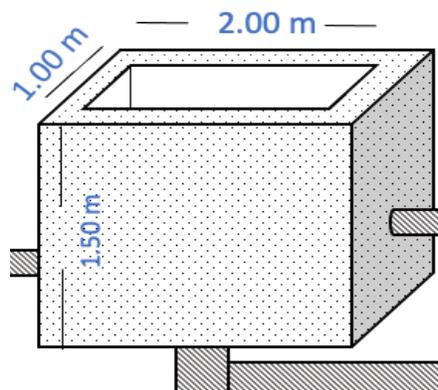


Figura 13. Esquema de sedimentador secundario.

8.2.4.6 Materiales de construcción

Neira Peña (2016) propone tuberías de PVC como más adecuadas para las PTAR. Para este proyecto se propone colocación de tubería de PVC-U (Policloruro de vinilo) en la alimentación, distribución y salida del sistema, de acuerdo con las consideraciones especificadas por CONAGUA (2017) (Cuadro 15). En el cuadro 16 se especifican los materiales de construcción comúnmente implementados en PTAR (Gómez Lee, 2018).

Cuadro 15. Especificaciones de las tuberías de PVC.

Elemento	Material	Características
Tubería	Policloruro de vinilo (PVC) Polietileno	Resistente y durable para su utilización como tuberías subterráneas y superficiales. Alta durabilidad y bajo peso que lo hacen adecuado para tuberías
Cementantes	Cemento portland tipo II	Resistente a los sulfatos

Fuente: CONAGUA (2017).

Cuadro 16. Especificación de materiales para construcción obra civil pretratamiento.

Bordos	Canales	Módulos	Sedimentadores
Concreto hidráulico	Tabique rojo	Tabique rojo	Tabique rojo
Arcillas	Varilla corrugada	Varilla corrugada	Varilla corrugada
Pasto	Alambrón	Alambrón	Alambrón
	Concreto	Concreto	Concreto

Fuente: CONAGUA (2017).

8.2.5 Humedal Artificial de Flujo subsuperficial Horizontal

8.2.5.1 Cálculos y dimensionamiento

El diseño, está propuesto para el tratamiento de ARM producidas por una población de 600 personas, aproximadamente. Se establece TRH de 168 h, CVa de 37.14 g DBO/m³·d y caudal de hasta 2.4 m³/h, (Calheiros *et al.*, 2007) (Cuadro 17).

Cuadro 17. Parámetros de diseño del HFSSH.

Parámetro	HFSSH
Población (persona)	600.00
Vol. (m ³)	403.20
TRH (hr)	168
Q (m ³ /h)	2.4
CVa (g DBO/m ³ ·d)	37.14
pH (UpM)	6-9
T (°C)	22-40

Las dimensiones del HFSSH (Figura 14) son; 21 m de ancho, 32 m de largo y 0.60 m de altura, con un volumen útil de 403.20 m³ (cuadro 18).

Cuadro 18. Dimensionamiento del diseño del HFSSH propuesto.

Elemento	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)
HFSSH	21.00	32.00	0.60	403.20

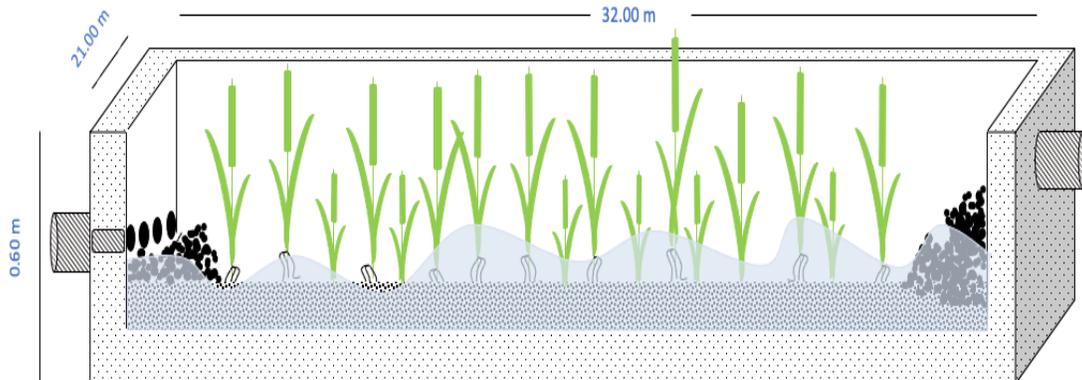


Figura 14. Propuesta de dimensionamiento del HFSSH.

López-Angarita (2018), indica que el éxito de los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal o vertical se debe a la rápida circulación de agua por medio granular; que en conjunto con las raíces de las plantas adheridas, juegan un papel importante en la remoción de contaminantes.

8.2.5.2 Materiales de construcción

De acuerdo con Neira Peña (2016), se propone la colocación de tubería de PVC-U (Policloruro de vinilo) para la alimentación, distribución y salida del sistema, las especificaciones consideradas se enlistan a continuación (Cuadro 19).

Cuadro 19. Especificación de tuberías PVC para alimentación HFSSH.

Elemento	Material	Características
Tubería	Policloruro de vinilo (PVC)	Resistente y durable para su utilización como tuberías subterráneas y superficiales.
	Polietileno	Alta durabilidad y bajo peso
Cementantes	Cemento portland tipo II	Resistente a los sulfatos

Fuente: EPA (2000).

Chafloque (2006), indica que los materiales adecuados para la construcción de este tipo de HA son:

Cuadro 20. Especificación de materiales para construcción del HFSSH propuesto.

Bordos	Canales	Módulos	Sedimentadores
Concreto hidráulico	Tabique rojo	Tabique rojo	Tabique rojo
Arcillas	Varilla corrugada	Varilla corrugada	Varilla corrugada
Pasto	Concreto	Concreto	Concreto

Fuente: Chafloque (2006).

8.2.5.4 Medios de soporte

8.2.5.4.1 Materiales para el sustrato

Con base en lo descrito en el cuadro 21, se utilizará grava de 40-80 mm en la zona de entrada y zona de salida del HA;. Grava de 20 a 30 mm en la parte central del tratamiento. En los últimos 10 cm del sustrato se propone grava fina, con tamaño máximo de agregado de 20 mm; esto de acuerdo con las consideraciones de diseño de la EPA (2000).

Cuadro 21. Tipos de granulometrías recomendados para los HA.

Parámetro	Criterio/Tamaño de partícula?
Conductividad hidráulica, K	
Primer 30% de la longitud	Uso del 1% de K para cálculos de diseño
Último 70% de la longitud	Uso del 10% de K para cálculos de diseño
Medio filtrante	
Primeros 2 m	
Tratamiento	40-80 mm
Efluente, último metro	20-30 mm
Medio filtrante (gravas)	40-80 mm
plantado, los 10 cm superficiales	5-20 mm

Fuente: EPA (2000).

Los taludes y fondo del HA se revestirá con capa de 10 cm de arcilla, con la finalidad de impermeabilizar el área, así como facilitar el intercambio iónico en la eliminación de fósforo. La EPA recomienda varios tipos de sustratos (Cuadro 22), los utilizado serán: arena de cuarzo, grava fina y grava media en su respectivo tamaño.

Cuadro 22. Tipos de sustratos recomendados para los HA.

Tipo de medio	Tamaño efectivo	Porosidad	Conductividad hidráulica
	Ø mm	%	m ³ /m ² ·d
Arena de cuarzo	2	32	1000
Arena graduada	8	35	5000
Grava fina	16	38	7500
Grava media	32	40	10000
Roca de cuarzo	128	45	100000

Fuente: EPA (2000).

8.2.5.4.2 Macrófitas

Moreno-Casasola (2010), indica que las especies de plantas macrófitas acuáticas comúnmente utilizadas en HA debido a su abundancia en la región de Veracruz (Cuadro 23).

Cuadro 23. Macrófitas comúnmente utilizadas para HA en la regiones del estado de Veracruz.

Especie	Nombre común
<i>Typha domingensis</i>	Masa de agua
<i>Thalia geniculata</i>	Peguajó
<i>Cyperus giganteus</i>	Molinillo
<i>Echinochloa pyramidalis</i>	Pasto mijillo
<i>Cyperus articulatus</i>	Tule chico

Fuente: Moreno-Casasola (2010).

Después del análisis del cuadro 24 se recomienda el uso del género *Typha*. El género *Typha* es conocido de forma común como: espadaña, tule, masa de agua, cola de gato, totora y enneas. Es una especie perenne originaria de Europa, Asia y América, su altura puede alcanzar a más de tres metros de altura, posee un color moreno claro, con una o más brácteas foliáceas caducas (Pérez García, 2019).

Cuadro 24. Clasificación taxonómica de *Typha spp.*

Taxonomía	Especies
Reino: Plantae	<i>Typha angustifolia</i>
División: Magnoliophyta	<i>Typha latifolia</i>
Clase: Liliopsida	<i>Typha angustifolia</i> × <i>T. latifolia</i> (= <i>Typha glauca</i>)
Orden: Poales	<i>Typha domingensis</i>
Familia: Typhaceae <i>sensu lato</i> JUSS.	<i>Typha laxmannii</i>
Género: <i>Typha</i> LINNEO.	<i>Typha shuttleworthii</i>

Fuente: Vera *et al.* (2016).

Hidalgo, Montano & Estrada, (2005), afirman que *Typha latifolia* es una de las especies que se ha comportado de manera eficaz en el mejoramiento la calidad de los efluentes y en la remoción de nitrógeno total, amonio, fósforo y coliformes fecales. Por su parte Vera *et al.* (2016), indica que la *Typha dominguensis* fue efectiva en la remoción de nutrientes y materia orgánica en un HA, construidos en una fosa alimentada con ARM. Considerando estos antecedentes, el uso de *Thypa dominguensis* y *latifolia* se torna una alternativa económica y viable para la

fitorremediación de efluentes (Cuadro 25). *Typha latifolia* es la especie más sobresaliente, es anemófila, es decir, la polinización de sus flores se lleva a cabo por la acción del viento; ya que esta dotada de unidades reproductivas monoicas (flores hermafroditas).

Cuadro 25. Desempeño en la remoción de contaminantes de la especie *Thypha*.

Tipo de influente	Carga (g N/m ² d)	Tipo de humedal	Especie macrófita	Eliminación vía desnitrificación	T°	pH
ARM	0.14 – 0.29	HFSS	<i>Typha latifolia</i>	19-41	24-32	6-8
Lechería	2.3 – 18.5	HFSS	<i>Typha latifolia</i>	60-84	-	6.0
Efluente reconstruido pesquero	0.5	HFSS	<i>Typha latifolia</i> <i>Dominguensis</i>	47-62	>5	-

Fuente: Vera *et al.*, (2016).

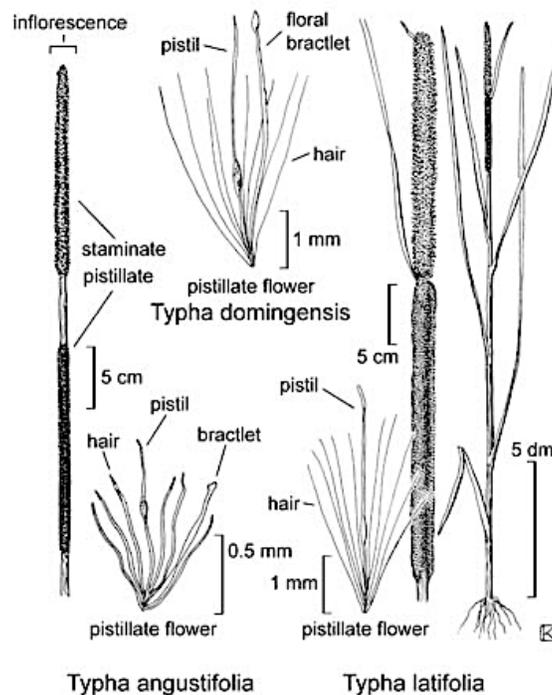


Figura 15. Esquema descriptivo de especies de *Thypha*. Fuente: UNI. CALIFORNIA 2345

La especie *Typha latifolia* (Figura 15) se caracteriza por producir hojas que igualan o exceden la altura de las espigas (Vibrans, 2009). Cuenta con una red raíces alargadas y definidas; en plantas jóvenes alcanzan a medir alrededor de 15 a 20 cm de largo, en adultas pueden alcanzan los 50 cm (Vibrans, 2009).

8.2.6 Diseño en planta del sistema de tratamiento.

8.2.6.1 Diseño en 2D

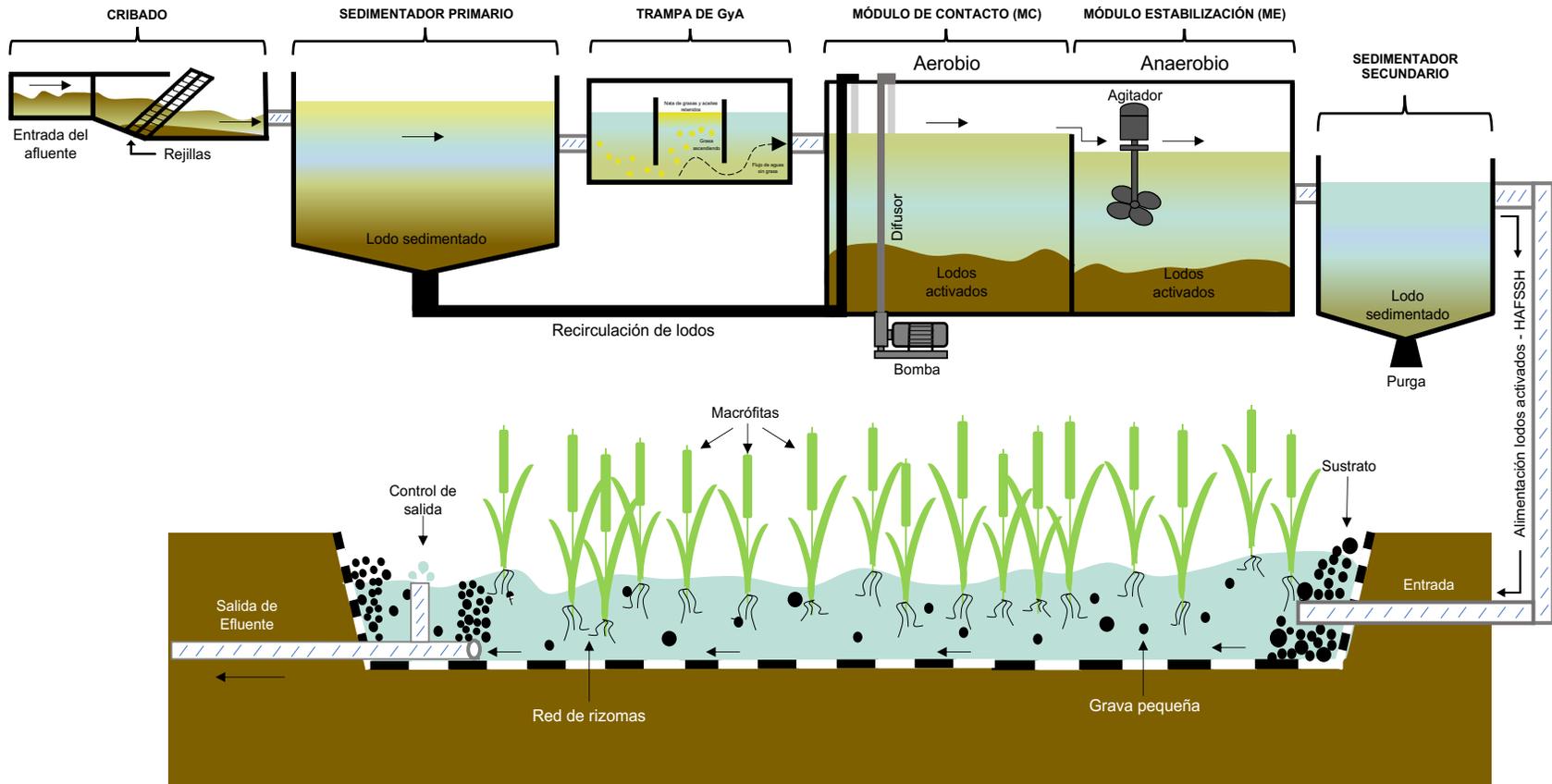


Figura 16. Esquema de diseño del HFSSH en 2D.

8.2.7 Consideraciones de diseño

El sistema propuesto en este trabajo tomó en consideración parámetros recomendados en literatura. Esta propuesta de diseño se podrá implementar en una zona específica, siempre y cuando se tomen las siguientes consideraciones:

- Las variaciones reales de temperatura en el sitio de implementación, así como las precipitaciones. La tasa de evaporación, la disponibilidad y economía de los materiales para el sustrato EPA (2000).
- El diseño presentado utiliza un tipo de planta acuática de amplia distribución, pero es importante asegurarse de que la planta esté presente en el área donde se requiera implementar el HA o verificar qué otras opciones similares puedan ser adaptadas al sistema. Recientes investigaciones están empleando plantas de ornato que han probado ser útiles en estos sistemas de tratamiento Vera *et al.*, (2010).
- Es recomendable que el sistema propuesto se ubique alejado de los centros de población. Su orientación en el área de implementación debe considerar la construcción en un sentido opuesto a la dirección del viento, esto para evitar la propagación de vectores y minimizar los olores que se pudieran generar Chafloque (2006).
- Se recomienda la construcción de modelos a escala para ajustar los parámetros de operación como CVa, TRH, Carga Orgánica Superficial, ajuste de caudales y velocidades. Esto con la finalidad de maximizar la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en el agua tratada.

8.3 Evaluación de la eficiencia del Humedal Artificial (HA)

Los resultados de las eficiencias de remoción del sistema de tratamiento para ARM se obtuvieron con cálculo teórico. En la figura 19 se representan gráficamente los porcentajes de remoción esperados en el HAFSS.

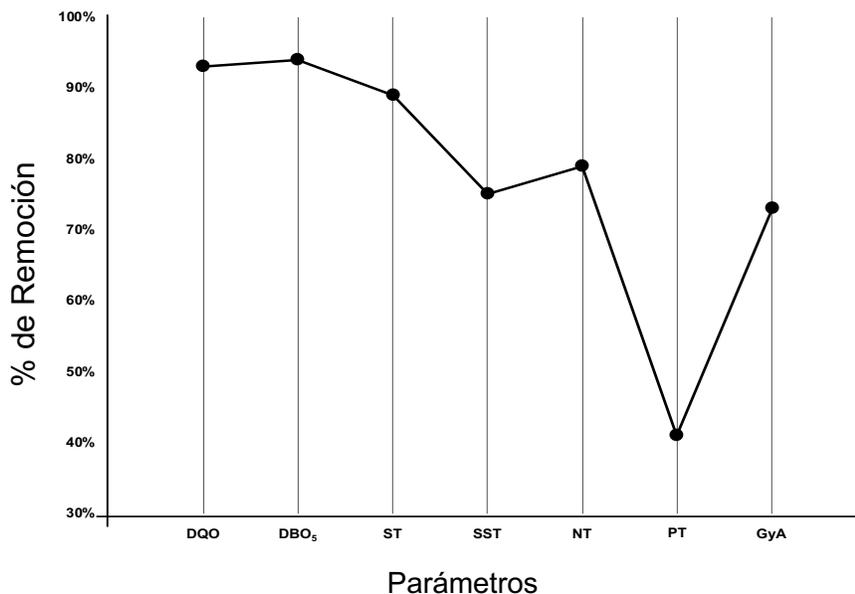


Figura 17. Valores teóricos de remoción por parámetro en el HFSSH propuesto.

En el cuadro 26 se presentan las concentraciones teóricas de salida y las respectivas eficiencias de remoción de los parámetros considerados.

Cuadro 26. Valores teóricos de remoción por parámetro del HFSSH propuesto.

Parámetro	Unidad	Valores	% de remoción
DQO	mg/L	25	93
DBO ₅	mg/L	15	94
Sólidos Totales	mg/L	87	89
Sólidos Suspendido Totales	mg/L	65	75
Nitrógeno Total	mg/L	17	79
Fósforo Total	mg/L	7	41
Grasas y Aceites	mg/L	22	73

Se estima que los porcentajes de eficiencia de remoción en el HFSSH para DQO alcancen hasta un 93%. Caicedo (2017) y Córdova Agreda (2021), obtuvieron 94 y 85% respectivamente en la eficiencia de remoción en este parámetro con un HA de características similares. Rowan (2018), afirma que los HFSS ya sean de flujo horizontal o vertical, por sí solos mantienen buenos rendimientos en las eficiencias de remoción de materia orgánica. De igual forma los resultados de Caicedo (2017) para SST indican porcentajes de remoción óptimos, registrando hasta un 93%. Para los macronutrientes como NT y PT, este tipo de humedales mantienen eficiencias de alrededor de 30% (Tsukamoto, 2002). Se tomó como base el trabajo de Sanz (2009), quien indica que, implementar un pretratamiento físico-biológico en los HFSSH, coadyuvan a ampliar los porcentajes de remoción en los parámetros antes mencionados. González (2004), menciona que estos pretratamientos en conjunto con el HFSSH optimizan el proceso de tratamiento de las aguas residuales. De igual forma Amorcho (2014), menciona que después de utilizar un proceso de lodos activados para la reducción de NH_4 obtuvo eficiencias de hasta 38%. Este valor es considerado como óptimo debido a que se disminuye drásticamente el NT y al ingresar al HFSSH se mantendrá una cantidad disponible para el metabolismo de las macrófitas (Saganome, 2016). En el caso de PT, Arteaga-Cortez (2019), recomienda que las paredes del HFSSH sean cubiertas con arcilla, con esto, se busca generar una absorción de partículas en las paredes revestidas para agilizar la asimilación de las plantas y la transformación microbiana del contaminante. Con este proceso Cano (2003) y Luna-Pabello (2014), estiman un porcentaje de remoción de hasta 41% de PT en el sistema.

9. CONCLUSIONES

1. Las AR dependen de factores que determinan su composición, caracterizándose por su alta concentración de partículas en suspensión, materia orgánica, nutrientes, compuestos antropogénicos y patógenos. Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las ARM obtenida bajo literatura, indica que todos los parámetros analizados exceden los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad vigente, manteniendo concentraciones elevadas específicamente en NT, PT y GyA.

2. Con base en los requerimientos de remoción de contaminantes para ARM se realizó la propuesta de diseño de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Adicionalmente, se propone un pretratamiento de lodos activados que en conjunto con el HFSSH coadyuve a la eliminación de los contaminantes y mantenga eficiencias de remoción óptimas para el tratamiento de ARM.

3. Esta propuesta de diseño se podrá implementar en una zona específica. Se estima que el HFSSH en conjunto con el pretratamiento alcancen porcentajes de remoción de hasta un 93% para DQO. Específicamente para NT, PT, Y GyA se espera una eliminación de hasta 79, 41 y 73% respectivamente.

Un sistema híbrido de humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con un pretratamiento de lodos activados, es una propuesta de diseño eficiente para la eliminación de materia orgánica, nutrientes y otros contaminantes presentes en las ARM.

10. LITERATURA CITADA

- Aguilera Palencia, D. F. (2003). Evaluación y diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas domésticas (Bachelor's thesis, Uniandes).
- Amorocho González, E., & Sánchez Muñoz, D. A. (2014). Sistema de lodos activados para la reducción de nitrógeno amoniacal efluente de un sistema de estabilización por contacto (Doctoral dissertation).
- Arias I. H.B.C.A, Brix, C.A. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Granadina* (13): 17-24.
- Arias-Hoyos, A., HERNÁNDEZ-MEDINA, J. L., CASTRO-VALENCIA, A. F., & SÁNCHEZ-PEÑA, N. E. (2017). Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la m. Oleífera como coagulante natural. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 15.
- Arias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., Hernández Ángel, M. L. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas.
- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. *Revista Tecnología del Agua*.
- Aslam, M.M.; Malik, M.; Baig, M.A.; Qazi, I.A.; Iqbal, J. (2007). Treatment performance of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan. *Ecol. Eng.*, 30, 34-42.
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-343.
- Ávila C., Pedescoll A., Matamoros V., Bayona J.M., García J., (2010) Capacity of horizontal subsurface flow constructed wetland system for removal of emerging pollutants: An injection experiment. *Chemosphere*, 81: 1137- 1142.

- Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Qtaishat, MR y Alkasrawi, M. (2015). Sobre la realización de un tratamiento real de aguas grises mediante un sistema de biorreactor de membrana sumergida. *Journal of Membrane Science*, 476, 40-49.
- Bedoya Pérez, J. C., Ardila Arias, A. N., Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(3), 275-283.
- Beltrán Farfán, D. F., Palomino Calli, R. P., Moreno Terrazas, E. G., Peralta, C. G., & Montesinos-Tubée, D. B. (2015). Calidad de agua de la bahía interior de Puno, lago Titicaca durante el verano del 2011. *Revista peruana de biología*, 22(3), 335-340.
- Britton, G. (2005). *Microbiología de aguas residuales*. John Wiley & Sons
- Brix H., Arias C. y Bubba M. (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands. *Water Sci. Technol.* 44, 47–54.
- Caicedo, J. R., Van der Steen, N. P., & Gijzen, H. (2007). 16. AVANCES EN EL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE LAGUNAS CON LENTEJA DE AGUA PARA LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO. *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio*, 173.
- Caicedo Campoverde, J. A. (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de Eisenia fetida y Agave filifera, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del Ministerio de Agricultura, Acuacultura, Ganadería y Pesca, Riobamba 2015* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Calheiros, C., Rangel, A., & Castro, P. (2007). Constructed Wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. *Water Research*, 41(8), 1790–1798.

- Cano, A. L. (2003). Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de los Gallardos (Almería). In *Ecología, manejo y conservación de los humedales* (pp. 99-112). Instituto de Estudios Almerienses.
- Cardona, L. A. L., Vanegas, C. (2009). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial alimentados con agua residual sintética (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Química).
- Cerón Vivas, A. Y Rojas Sánchez, P. (1995). Uso de macrófitas en depuración de aguas residuales. Santiago de Cali, Colombia, 114 p. Trabajo de grado (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Programa académico de ingeniería sanitaria.
- Chafloque, W. L., & Gómez, E. G. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 9(17), 85-96.
- Chalk, E., & Wheale, G. (1989). The root-zone process at Holtby Sewage Treatment Works. *Journal IWEM*, 3, 201-207.
- Charris, J. C., & Caselles-Osorio, A. (2016). Eficiencia de eliminación de contaminantes del agua residual doméstica con humedales construidos experimentales plantados con *Cyperus ligularis* (Cyperaceae) y *Echinochloa colonum* (Poaceae). *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 93-103.
- CIEMA (2005). Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente. Tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Proyecto ASTEC SUCHER & HOLZER. Austria - Nicaragua. Managua, Nicaragua. 43 p.
- CNA (2007). Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua. SEMARNAT. México D.F. 235 pp.

- Claros Bedoya, J. A. (2012). Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- CONAGUA. (2007a). Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2010). Estadísticas del Agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Edición 2010, 56-258.
- CONAGUA. (2012). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales. México: SEMARNAT.
- CONAGUA. (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, edición 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016, 286.
- CONAGUA. (2017). Estadísticas del Agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Edición 2018, 45-306.
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del agua en México, edición 2017. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Corcoran, E., Nellemann, C., Baker, E., Bos, R., Osborn, D., Savelli, H. (2010). Sick water? The central role of wastewater management in sustainable development. – A rapid response assessment. United Nations Environment Programme.
- Córdova Agreda, D. D., & Huamán García, T. (2021). Humedal artificial con Chrysopogon zizanioides para la remoción de aguas residuales domésticas en el Distrito de Habana–Moyobamba, 2018.
- Corzo, A., Sanabria, O., & García, M. (2016). Optimización hidráulica de humedales artificiales de alta tasa de rellenos con medios de soporte

plástico. Memorias de la III Conferencia Panamericana de Sistemas de Humedales para el Tratamiento y Mejoramiento de la calidad del Agua , 2016, Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería Química.

- Crespi R. Plevich O. et al. (2005). Manejo de aguas residuales urbanas.
- Crombet, S., Pérez, N., Ábalos, A., Rodríguez, S. (2013). Caracterización de las aguas residuales de la comunidad Antonio Maceo de la Universidad de Oriente. *Cubana de Química*, 25(2), 134-142.
- Cruz J. (2017). Más de 60% de municipios en México no tienen tratamiento de aguas residuales: Inegi, proceso: <https://www.proceso.com.mx/478579/60-municipios-en-méxico-tratamiento-aguas-residuales-inegi>.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application...* Victor Dalmont.
- De Dios, M. A. T., Sanginés, M. L. G. (2017). Estrategias empresariales es un micronegocio del giro mecánicos-automotriz en Guanajuato. *Jóvenes en la ciencia*, 3(2), 1354-1359.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Díaz-Cuenca, Elizabeth; Alavarado-Granados, Alejandro Rafael; Camacho-Calzada, Karina Elizabeth. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, vol. 14, núm. 1, pp. 78-97.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (2018). Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos (continúa en la Tercera Sección). DOF: 27/05/2016. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5439123&fecha=27/05/2016

- Domínguez Serrano, J. (2010). El acceso al agua y saneamiento: Un problema de capacidad institucional local. Análisis en el estado de Veracruz. *Gestión y política pública*, 19(2), 311-350.
- Espigares, M., & Pérez, J. (1985). Aspectos sanitarios del estudio de las aguas. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada, 13-89.
- EPA. (1993). Guía para el diseño y construcción de un humedal artificial de flujos subsuperficiales. U.S.A.: EPA región 6.
- EPA. (1993a). Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment. A Technology Assessment. United States.
- EPA. (1995). A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic Region. Philadelphia: US Government Printing Office.
- EPA (1998) Principles of Environmental Impact Assessment Review: Appendix A: Environmental Impact Assessment Checklist
- EPA (2000). Methodology for Deriving Ambient Water Quality Criteria for the Protection of Human Health.
- EPA. (2000b). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. Washington, D.C.: Office of Water. EPA 832-F-00-024.
- Evans, G. M., & Furlong, J. C. (2003). Environmental biotechnology: theory and application. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(11), 1418-1419.
- Faner, R., Sibila, O., Agustí, A., Bernasconi, E., Chalmers, J. D., Huffnagle, G. B., ... & Ponomarenko, J. (2017). The microbiome in respiratory medicine: current challenges and future perspectives. *European Respiratory Journal*, 49(4), 1602086.
- Faulkner S. y Richardson C. (1989). Physical and chemical characteristics of freshwater wetlands soils. Lewis Publishers. Tennessee. 805 pp.
- Ferraz de Abreu, A., Cavalcanti, Y. S., Guimarães, P., van Haandel, A. (2001). Uso da respirometria para a determinação experimental da cinética

de nitrifi-cação. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.

- Ferrer, Gabriela, Morán, Claudia, Aldana, Gerardo, & Pérez, Jhonny. (2013). Determinación del tiempo retención hidráulico en humedales construidos de flujo horizontal usando un trazador químico. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 36(3), 262-271.
- Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A., & Robles Martínez, Á. (2018). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- Figueroa, H. (2015). Extracción de fenol de las aguas residuales de la industria en las columnas pulsantes utilizando como relleno anillas de malla.
- Flores, B. (1996). Diseño y operación de Lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales industriales y municipales. Curso taller internacional avanzado. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Frazer-Williams, R. A. (2010). A review of the influence of design parameters on the performance of constructed wetlands. *Journal of Chemical Engineering*, 29-42.
- García, J., Morató, J., & Bayona, J. M. (2004). Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Barcelona, España: Ediciones CPET.
- García, S., & Corzo, H. (2008). Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Catalunya, España.
- Geldermann J. (2004). The reference installation approach for the techno-economic assessment of emission abatement options and the determination of BAT according to the IPPC-directive. *Journal of Cleaner Production*, 389–402.
- Gómez, L., Rodríguez, M., de la Noval, B., Ileana, M., & Hernández, M. A. (2008). Interacción entre el Ecomic® y una población cubana de *Meloidogyne* incognita en tomate. *Revista de Protección Vegetal*, 23(2), 90-98.
- Gómez Lee, M. I., & García Pachón, M. D. P. (2018). Construcción de la PTAR Canoas. La lucha contra la contaminación del río Bogotá. Aspectos

jurídicos y políticos. Tratado de derecho de aguas. Tomo I: derecho de aguas colombiano para el siglo XXI.

- González, J. F. (2004). Humedales artificiales para depuración. Fundación Global Nature, 79-89.
- Granados, M. G. F., Rodríguez, G. C., Sanchez, G. G. (2019). COMPARACIÓN DE UN BIORREACTOR CON MEMBRANAS SUMERGIDAS CON UN SISTEMA CONVENCIONAL DE LODOS ACTIVADOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 35, 57-64.
- Guerrero Legarreta, M. (2010). El agua. México, Mexico: FCE - Fondo de Cultura Económica. Recuperado de <https://elibro.net/es/ereader/biblioitboca/72081?page=128>.
- Henze M. (1997) Waste design for households with respect to water, organics and nutrients. Wat. Sci. Tech.35(9), 113–120.
- Hernández García, H., Buitrón Méndez, G., M Lopez-Vazquez, C., & J Cervantes Carrillo, F. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. IWA publishing.
- Hernández-Salazar, A. B., Moreno-Seceña, J. C., & Sandoval-Herazo, L. C. (2018). Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender. RINDERESU, 2(1-2), 75-87.
- Hidalgo, J. C., Montano, J. J., & Estrada, M. S. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria*, 14(1), 17-25.
- Hoffmann, H., & Platzer, C. (2011). Revisión Técnica de Humedales Artificiales: de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas. Eschborn: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, Programa de Saneamiento Sostenible.
- INEGI. (2020). Veracruz, Ignacio de la Llave. 16-05-2021, de INEGI Sitio web:https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_ver.pdf.

- Jaraba, M. A. B., González, D. F. H., & Miller, M. X. A. (2018). Economías de aglomeración en servicios hoteleros: los casos de Acapulco, Guerrero y Boca del Río Veracruz en México. *Interconectando Saberes*, (5), 95-115.
- Jenssen, P., Maehlum, T., Krogstad, T., & Vråle, L. (2005). High performance constructed wet- lands for cold climates. *Journal of Environmen- tal Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 40 (6-7), 1343-1353.
- Jou, CJG y Huang, GC (2003). Un estudio piloto para el tratamiento de aguas residuales de refinerías de petróleo utilizando un biorreactor de película fija. *Advances in Environmental Research* , 7 (2), 463-469.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Ratón, FL, USA: Lewis Publishers.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Boca Ratón: FL, USA.
- Kalbar, PP, Karmakar, S. y Asolekar, SR (2012). Selección de una tecnología de tratamiento de aguas residuales adecuada: un enfoque de toma de decisiones de atributos múltiples basado en escenarios. *Revista de gestión ambiental* , 113 , 158-169.
- Kickuth, R. (1977). Degradation and incorporation of nutrients from rural wastewaters by plant rhizosphere under limnic conditions. *Utilization of manure by land spreading*, 335-343.
- Kivaisi, A. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecol. Eng.* 16:545-560.
- Kutty, S., ISA, M. y León G.L.C. 2011. Removal of Ammonia-Nitrogen (NH₃-N) and Nitrate by Modified Conventional Activated-Sludge System to Meet New D.O.E Regulations. *International Conference on Environment and Industrial Innovation*. 12,103-107.
- López-Angarita, J., Tilley, A., Hawkins, J. P., Pedraza, C., & Roberts, C. M. (2018). Land use patterns and influences of protected areas on mangroves of the eastern tropical Pacific. *Biological Conservation*, 227, 82-91.

- Luna-Pabello, V. M., & Aburto-Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), 32-55.
- Llagas Chafloque, W., & Guadalupe Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica*, 9(17), 85-96. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v9i17.699>.
- Marín-Muñiz, J. L. (2017). HUMEDALES CONSTRUIDOS EN MÉXICO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, PRODUCCION DE PLANTAS ORNAMENTALES Y REUSO DEL AGUA. *Agroproductividad*, 10(5).
- Martínez, I. D. M., Silva, G. G., & Hurtado, S. H. V. (2013). Remoción de níquel y DQO presentes en las aguas residuales de la industria automotriz mediante electrocoagulación. *Revista EIA*, 10(19), 13-21.
- Matamoros V., Caselles-Osorio A., Garcia J., Bayona J.M., (2008) Behaviour of pharmaceutical products and biodegradation intermediates in horizontal subsurface flow constructed wetland: A microcosm experiment. *Science of the total environment*, 394: 171-176 Park N., Vanderford V.J., Snyder S.A., Sarp S., Kim S.D., Cho J., (2009) Effective controls of micropollutants included in wastewater effluen
- Mena, J., Rodriguez, L., Núñez, J., & Villaseñor, J. (2008). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. CONAMA.
- Metcalf y Eddy INC (1995) Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill/interamericana de España S.A. 1485 pp.
- Metcalf y Eddy. (2003). *Wastewater engineering treatment and reuse*. (4th edn.). New York: McGraw Hill. 1819p.
- Miranda R.M. (2000). Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal de México. Tesis de

Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Miranda, J. P. R., Ubaque, C. A. G., & Pinzón, J. P. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 19(46), 149-164.
- Monroy, M. (2010). Carbones activados con actividad biológica: Aplicación en la degradación de compuestos fenólicos procedentes de aguas residuales de la industria metalúrgica de Nobsa-Boyacá Manuel. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Posgrado Ciencias-Microbiología, 89.
- Moyano Arévalo, J. R., Naranjo Vargas, E. M., Santillán Mariño, C. J. (2018). Diseño de filtro con fibras naturales para purificación de aguas residuales de lavadora de vehículos. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, (noviembre).
- Moreno-Casasola, P., Cejudo-Espinosa, E., Capistrán-Barradas, A., Infante-Mata, D., López-Rosas, H., Castillo-Campos, G., ... & Campos-Cascaredo, A. (2010). Composición florística, diversidad y ecología de humedales herbáceos emergentes en la planicie costera central de Veracruz, México. *Boletín de la sociedad botánica de México*, (87), 29-50.
- Navarro, O. E. (2004). Representación social del agua y de sus usos. *Psicología desde el Caribe*, (14), 222-236.
- Neira Peña, N. C., & Ríos Díaz, W. (2016). Diseñar un plan de aseguramiento de la calidad para el montaje de tuberías de la planta de tratamiento de agua de la central térmica Recka.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-2021. ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.
- Núñez, J. (2017). Los Derechos Humanos y el Nuevo Orden Económico Mundial. *Revista AFESE*, 12 (12).

- Olivo, A. V., Magallanes, M. Y. L., & Sandoval, M. G. C. (2010). Extracción de Grasas y Aceites en los Efluentes de una Industria Automotriz. *Conciencia tecnológica*, (40), 29-34.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU (2017). Carta de las Naciones Unidas. En [http:// www.un.org/es/sections/un-charter/chapter-ix/index.html](http://www.un.org/es/sections/un-charter/chapter-ix/index.html)
- Palma-Acosta, M. J., & Certain, J. M. (2005). Simulación de un sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) para el tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de nitrógeno. *Ingeniería y desarrollo*, (18), 61-71.
- Parada-Puig, G. (2012). El agua virtual: conceptos e implicaciones. *Orinoquia*, 16(1), 69-76.
- Peña-Guzmán, Carlos & Lara-Borrero, Jaime. (2012). Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte. *Ciencia e ingeniería neogranadina* 0124-8170. 22. 39-61. 10.18359/rcin.240.
- Perez Sandoval, A. C., & Sernaque Vela, K. Y. Y. (2019). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de la ciudad de Chiclayo por medio de lodos activados a traves de aireación extendida.
- Pérez García, G. P., & Galarza Guzmán, A. J. (2019). Diseño de humedales artificiales para fitorremediación de plomo y cromo con typha latifolia en el lago Yahuarcocha-Imbabura (Bachelor's thesis).
- Píriz, A. (2004). Construcción y explotación de humedales construidos para la depuración de aguas residuales. In J. García, J. Morató, & J. Bayona, *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos* (pp. 81-88). Barcelona, España: CPET.
- Ponce Bonilla, S. A., Romero Romero, W. M., Yeomans, J., & Brevé, M. A. (2002). *Evaluación del sistema de descontaminación de las aguas residuales del relleno sanitario de la Universidad EARTH* (No. PG 32 2002).
- Quintero, J. V. (2014). *Evaluación de humedales evaporativos para el post tratamiento de aguas residuales domesticas* (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales. Maestría en Ecotecnología).

- Ramalho, R. S. (2021). Tratamiento de aguas residuales. Reverté.
- Ramírez-Carrillo, H. F., Luna-Pabello, V. M., & Arredondo-Figueroa, J. L. (2009). Evaluación de un humedal artificial de flujo vertical intermitente, para obtener agua de buena calidad para la acuicultura. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(1), 93-99.
- Ramon Vilanova, I. S. (2014). Control y Operacion de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales: Modelado y Simulacion. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*.
- Ramsar (2010). Políticas Nacionales de Humedales Elaboración y aplicación de Políticas Nacionales de Humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 4ª edición, vol. 2. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- RAS. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Sección II: Tratamiento de aguas residuales. Colombia. Bogotá D.C., p 145.
- Reglamento de la ley numero 21 de aguas del estado de Veracruz-Llave última reforma publicada en la gaceta oficial: 4 de junio de 2010. Reglamento publicado en la Gaceta Oficial del Estado de Veracruz.
- Reyes Rodríguez, J. E., & Reyes Rodríguez, J. L. (2008). Depuración de aguas residuales, usando humedales artificiales subsuperficiales en el Distrito de Chao.
- Reynolds, K. 2002. El tratamiento de las aguas residuales en Latinoamérica. Identificación del problema. URL: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/PDF/DeLaLaveSepOct02.pdf>.
- Rodríguez, C. (2003). Humedales construidos. Estado del arte (II). México. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, 24(3), 42-48
- Rodríguez Rodríguez, S. D., & Vargas Niño, Y. (2015).Evaluación del potencial de humedales artificiales piloto, implementados con la especie heliconia psittacorum, en la remediación de aguas residuales domésticas de bajo caudal para zonas rurales del piedemonte llanero.

- Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*, 1(1), 8-15.
- Romero-Aguilar, M., Colín-Cruz, A., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. A. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
- Rowan, A. C., Irala, C. Z., & Zamora, C. Q. (2018). Humedales Artificiales, una alternativa para la depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. *Diseño y Tecnología para el Desarrollo*, (5), 88-108.
- Sabath, E., & Robles-Osorio, M. L. (2012). Medio ambiente y riñón: nefrotoxicidad por metales pesados. *Nefrología (Madrid)*, 32(3), 279-286.
- Saeed T. y Sun G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *J. Environ. Manag.* 112, 429-448.
- Saganome Rodríguez, G. M. (2016). Diversidad de microorganismos endófitos y su papel en el ciclo de nitrógeno en macrófitas flotantes del Humedal Meandro del Say.
- Salazar, K. P. (2018). *Determinación de la calidad de agua mediante el uso de diatomeas bentónicas en el tramo padre Carollo-Paus, del Rio Blanco. parroquia Rio Blanco, cantón Morona, provincia de Morona Santiago* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Sanz, J. M., Martín, N., & Camacho, J. V. (2009). Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos. Castilla, España: CONAMA.
- Seidel, K. 1967. *Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen Naturwii*, 53. Germany.
- Semarnat (2016). Política Nacional de Humedales.
- Semarnat (2017). de MA y RN, 2016. Anuario estadístico de la producción forestal.

- Silva, S. H. 2006. La situación regional del saneamiento en América Latina. Organización Panamericana de la Salud. URL: <http://www.imta.gob.mx/gaceta/antecedentes/g23-03-2009/situacion-saneamientolac.pdf>.
- Silva, Á. S., & Zamora, H. D. (2005). Humedales artificiales. Monografía. Universidad Nacional de Colombia: Manizales.
- Silván, R. S., Ocaña, G. L., Margulis, R. G. B., Barajas, J. R. H., & Cerino, M. J. R. (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.
- Subtil, E. L.; HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C. (2014). Biorreactores con membranas submersas (BRMs): alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários para reuso sp. *Revista Ambiente & Água*, v. 8, n. 3.
- Tacias Pascacio, V. G., Rosales Quintero, A., & Torrestiana Sánchez, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: un caso de estudio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 303-313.
- Tanaka, N., Jinadasa, K., & Ng, W. (2011). *Wetlands for Tropical Applications: Wastewater Treatment by Constructed Wetlands*. London: Imperial College Press.
- Tejeda, A., López, Z., Rojas, D., Reyna, M. Z., Barrera, A., & Zurita, F. (2015). Eficiencia de tres sistemas de humedales híbridos para la remoción de carbamazepina. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(6), 19-31.
- Tilley, E. (2014). *Compendium of sanitation systems and technologies*. Eawag.
- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, (64), 9-18.
- Toledo, J., & Toledo, F. (2010). Propuesta de aplicación de la metodología beneficio costo para la evaluación económica de proyectos de plantas de

tratamiento de aguas residuales: caso PTAR del Cusco. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.

- Tsukamoto, R. (2002). Tratamiento Primario Avanzado: El Paradigma moderno de tratamiento de aguas residuales sanitarias. Acodal, Cali.
- Van Haandel, A. y Marais, G. (1999). O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operação. Campina Grande, Brasil: Epgraf. 488p.
- Varón, M. R. P., Van Ginneken, M., & Madera, C. A. (2003). Humedales de flujo subsuperficial: una alternativa natural para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas tropicales. *Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 27-35.
- Vera, A., Ramos, K., Camargo, E., Andrade, C., Núñez, M., Delgado, J., ... & Morales, E. (2016). Fitorremediación de aguas residuales con alto contenido de plomo utilizando *Typha dominguensis* y *Canna generalis*. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 39(2), 088-095.
- Vibrans, H., & Tenorio-Lezama, P. (2009). Malezas de México. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas.htm>.
- Volpedo, A. V., Yunes, T., & Fernández Cirelli, A. (2005). El humedal mixohalino de Bahía Samborombón: conservación y perspectivas. *Humedales Fluviales de América del Sur. Hacia un manejo sustentable*. J. Peten y J. Cappato (comp.), 89-110.
- Von Sperling, M. (1996). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. In: *Water Science and Technology*. Vol. 33 No. 3. Elsevier Science Ltd. Great Britain.
- Vymazal, J. (2007). Eliminación de nutrientes en varios tipos de humedales artificiales. *Ciencia del medio ambiente total*, 380 (1-3), 48-65.
- Vymazal Jan. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2, pp. 530-549.

- Vymazal, J., & Březinová, T. (2015). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Environment International*, 75(2), 11-20.
- Wiki. (2007). Ingeniería de aguas residuales. Wiki. <https://elibro.net/es/lc/biblioitboca/titulos/35813>.
- Wilson, H. R. J. (2020). Propuesta de implantación de sistemas alternativos de drenaje pluvial urbano en el proyecto vial avenida Tintal de Bogotá DC.
- Woo Reza, J. L. (2003). Estudio de viabilidad en la aplicación de lodos activados en suelo para los cultivos de Maíz (*Zea mays* L.) y nopal (*Opuntia ficus-indica*) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Yañez-Arancibia, A. y Lara-Domínguez, AL (1999). Los manglares de América Latina en la encrucijada. *Ecosistemas de manglar en América Tropical*, 8-16.
- Yañez Padilla, C. (2005). Planta Depuradora De Aguas Residuales En El Campus De Tafira.