



DESARROLLO, ADAPTACIÓN Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS

Proyecto HC2011.1

Informe Final

Coordinación de Hidráulica

Subcoordinación de Tecnología Apropiada

Participantes:

Axel Falcón Rojas	Tecnología Apropiada
Liliana García Sánchez	Tecnología Apropiada
Edson B. Estrada Arriaga	Tratamiento de Aguas Residuales
Raúl Medina Mendoza	Hidráulica Ambiental

2020



2020
LEONORA VICARIO
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



Índice

I.	Introducción.....	1
II.	Antecedentes.....	2
II.1)	<i>Sistema no convencional de tratamiento de aguas residuales.....</i>	<i>2</i>
III.	Evaluación de un humedal artificial horizontal.....	6
III.1)	<i>Número de habitantes por vivienda.</i>	<i>6</i>
III.2)	<i>Consumo doméstico de agua.....</i>	<i>6</i>
III.3)	<i>Caudal de aguas residuales.....</i>	<i>7</i>
III.4)	<i>Concentración de contaminantes en aguas residuales domésticas.....</i>	<i>8</i>
III.5)	<i>Dimensionamiento del sistema de tratamiento no convencional de aguas residuales propuesto en IMTA, 2007a.....</i>	<i>10</i>
III.6)	<i>Evaluación de trenes de tratamiento de aguas residuales alternos compuestos por tecnologías apropiadas.....</i>	<i>18</i>
III.7)	<i>Tanque séptico + humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial.....</i>	<i>18</i>
III.8)	<i>Tanque séptico + HAh + Laguna de maduración.....</i>	<i>21</i>
III.9)	<i>Humedal artificial electroquímico.....</i>	<i>27</i>
IV.	Conclusiones y recomendaciones.....	32
V.	Referencias.....	33



Índice de figuras

<i>Figura 1. Arreglo del sistema de tratamiento de agua residual considerando la separación de aguas grises y negras.</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2. Dimensiones del tanque séptico. A) Vista lateral. B) Vista superior</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Esquema del sistema de tratamiento. A) Vista lateral. B) Vista superior.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4. Promedio de habitantes por vivienda en México (INEGI, 2015).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5. Tren de tratamiento TS + Hah + LM.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM con diferentes configuraciones. Escenario 1. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM. Escenario 1. Profundidad 1 m. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM. Escenario 1. Relación $l - w = 2 a 1$. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM con diferentes configuraciones. Escenario 2. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 10. Mecanismos de transferencia de electrones de las BEA.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11. Humedal electroquímico basado en MFC.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12. Humedal electroquímico METland</i>	<i>31</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Variables de diseño del tanque séptico</i>	3
<i>Tabla 2. Dimensiones del humedal artificial horizontal</i>	5
<i>Tabla 3. Material de empaque del humedal artificial y su distribución</i>	5
<i>Tabla 4. Demanda de agua por nivel de servicio</i>	7
<i>Tabla 5. Consumo doméstico en el medio rural</i>	8
<i>Tabla 6. Parámetros determinados en el agua residual de la PTAR El Texcal</i>	9
<i>Tabla 7. Caracterización del agua residual de la PTAR El Texcal y comparación con valores típicos</i>	9
<i>Tabla 8. Datos de entrada para el diseño del tanque séptico</i>	10
<i>Tabla 9. Dimensiones del tanque séptico para el escenario 1</i>	12
<i>Tabla 10. Parámetros de entrada para el dimensionamiento del FAFA</i>	13
<i>Tabla 11. Parámetros de diseño del FAFA</i>	13
<i>Tabla 12. Concentraciones de contaminantes en el influente del humedal artificial. Escenario 1</i>	14
<i>Tabla 13. Concentraciones de contaminantes requeridas en el efluente del humedal artificial</i>	14
<i>Tabla 14. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el humedal artificial</i>	15
<i>Tabla 15. Dimensiones del tanque séptico para el escenario 2</i>	16
<i>Tabla 16. Parámetros de diseño del FAFA</i>	16
<i>Tabla 17. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el humedal artificial</i>	17
<i>Tabla 18. Concentraciones de contaminantes en el influente del humedal artificial. TS+HAh</i>	19



Tabla 19. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el HAh, escenario 1.19

Tabla 20. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el HAh, escenario 2.20

Tabla 21. Área de construcción requerida para cada sistema analizado.21

Tabla 22. Resultados reportados de eficiencia de remoción y producción de electricidad en humedales electroquímicos. Modificada de Srivastava et al. 2020.30





I. Introducción

Las Tecnologías Apropriadas son tecnologías de bajo costo y fácil operación que permiten el abastecimiento de agua en comunidades que no tienen acceso a este recurso, Además, facilitan su uso eficiente, aprovechando el agua y tratando el agua residual producida, lo que permite su reutilización en actividades que no involucran el contacto físico y que no requieren de agua potable para llevarse a cabo, como el riego de árboles y huertos, el arrastre de desechos en el baño o el lavado de pisos.

Es por lo anterior, que la integración de paquetes de tecnologías apropiadas permite el manejo integral del agua en comunidades rurales, marginadas que no cuentan con la infraestructura o los recursos económicos suficientes para satisfacer sus necesidades de agua y saneamiento. Lo que permite el cumplimiento del derecho humano al agua y la protección del medio ambiente mediante el tratamiento del agua residual producida.

En este sentido, el IMTA cuenta con la Subcoordinación de Tecnología Apropriada que se ha encargado de desarrollar, adaptar y transferir tecnologías para el manejo integral del agua, a través del abastecimiento, desinfección, tratamiento de agua residual y reúso de agua tratada, principalmente en comunidades rurales con alto y muy alto grado de marginación, con el objetivo de contribuir en el cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible, en materia de agua y saneamiento, y de acuerdo al artículo 4 Constitucional del Derecho Humano al Agua.

De esta manera, el IMTA ha generado un paquete de Tecnologías Apropriadas que se adaptan a las condiciones encontradas en nuestro país, con lo que se han atendido los problemas relacionados al tema agua en comunidades rurales marginadas e indígenas mediante la transferencia de 11,566 tecnologías en ocho estados (IMTA, 2018). Sin embargo, debido a la diversidad territorial, climática, cultural, social y de infraestructura de nuestro país, las tecnologías no se adaptan de la misma forma ni presentan la misma eficiencia, por lo que es necesario desarrollar y evaluar tecnologías apropiadas, adicionales a las que el IMTA ha identificado y evaluado, así como integrar nuevos paquetes tecnológicos que permitan atender las necesidades de agua y saneamiento en distintas zonas del país.

Para alcanzar este objetivo, en este proyecto se evalúa el sistema de tratamiento de aguas residuales del modelo experimental de casa ecológica rural del IMTA, que cuenta con un humedal artificial horizontal como etapa principal del tratamiento. Con esta evaluación se busca generar distintas configuraciones del sistema que puedan adaptarse a las necesidades y espacios disponibles de las zonas rurales y periurbanas de México.



II. Antecedentes

La Subcoordinación de Tecnología Apropriada del IMTA generó un modelo de casa ecológica sustentable para familias que habitan en zonas rurales, indígenas y periurbanas marginadas, para atender las necesidades básicas de agua, saneamiento y energía, así como la producción de alimentos para autoconsumo que no requiera de abastecimiento adicional de agua (IMTA, 2007a).

El modelo de casa ecológica sustentable generado por el IMTA incluye un paquete de tecnologías apropiadas (IMTA, 2007a) que permiten el manejo integral del agua y resuelve los principales problemas de abastecimiento, desinfección, tratamiento de aguas residuales, reúso y aprovechamiento del agua que se detectaron durante la atención de comunidades rurales por parte del IMTA.

Las tecnologías que se incluyeron en dicho paquete son:

- Sistema de captación de agua de lluvia
- Cisterna tipo capuchina
- Huerto familiar
- Tanque de descarga de fondo
- Bicibomba
- Caja de desinfección solar
- Lavadero ecológico
- Sanitario ecológico
- Sistema no convencional de tratamiento de aguas residuales

II.1) Sistema no convencional de tratamiento de aguas residuales

El sistema no convencional de tratamiento de aguas residuales, objeto de este estudio, considera la separación de las aguas grises (agua proveniente de la cocina, lavabo, lavadero y regadera) y las aguas negras (agua proveniente del escusado) y consiste en un pretratamiento realizado mediante un tanque séptico seguido por dos etapas de tratamiento; la primera consta de un filtro anaerobio y, la segunda etapa de un humedal artificial horizontal de flujo sub superficial. El arreglo del sistema de tratamiento del agua residual se presenta en la Figura 1.

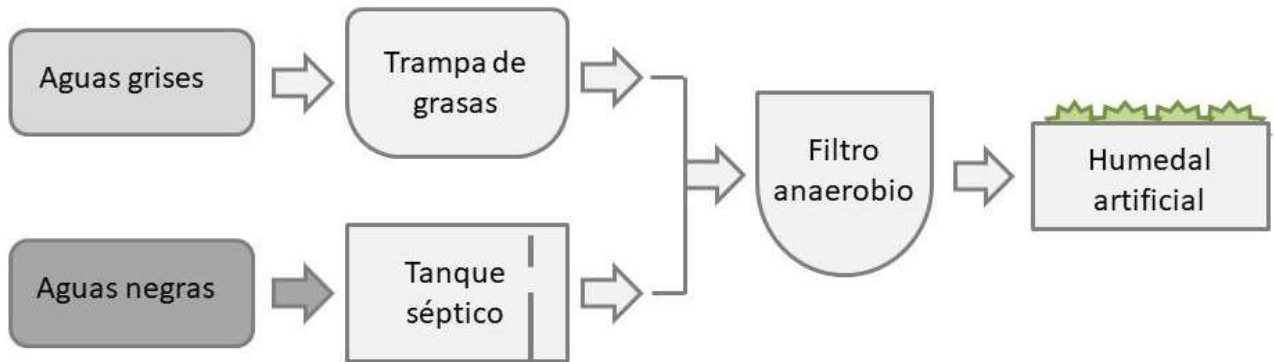


Figura 1. Arreglo del sistema de tratamiento de agua residual considerando la separación de aguas grises y negras.

Trampa de grasas

Se utiliza como pretratamiento de las aguas grises con el objetivo de eliminar la grasa y partículas pesadas que podrían afectar el funcionamiento del sistema de tratamiento. Se considera una trampa de grasas de 0.304 m³ con tiempo de residencia hidráulica de 160 s. Las dimensiones de la trampa son 1.10m x 0.52 m y profundidad de 0.75 m

Tanque séptico (pretratamiento)

Tanque de concreto de una cámara, diseñado para eliminar el 60% de la DBO, 80% de los sólidos suspendidos totales y el 75% de los patógenos (coliformes fecales) con un periodo de acumulación de sólidos de 12 meses.

El tanque tiene un área de 1.5 m² (1.55m x 0.968m) y profundidad total de 0.60 m. Las variables de diseño se presentan en la Tabla 1 y el diseño en la Figura 2.

Tabla 1. Variables de diseño del tanque séptico

Variable	Unidad	Valor
Tiempo promedio de retención hidráulico	d	0.81
Volumen de sedimentación	m ³	0.162
Volumen de almacenamiento de lodos	m ³	0.2
Volumen de nata	m ³	0.3
Área superficial	m ²	1.5
Profundidad de sedimentación	m	0.108
Profundidad de trabajo	m	0.5
Profundidad total	m	0.6



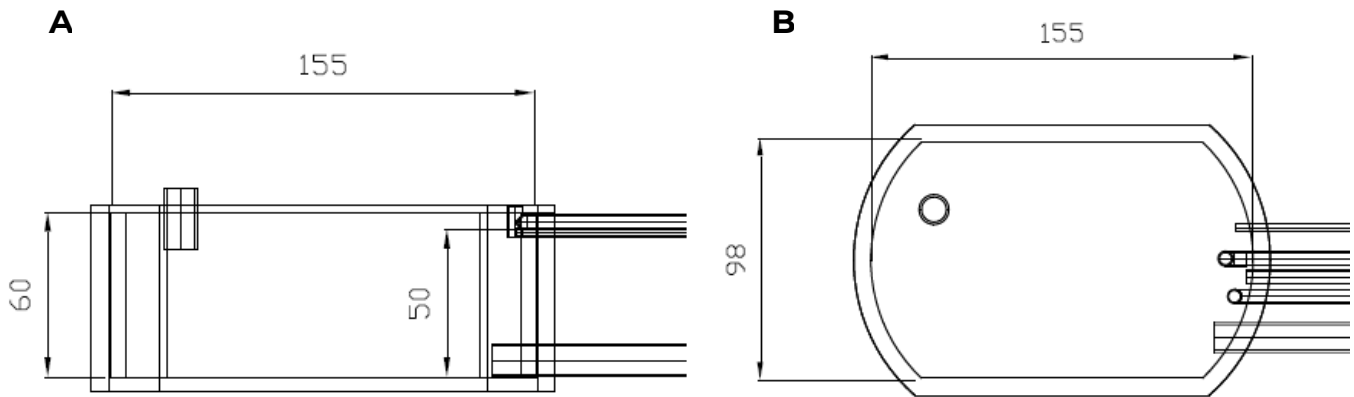


Figura 2. Dimensiones del tanque séptico. A) Vista lateral. B) Vista superior

Filtro anaerobio

Consiste en un reactor anaerobio de flujo ascendente con una cámara empacada con anillos de plástico PET (obtenidos de botellas plásticas utilizadas para almacenar bebidas), con una eficiencia de diseño entre 55 y 60% de remoción de contaminantes.

Se diseñó con un volumen de trabajo de 0.40 m^3 ($1.00 \text{ m} \times 0.55 \text{ m}$) y profundidad de 0.72 m (Figura 3). El tiempo de residencia hidráulica es de 1 d y la porosidad del material de empaque de 1.20 (80% de espacio vacío).

Humedal artificial horizontal de flujo sub superficial

El humedal artificial que se incluyó en el paquete de tecnologías alternativas para el ámbito rural fue diseñado mediante las ecuaciones propuestas por Kadlec y Knight (1996). Se propuso un caudal de $0.2 \text{ m}^3/\text{d}$ con concentraciones iniciales de 400 mg/l de DBO_5 y $1 \times 10^5 \text{ NMP}/100 \text{ ml}$ de coliformes.

Las áreas requeridas para tratamiento de las aguas residuales hasta valores permitidos por la norma oficial mexicana (DOF, 1996) son 1.5 m^2 para remoción de DBO_5 y 5.5 m^2 para remoción de coliformes fecales, por lo que se determina que el humedal debe tener un área de 5.5 m^2 , las dimensiones del humedal se presentan en la Tabla 2 y Figura 3.



Tabla 2. Dimensiones del humedal artificial horizontal

Parámetro	Valor
Longitud	5.50 m
Ancho	1.00 m
Profundidad	0.72 m
Área	5.5 m ²

El material elegido para empaque del humedal se describe en la Tabla 3.

Tabla 3. Material de empaque del humedal artificial y su distribución

Capa	Material	Espesor (cm)
Primera	Piedra de río (d= 10 cm)	20
Segunda	Grava media (d= 2.54 cm)	42
Tercera	Grazón*	10
Cuarta	Arena (d=0.2 cm)	5

* Grazón. Mezcla de grava con arena

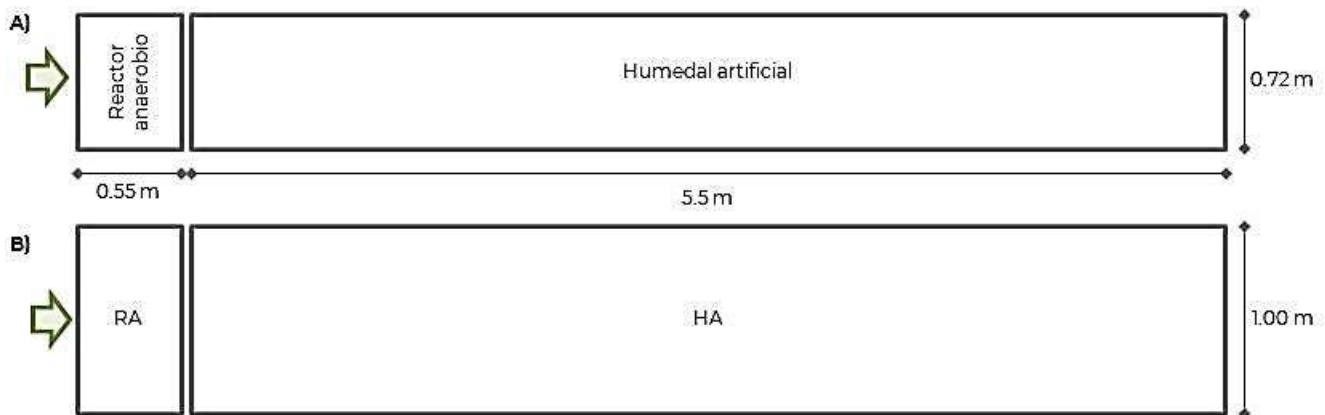


Figura 3. Esquema del sistema de tratamiento. A) Vista lateral. B) Vista superior



III. Evaluación de un humedal artificial horizontal

Se evaluó el sistema de tratamiento de aguas residuales propuesta para el modelo de casa ecológica sustentable para familias que habitan en el medio rural, actualizando las consideraciones de diseño a las condiciones actuales del país. Además, se proponen alternativas de configuración del sistema con el objetivo de tener una variedad de opciones que permitan una mejor atención a las necesidades de las comunidades rurales y periurbanas, así como a las condiciones presentes en las distintas zonas del país.

III.1) Número de habitantes por vivienda.

De acuerdo a la encuesta inter censal realizada en México (INEGI, 2015) el promedio de habitantes por vivienda en el país es de 3.7. Este parámetro ha mostrado una disminución desde el año 1995 al 2015, pasando de más de 4.5 habitantes por vivienda a menos de 4 (Figura 4). Para el año 2020 proyectamos aproximadamente 3.5 habitantes por vivienda por lo que consideramos que debemos proyectar el modelo de casa autosustentable para 4 habitantes.

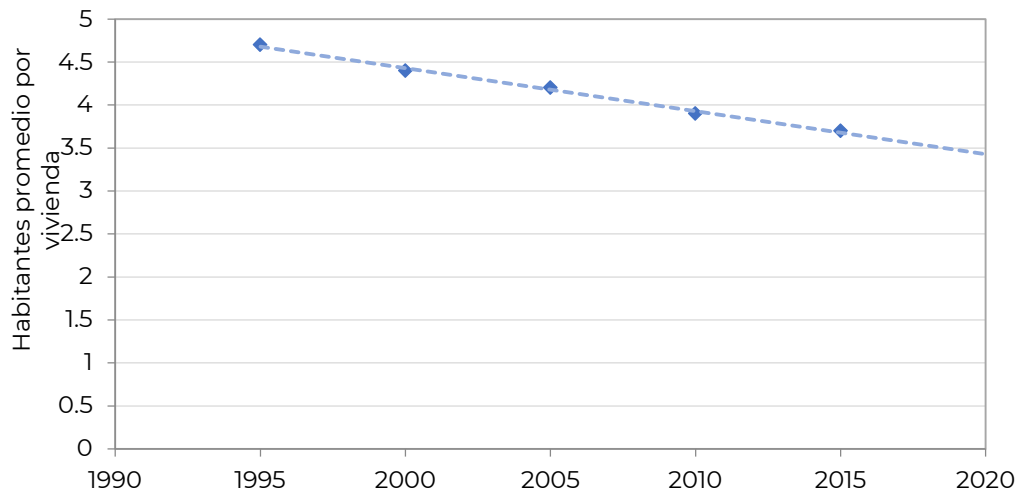


Figura 4. Promedio de habitantes por vivienda en México (INEGI, 2015)

III.2) Consumo doméstico de agua

La dotación de agua potable para el uso y consumo humano varía de acuerdo a la zona del país, las actividades económicas presentes en la zona, el tipo de clima, el medio (rural o urbano) en el que se asienta la vivienda y principalmente la existencia de una fuente de agua cercana a la localidad que resulte suficiente en cantidad y calidad.



Las dotaciones de agua recomendadas por la Organización Mundial de la Salud varían de acuerdo al nivel de servicio de suministro de agua (Tabla 4). Sin embargo, para las zonas rurales marginadas, que se buscan atender con las tecnologías apropiadas, es necesario considerar las limitaciones que pueden existir en el abastecimiento de agua potable, principalmente de fuentes alternativas como la captación de agua de lluvia.

Tabla 4. Demanda de agua por nivel de servicio.

Nivel de servicio	Demanda (l/hab/d)	Necesidades atendidas
Básico	20	Consumo – Se debe asegurar la higiene
Intermedio	50	Consumo e higiene básica personal y de los alimentos
Óptimo	100	Consumo e higiene (todas las necesidades)

Modificada de OMS (2003)

En este proyecto se consideran dos escenarios; **Escenario 1.** Dotación de *50 l/hab/d* para el dimensionamiento de las tecnologías de saneamiento, con esto se asegura que se tenga agua suficiente para el consumo personal, el lavado y la preparación de alimentos, el lavado de manos y la higiene personal. **Escenario 2.** Dotación de *100 l/hab/d* para el dimensionamiento de las tecnologías de saneamiento, (servicio óptimo; OMS, 2003). Este segundo escenario se plantea para contar con una referencia para proyectos que pudieran presentarse con dicha dotación.

III.3) Caudal de aguas residuales

El caudal de aguas residuales producido en una vivienda depende de la dotación de agua potable y el número de habitantes. Además, se recomienda considerar un factor de aportación de la dotación de agua que varía entre 0.70 y 0.75 (IMTA, 1993 tomado de CONAGUA 2019a). Este factor es debido a las pérdidas de agua que pueden presentarse en las tuberías de distribución y recolección, así como las pérdidas que ocurren durante su uso.

En este proyecto no se considera el factor de aportación debido a que los sistemas de tratamiento planteados serán a nivel vivienda, lo que minimiza las pérdidas de agua ocurridas.

En el caso del agua residual producida en el modelo de casa ecológica autosustentable se considera la separación del agua gris (agua que proviene del aseo personal, lavado de alimentos, utensilios de cocina y ropa), y el agua negra (agua que proviene del sanitario). Para este proyecto se considera que el 60% del agua residual es agua gris y el 40%, agua negra (Tabla 5). Sin embargo, después del pretratamiento ambos caudales se juntarán para ser tratados.



Con estas consideraciones y las dotaciones de agua potable planteadas en la sección anterior, se consideran los siguientes escenarios para el dimensionamiento del sistema de tratamiento no convencional de aguas residuales.

Escenario 1. Caudal de aguas grises de 30 l/hab/d y caudal de aguas negras de 20 l/hab/d. Caudal de agua que ingresa al tratamiento de 50 l/hab/d.

Escenario 2. Caudal de aguas grises de 60 l/hab/d y caudal de aguas negras de 40 l/hab/d. Caudal de agua que ingresa al tratamiento de 100 l/hab/d.

Tabla 5. Consumo doméstico en el medio rural.

Uso	Consumo diario (%)
Bebida, cocina y limpieza	30
Aseo personal	30
Eliminación de excretas	40

Modificado de CONAGUA (2019a)

III.4) Concentración de contaminantes en aguas residuales domésticas

Para conocer las concentraciones de contaminantes en aguas residuales domésticas que servirán de parámetros de entrada para la actualización y diseño de sistemas de tratamiento basados en tecnologías apropiadas, se buscó una fuente de agua residual que sirva de modelo experimental.

Se eligió la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales (PTAR) El Texcal, que se ubica en el municipio de Jiutepec, Morelos y depura las aguas residuales provenientes de la Unidad Habitacional El Texcal, como fuente de abastecimiento de agua residual.

Se caracterizó el agua residual mediante un muestreo de agua residual realizado en el mes de septiembre de 2020 y en el que se caracterizaron los parámetros que se presentan en la Tabla 6.

Los resultados obtenidos de la caracterización de dicha agua residual indican una cantidad de materia orgánica, medida como Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) de 380 mg/l y de 200 mg/l, respectivamente, así como contaminación por sólidos suspendidos totales (SST) de 150 mg/l y coliformes fecales de 1.4 x 10⁶ NMP/100 ml. Con respecto a los nutrientes contenidos en el agua residual, se encontró una concentración de nitrógeno total (NT) de 39 m/l y de fósforo total (PT) de 8 mg/l. Estos resultados se compararon con otras caracterizaciones reportadas del



agua residual de la PTAR El Texcal y con concentraciones típicas de contaminantes en aguas residuales municipales domésticas presentadas por otros autores (Tabla 7).

Tabla 6. *Parámetros determinados en el agua residual de la PTAR El Texcal*

Parámetro	Técnica analítica	Referencia
pH	Medición directa (NMX-AA-008-SCFI-2016)	DOF, 2016
Temperatura	Medición directa (NMX-AA-007-SCFI-2013)	DOF, 2013
DQO	Digestión y medición espectrofotométrica (HACH 8000)	HACH, 2000
DBO ₅	Incubación y medición de OD (NMX-AA-028-SCFI-2001)	DOF, 2001
SST	Método gravimétrico (NMX-AA-034-SCFI-2015)	DOF, 2015
NT	Digestión y medición espectrofotométrica (HACH 8075)	HACH, 2000
PT	Digestión y medición espectrofotométrica (HACH 8178)	HACH, 2000
Coliformes fecales	Sustrato cromogénico (IDEXX, Colilert)	

Los resultados presentados por IMTA (2007a) e IMTA (2012) fueron determinados en la PTAR El Texcal; Segura (2017) presenta datos de la PTAR del IMTA; mientras que IMTA, (2007b) y Von Sperling (2015) reportan concentraciones típicas de aguas residuales domésticas obtenidas de recopilación de datos y experiencia de los autores.

Tabla 7. *Caracterización del agua residual de la PTAR El Texcal y comparación con valores típicos*

Estudios	Parámetros							
	pH	T	DQO	DBO ₅	SST	NT	PT	CF
IMTA 2020*	7.4	23.5	380	200	150	39	8	1.4 x 10⁶
IMTA 2007a	NR	NR	NR	400	NR	NR	NR	1.0 x 10 ⁵
IMTA 2007b	NR	NR	500	220	202	40	8	5.5 x 10 ⁷
IMTA2012	7.28	23.2	468	NR	156	57.81	10.71	NR
Segura 2017	NR	NR	298	142	99	54	NR	1.8 x 10 ⁴
Von Sperling 2005	6.7 – 8.0	NR	450–800	250–400	200–450	35–60	4–15	NR

NR. No reportado. Unidades mg/l, excepto pH (unidades) y CF (NMP/100ml)

* Este trabajo

Se observa que las concentraciones de contaminantes en agua residual determinadas en este trabajo se encuentran dentro de los rangos reportados por los otros autores y de las concentraciones típicas reportadas, por lo que se utilizarán para el dimensionamiento del sistema de tratamiento no convencional.

III.5) Dimensionamiento del sistema de tratamiento no convencional de aguas residuales propuesto en IMTA, 2007a

Como se vio en los antecedentes de este documento, el sistema de tratamiento de aguas residuales que se propuso para el modelo de casa ecológica autosustentable cuenta con un tanque séptico de una cámara conectado a un reactor anaerobio y por último a un humedal artificial horizontal de flujo sub superficial (Figura 1). Con este sistema se busca obtener concentraciones de contaminantes del agua residual tratada que cumplan con los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional vigente (DOF, 1996 considerando el proyecto de norma 2017).

A continuación se presenta el dimensionamiento de las unidades de tratamiento.

Tanque séptico

El diseño del tanque séptico se realizó utilizando la metodología publicada por CONAGUA (2019b) y considerando los datos de entrada que se muestran en la Tabla 8 y que se describieron en las secciones anteriores de este informe.

Tabla 8. Datos de entrada para el diseño del tanque séptico

Parámetro	Valor	Unidades
Número de habitantes	4	hab
Dotación escenario 1	50	l/hab/d
Dotación escenario 2	100	l/hab/d
DBO ₅	200	mg/l
DQO	380	mg/l
SST	150	mg/l
Coliformes fecales	1.4 x 10 ⁶	NMP/100ml

Escenario 1.

El caudal que se considera que llegará al tanque séptico es el producto de la dotación y el número de habitantes en la vivienda, considerando que no existen pérdidas en las tuberías por lo que el factor de aportación es 1.0.

$$Q = 1.0 * D * P$$



Donde:

- Q.- Caudal (m^3/d)
- D.- Dotación ($m^3/hab*d$)
- P.- Número de habitantes en la vivienda (hab)

El caudal que se tratará en el tanque séptico es de $0.20 m^3/d$

Por tanto, el volumen del tanque será:

$$V_t = Q \text{ tr}$$

Donde:

- V_t.- Volumen del tanque (m^3)
- tr.- 1 d (recomendado por Conagua 2019b)

$$V_t = (0.20 m^3/d) (1 d) = 0.20 m^3$$

El volumen total del tanque está dado por:

$$V_T = V_t + V_L \text{ hab } t_{vu}$$

- V_T.- Volumen total del tanque (m^3)
- V_L.- Volumen de lodo ($0.07 m^3/hab*a$)
- t_{vu}.- Tiempo de vida útil del tanque (a)

$$V_T = (0.20 m^3) + (0.07 m^3/hab*a) (4 \text{ hab}) (5 \text{ a}) = 1.6 m^3$$

Debido a que se recomienda un volumen mínimo del tanque de $2 m^3$, el resultado se ajusta a este valor (CONAGUA 2019b). Y se considera una relación largo-ancho de 2:1 para el dimensionamiento y la altura recomendada para poblaciones menores a 19 habitantes



de 1.7 m, por lo que las dimensiones del tanque se presentan en la Tabla 9. Con estas dimensiones y considerando un margen de seguridad entre la altura de trabajo y la altura total del tanque de 20%, el tanque deberá tener una altura total de 2.1 m

Tabla 9. Dimensiones del tanque séptico para el escenario 1

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen del tanque	2	m ³
Altura	1.7	m
Ancho	0.8	m
Largo	1.5	m
Altura total	2.1	m

Con este tanque séptico se considera que se eliminará el 30% de la carga de DBO₅, el 60% de los SST y un orden de magnitud de los coliformes fecales, de acuerdo a las eficiencias que se han reportado para este tipo de pretratamiento (CONAGUA, 2019b).

Filtro anaerobio

El filtro anaerobio recibe el caudal de agua residual de la casa, después de haber pasado por el tanque séptico, en el caso del agua negra y de la trampa de grasas, en caso del agua gris.

$$Q = 0.75 * D * P + 0.25 * D * P$$

$$Q = 0.15 + 0.05 = 0.2 \text{ m}^3/\text{d}$$

Las concentraciones de DBO₅ y coliformes fecales de entrada al filtro son las resultantes del pre tratamiento en el tanque séptico (DBO₅ 140 mg/l y CF 1.4 x 10⁵), y los parámetros de diseño que se utilizarán son los recomendados por CONAGUA (2019c) (Tabla 10). Además, se considera como medio de empaque tezontle, por ser un material económico y fácil de conseguir.

Tabla 10. *Parámetros de entrada para el dimensionamiento del FAFA*

Parámetro de diseño	Valores	Unidades
Tiempo de Residencia Hidráulico (THR)	7	h
Altura del medio filtrante (hm)	1.8	m
Altura del bordo libre (hb)	0.5	m
Altura del bajo dren (hd)	0.5	m

Se utilizó el método de CONAGUA (2019c) para el diseño de filtros anaerobios de flujo ascendente como etapa secundaria de tratamiento. El volumen resultante del filtro es de 60 l con un volumen empacado de 40 l. La eficiencia de remoción de la carga orgánica (DBO₅ y DQO) es de aproximadamente 67%, obteniendo una concentración de DBO₅ en el efluente de 46 mg/l. Además, se estiman valores de coliformes fecales a la salida del filtro de 1.4×10^3 , según los valores de remoción de microorganismos en estos sistemas sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).

Tabla 11. *Parámetros de diseño del FAFA*

Parámetro de diseño	Valores	Unidades
Volumen del FAFA	0.06	m ³
Altura del FAFA	2.80	m
Área del FAFA	0.02	m ²
Largo del FAFA	0.14	m
Ancho del FAFA	0.14	m
Volumen del medio filtrante	0.04	m ³
Altura del medio filtrante	1.8	m
Altura del bordo libre	0.5	m
Altura bajo el dren	0.5	m

Humedal artificial horizontal

Como etapa principal del tratamiento secundario se incluye un humedal artificial horizontal de flujo sub superficial, que se diseña mediante la metodología publicada por CONAGUA (20019d).

Las concentraciones del influente son las obtenidas a la salida del filtro anaerobio de flujo ascendente (Tabla 12).

Tabla 12. Concentraciones de contaminantes en el influente del humedal artificial. Escenario 1

Parámetro	Concentración	Unidades
DBO ₅	46	mg / l
SST	105	mg / l
NT	39	mg / l
PT	8	mg / l
Coliformes fecales	1.4 x 10 ³	NMP / 100 ml

El humedal será empacado con tezontle de tres diferentes granulometrías, colocando la primera capa de 15 cm de grosor (20 – 40 mm), la capa posterior de 15 cm de grosor (10 – 20 mm) y la capa fina de 30 cm de grosor (2 – 10 mm). La porosidad media del sustrato es de 0.39.

Para el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se eligió una profundidad de 0.6 m y se considera la temperatura del agua, del mes más frío de 18°C (aproximadamente 4°C arriba de la temperatura ambiente).

Las concentraciones de contaminantes requeridas en el efluente son 10 % menores a los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el proyecto de norma oficial mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 (DOF, 2018) (Tabla 13).

Tabla 13. Concentraciones de contaminantes requeridas en el efluente del humedal artificial.

Parámetro	LMP	Concentración efluente	Unidades
DBO ₅	150	135	mg / l
SST	120	108	mg / l
NT	15	13.5	mg / l
PT	10	9	mg / l
Coliformes fecales	1.0 x 10 ³	900	NMP / 100 ml

Se calculó la constante de biodegradación (kt) a partir del coeficiente de temperatura ($\Theta = 1.06$) y la constante de mortalidad bacteriana de primer orden a 20 °C ($K_{20} = 0.89 \text{ d}^{-1}$), Obteniendo una $kt = 0.79 \text{ d}^{-1}$, de acuerdo a la ecuación:

$$kt = k_{20} \Theta^{(T-20)}$$

Posteriormente, se calcularon las áreas requeridas para la remoción de cada uno de los contaminantes de estudio.

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{kt D n}$$

Donde:

- As Área superficial del humedal (m²)
- Q Caudal (m³/d)
- C₀ Concentración del contaminante en el influente (mg/l)
- C_e Concentración del contaminante en el efluente (mg/l)
- kt Constante de biodegradación (d⁻¹)
- D Profundidad del humedal
- n Porosidad (fracción)

Se encontró que la mayor área requerida es para la remoción de NT resultando en 1.15 m². De acuerdo a este resultado se obtienen las dimensiones y variables de diseño del humedal artificial que se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el humedal artificial.

Parámetro	Resultado	Unidades
Volumen	0.27	m ³
TRH	1.34	d
Carga orgánica	0.01	kg/ d
Carga hidráulica	0.17	m / d
Carga orgánica superficial	0.008	kg/ m ² d
Largo	1.5	m
Ancho	0.8	m

Escenario 2.

Para este escenario en el que la dotación se considera de 100 l/hab/d, el caudal que se tratará en el tanque séptico será de 0.4 m³/d, por lo que el volumen del tanque (Vt) es 0.4 m³

El volumen total del tanque considerando el volumen de lodos de 70 l/hab*a y el tiempo de vida útil del tanque de 5 años, sin recibir mantenimiento, resulta de $1.8 \text{ m}^3 \sim 2 \text{ m}^3$

Por lo tanto, las dimensiones del tanque séptico para tratar las aguas residuales en este escenario serán las presentadas en la Tabla 15.

Tabla 15. Dimensiones del tanque séptico para el escenario 2

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen del tanque	2	m^3
Altura	1.7	m
Ancho	0.8	m
Largo	1.5	m
Altura total	2.1	m

Filtro anaerobio

En este caso, se utilizan los mismos parámetros d

e la Tabla 10 con la variación en el caudal por el aumento en la dotación de este escenario, $Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{d}$. Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 16 y nos arrojan una remoción de la carga orgánica (DBO_5 y DQO) de aproximadamente 67%, una concentración de DBO_5 en el efluente de 46 mg/l. Además, se estiman valores de coliformes fecales a la salida del filtro de 1.4×10^3 (OMS, 2006).

Tabla 16. Parámetros de diseño del FAFA

Parámetro de diseño	Valores	Unidades
Volumen del FAFA	0.12	m^3
Altura del FAFA	2.80	m
Área del FAFA	0.04	m^2
Largo del FAFA	0.20	m
Ancho del FAFA	0.20	m
Volumen del medio filtrante	0.08	m^3
Altura del medio filtrante	1.8	m
Altura del bordo libre	0.5	m
Altura bajo el dren	0.5	m

Humedal artificial horizontal

Para el diseño del humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial se considera que las concentraciones del influente son las obtenidas a la salida del filtro anaerobio de flujo ascendente (Tabla 12) y las concentraciones en el efluente son las reportadas en la Tabla 13.

El humedal será empacado con Tezontle de tres diferentes granulometrías, colocando la primera capa de 15 cm de grosor (20 – 40 mm), la capa posterior de 15 cm de grosor (10 – 20 mm) y la capa fina de 30 cm de grosor (2 – 10 mm). La porosidad media del sustrato es de 0.39.

Para el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se eligió una profundidad de 0.6 m y se considera la temperatura del agua, del mes más frío de 18°C (aproximadamente 4°C arriba de la temperatura ambiente).

El contaminante que más requerimientos de área presentó para su remoción fue el NT con un As de 2.57 m², por lo que se realiza el dimensionamiento en función de dicha área. Los resultados obtenidos referentes a las dimensiones y variables de diseño del humedal artificial se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el humedal artificial.

Parámetro	Resultado	Unidades
k ₂₀	0.89	d ⁻¹
kt	0.70	d ⁻¹
Volumen	0.6	m ³
TRH	1.5	d
Carga orgánica	0.02	kg/ d
Carga hidráulica	0.16	m / d
Carga orgánica superficial	0.007	kg/ m ² d
Largo	2.3	m
Ancho	1.1	m

Los resultados del dimensionamiento del tren de tratamiento, para ambos escenarios estudiados, muestran que teóricamente los sistemas resultan viables para la remoción de contaminantes orgánicos, nutrientes y microorganismos de aguas residuales domésticas, hasta concentraciones que se encuentren por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad oficial vigente en México (DOF, 2018). Sin embargo, se observa que los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) que se dimensionaron como



primera etapa de tratamiento, tienen medidas que no resultan viables para su construcción (Tabla 11 y Tabla 16). Ya que, para cumplir con los rangos de carga orgánica volumétrica y carga hidráulica superficial recomendados para un funcionamiento correcto del sistema (CONAGUA, 2019c), se requiere de un FAFA con altura de 2.8 m y base de 0.14 x 0.14 m (0.20 x 0.20 m para el escenario 2) lo que resulta poco viable estructuralmente, además de complicar el proceso constructivo.

Este resultado se debe principalmente a que los caudales y cargas contaminantes, que se presentan en una vivienda, son muy bajos para un tren de tratamiento que incluya un FAFA. Por lo anterior, se analizan trenes de tratamiento alternativos que permitan la depuración de aguas residuales a nivel domiciliario.

III.6) Evaluación de trenes de tratamiento de aguas residuales alternos compuestos por tecnologías apropiadas

Se dimensionaron y evaluaron alternativas al tren de tratamiento estudiado anteriormente. Las opciones propuestas son:

- Tanque séptico (TS) + humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial (HAh)
- TS+ HAh + Laguna de maduración (LM)
- Humedal artificial horizontal electroquímico

III.7) Tanque séptico + humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial

En este primer tren de tratamiento se descartó el uso del FAFA del sistema, utilizando como pretratamiento un tanque séptico y como tratamiento único, un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial.

Se evaluaron los dos escenarios descritos anteriormente ($Q= 0.2$ y $0.4 \text{ m}^3/\text{d}$). Debido a que el número de habitantes y las características del agua residual son las mismas que se analizaron en el caso anterior, se utilizarán los resultados obtenidos anteriormente (Tabla 9 y Tabla 15 **Tabla 13**).

Escenario 1.

Se considera una vivienda de 4 habitantes y una dotación de agua potable de 50 l/hab/d. Las concentraciones de contaminantes en el influente del humedal serán las obtenidas a la salida del tanque séptico (Tabla 18) y las concentraciones requeridas en el efluente son las reportadas en la Tabla 13.



Tabla 18. Concentraciones de contaminantes en el influente del humedal artificial. TS+HAh.

Parámetro	Concentración	Unidades
DBO ₅	140	mg / l
SST	105	mg / l
NT	39	mg / l
PT	8	mg / l
Coliformes fecales	1.4 x 10 ⁵	NMP / 100 ml

La configuración del humedal será la misma que se utilizó anteriormente, considerando un empaque con tezontle de tres diferentes granulometrías, colocando la primera capa de 15 cm de grosor (20 – 40 mm), la capa posterior de 15 cm de grosor (10 – 20 mm) y la capa fina de 30 cm de grosor (2 – 10 mm), con porosidad media del sustrato de 0.39.

Fijando la profundidad del humedal en 0.6 m y considerando la temperatura del mes más frío de 18 °C, se obtiene que la remoción de coliformes fecales, es la que requiere una mayor área de tratamiento (5.45 m²), por lo que dimensionando el HAh con un área de tratamiento de 5.45 m² será posible la depuración de la carga orgánica y nutrientes hasta los niveles requeridos. Los resultados obtenidos referentes a las dimensiones y variables de diseño del humedal artificial se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el HAh, escenario 1.

Parámetro	Resultado	Unidades
k ₂₀	0.89	d ⁻¹
kt	0.79	d ⁻¹
Volumen	1.27	m ³
TRH	6.37	d
Carga orgánica	0.03	kg/ d
Carga hidráulica	0.04	m / d
Carga orgánica superficial	0.005	kg/ m ² d
Largo	3.3	m
Ancho	1.7	m

Escenario 2.

Se realizó el dimensionamiento del HAh utilizando las mismas variables que en el caso anterior (Tabla 13 y Tabla 18), así como la misma configuración de empaque y con una dotación de agua potable en la vivienda de 100 l/hab/d, es decir un caudal de 0.4 m³/d.

Al igual que en el escenario 1, la remoción de coliformes fecales es el proceso que demanda una mayor área de tratamiento, por lo que dimensionando el HAh con esta área (12.24 m²) será posible la depuración de la carga orgánica y nutrientes hasta los niveles requeridos. Los resultados obtenidos referentes a las dimensiones y variables de diseño del humedal artificial se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Dimensiones y variables de diseño obtenidas para el HAh, escenario 2.

Parámetro	Resultado	Unidades
k ₂₀	0.89	d ⁻¹
kt	0.70	d ⁻¹
Volumen	2.86	m ³
TRH	7.16	d
Carga orgánica	0.06	kg/ d
Carga hidráulica	0.03	m / d
Carga orgánica superficial	0.005	kg/ m ² d
Largo	4.9	m
Ancho	2.5	m

Este tren de tratamiento que considera solamente un tanque séptico y un HAh no presenta restricciones constructivas al tener dimensiones de 3.3 m x 1.7 m y 4.9 m x 2.5 m, para cada uno de los escenarios planteados. Sin embargo, analizando el área de construcción (área de cada pared que se debe construir) requerida para cada tren de tratamiento, se obtiene que al utilizar solamente un HAh como tratamiento principal el área de construcción requerida se duplica (Tabla 21), lo que significa un mayor costo en la implementación de este sistema de tratamiento respecto al que considera el uso de un FAFA.

Tabla 21. Área de construcción requerida para cada sistema analizado.

	Escenario 1		Escenario 2	
	Área (m ²)			
FAFA	FAFA + Hah	Hah	FAFA + HA	Hah
Fondo	0.02	NA	0.04	NA
Pared 1	0.39	NA	0.56	NA
Pared 2	0.39	NA	0.56	NA
Pared 3	0.39	NA	0.56	NA
Pared 4	0.39	NA	0.56	NA
Hah				
Fondo	1.2	5.61	2.53	10.81
Pared 1	0.9	1.98	1.38	2.82
Pared 2	0.9	1.98	1.38	2.82
Pared 3	0.48	1.02	0.66	1.38
Pared 4	0.48	1.02	0.66	1.38
Área total	5.55	11.61	8.89	19.21

NA. No aplica

III.8) Tanque séptico + HAh + Laguna de maduración

Con el objetivo de encontrar opciones de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel vivienda, utilizando tecnologías apropiadas, que requieran una menor área de construcción con respecto a la opción de utilizar solamente un HAh como tratamiento principal, se estudió la disminución del área requerida por el HAh mediante la adición de una laguna de maduración. Este tren de tratamiento considera un tanque séptico como pretratamiento, un HAh y una Laguna de Maduración (LM) (Figura 5).



Figura 5. Tren de tratamiento TS + Hah + LM



El tanque séptico para este sistema tiene las mismas dimensiones para las dotaciones utilizadas anteriormente (50 y 100 l/hab/d) y se reportan en la Tabla 9.

El HAh se dimensionó utilizando la configuración, así como las variables de entrada y salida que se reportaron en la sección “Tanque séptico + humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial”.

El área requerida por el HAh para la depuración de las aguas residuales domésticas para el cumplimiento de la normatividad oficial vigente (DOF, 2018) es de 5.45 m² para el escenario 1 (Tabla 19) y 10.89 m², para el escenario 2 (Tabla 20).

Para evaluar si la adición de una laguna de maduración al tren de tratamiento disminuye el área que se requiere para la depuración de las aguas residuales domésticas, se determinan las concentraciones de DBO₅, coliformes fecales, fósforo total y nitrógeno total en el efluente del humedal, que se obtendrían si el humedal operara con el 95, 90, 85, 80, 70, 60 y 50 % del área total requerida y se complementará el tratamiento mediante una laguna de maduración.

La laguna de maduración se dimensionó mediante el método reportado por IMTA (2017). Las concentraciones de DBO₅ y coliformes fecales en el influente son las obtenidas después del HAh, para cada una de las áreas analizadas.

Se propone un tiempo de residencia hidráulica de 1 d, relación largo ancho de 3 a 1 (X) (IMTA, 2017) y profundidad de 0.6 m (misma profundidad del HAh). La evaporación (Ev) es de 1916.3 mm/año y se obtiene de la estación climatológica 17071 ubicada en Progreso, Jiutepec, Morelos.

El volumen de la laguna se obtiene de la relación entre el gasto de entrada y el tiempo de residencia hidráulica propuesto, de acuerdo con la ecuación.

$$V = Q \times TRH$$

El área de la laguna se calcula dividiendo el volumen entre la profundidad (p) propuesta.

$$A = \frac{V}{p}$$

Las dimensiones, ancho (w) y largo (l) se obtienen utilizando el área calculada y la relación 3 a 1 propuesta de acuerdo a las ecuaciones siguientes.



$$w = \sqrt{\frac{A}{3}}$$

$$l = \frac{A}{w}$$

Se determina el caudal en el efluente (Q_{ef}) mediante el caudal de entrada, el área de la laguna y la evaporación:

$$Q_{ef} = 0.001 \times A \times Ev$$

Por último, se determinan las constantes de remoción para coliformes fecales y DBO_5 , así como las concentraciones de estos parámetros en el efluente.

$$k_{CF} = 0.84 (1.07)^{T-20}$$

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392 X + 1.01460 X^2}$$

$$a = \sqrt{1 + (4 \times k_{CF} \times TRH \times d)}$$

$$C_{CF} = \frac{C_{CFi} (4ae^{0.5d})}{(1+a)^2 e^{\frac{a}{2d}} - (1-a)^2 e^{\left(\frac{-a}{2d}\right)}}$$

$$k_{DBO} = \frac{1}{1.085^{35-T}}$$

$$C_{DBO} = \frac{C_{DBOi}}{(k_{DBO} \times TRH) + 1}$$

Se corrigen las concentraciones de salida de coliformes fecales y DBO₅ utilizando el caudal de entrada y el caudal corregido por evaporación.

$$C_{CF\text{corregida}} = \frac{C_{CF} \times Q}{Q_{ef}}$$

$$C_{DBO\text{corregida}} = \frac{C_{DBO} \times Q}{Q_{ef}}$$

Y se verifica que las concentraciones obtenidas se encuentren por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la norma (DOF, 2018). De esta manera, se puede iterar modificando el TRH hasta alcanzar las concentraciones requeridas en el efluente.

Con los resultados obtenidos se determinan las dimensiones de la LM como complemento a la reducción del área de tratamiento del humedal. Y se determinan las áreas de los muros que se tienen que construir para implementar estos trenes de tratamiento. Los resultados obtenidos para el **Escenario 1** (50 l/hab/d) se muestran en la Figura 6.

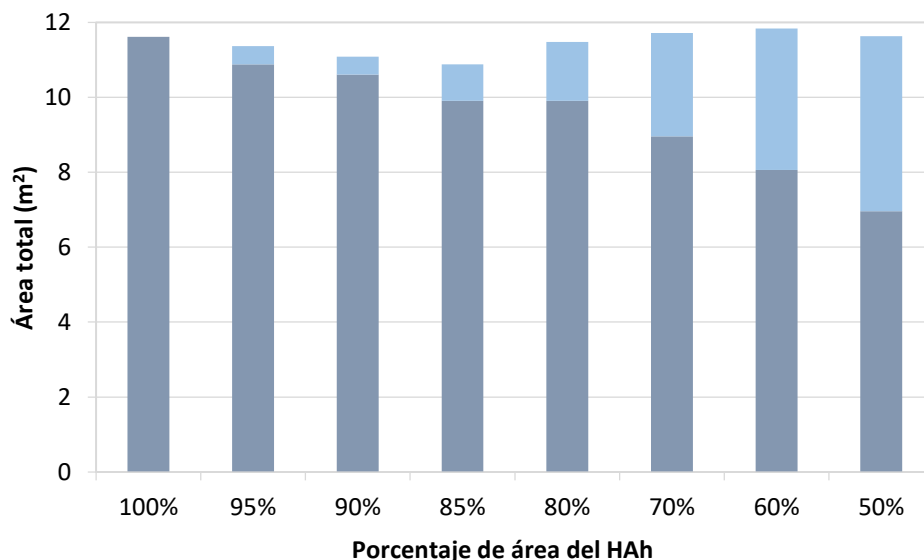


Figura 6. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM con diferentes configuraciones. Escenario 1. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM.

Se observa que si se reduce 85 % el área de tratamiento del HAh, el área total que se requiere construir para implementar el sistema HAh + LM es 6.5 % menor (de 11.6 a 10.9 m²)





para obtener los mismos resultados de depuración de contaminantes, con respecto a solo considerar un HAh. Sin embargo, esta disminución en el área de construcción es menor a 0.7 m².

Del mismo modo, se realizó el análisis considerando una profundidad de 1 m en la laguna de maduración (Figura 7), obteniendo una disminución del área de 6 % si se limita el área de HAh a 85 %. Por último, se realiza el mismo análisis variando la configuración de la LM cambiando la proporción largo – ancho a una relación 2 a 1 (Figura 8). En este caso no se observa disminución en el área requerida, por lo que se decide analizar el escenario 2 considerando una profundidad de la LM de 1 m y una relación largo – ancho de 3 a 1.

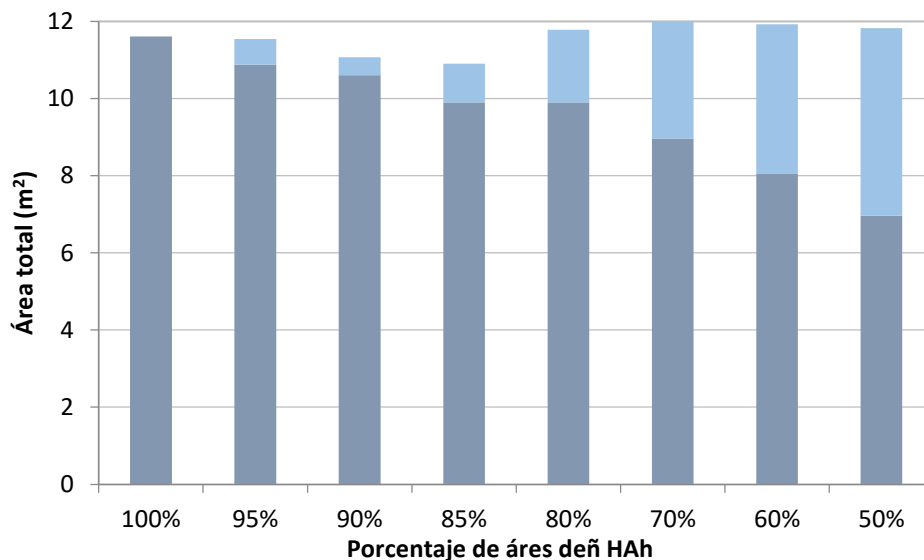


Figura 7. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM. Escenario 1. Profundidad 1 m. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM

Por otra parte, los resultados obtenidos para el **Escenario 2** (Figura 9) muestran que se requiere 5 % menos área de construcción si se considera el 90 % del área del HAh y se complementa con una laguna de maduración (de 19.2 a 18.3 m²).

El uso de la LM como complemento al HAh no solo implica una disminución en el área de tratamiento, también se refleja en una disminución de los requerimientos de material de empaque para el humedal. Sin embargo, al ser sistemas diseñados para implementarse a nivel vivienda, los caudales de tratamiento son bajos, por lo que no se refleja una ventaja significativa. Además, la LM resultante tiene dimensiones muy pequeñas, por lo que podría no ser viable como tratamiento complementario.



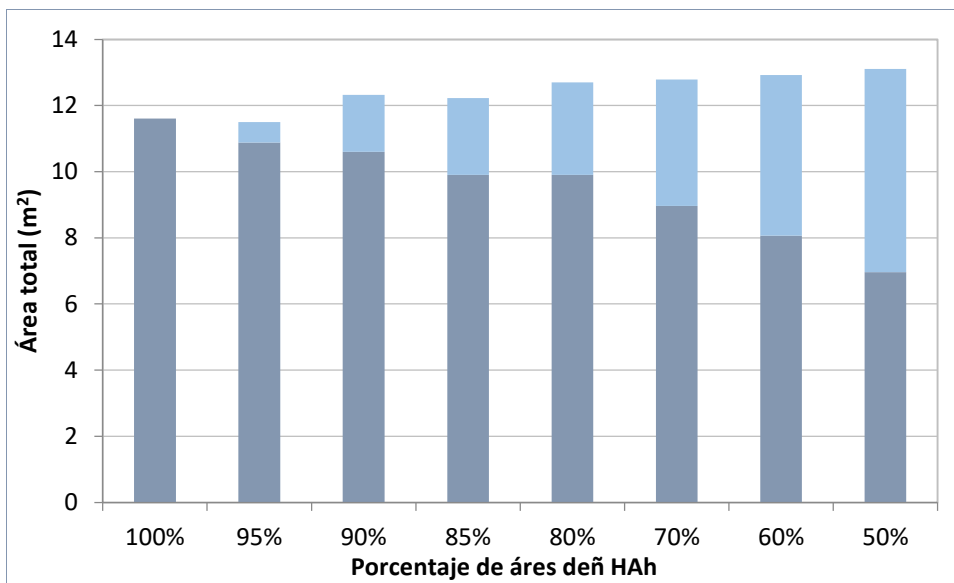


Figura 8. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM. Escenario 1. Relación l – w = 2 a 1. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM

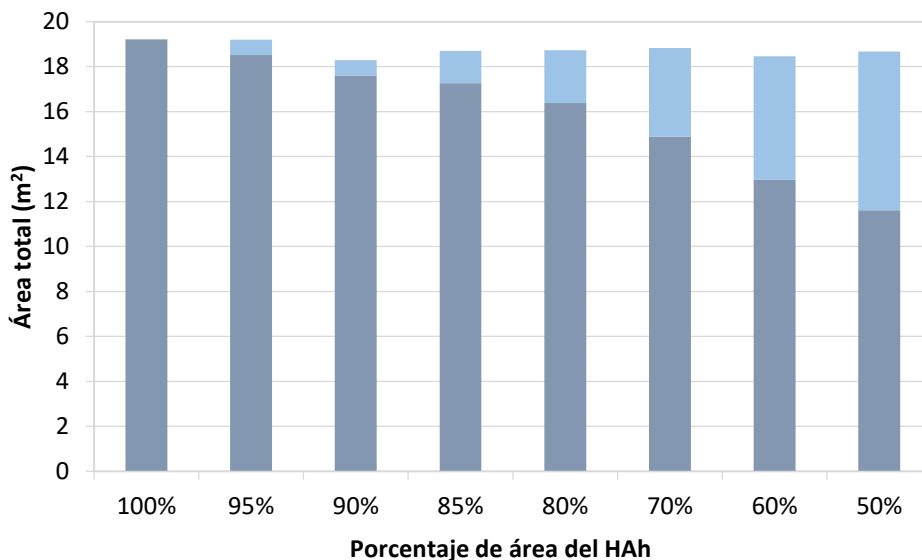


Figura 9. Área total requerida para el tratamiento HAh + LM con diferentes configuraciones. Escenario 2. Azul, área requerida por el HAh; azul claro, área requerida por la LM.





III.9) Humedal artificial electroquímico

Los humedales artificiales han resultado un tratamiento efectivo para las aguas residuales domésticas. Son sistemas que presentan bajo costo de instalación, operación y mantenimiento, además de que no requieren de electricidad o mano de obra especializada para su operación. Debido a esto se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales marginadas, donde la instalación y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales convencional no resulta viable.

Estos sistemas logran la remoción de contaminantes orgánicos, sólidos suspendidos totales, nutrientes como fósforo y nitrógeno, así como la eliminación de patógenos. Se han reportado diferentes configuraciones y condiciones de operación obteniendo eficiencias de remoción alrededor de 80 – 90 % para DQO, 20 – 30 para nitrógeno y fósforo (Ortega et al., 2010). Sin embargo, los HAh presentan la desventaja de requerir una mayor área territorial para su instalación respecto a otras tecnologías (USEPA, 1999), lo que limita su utilización a gran escala o en zonas urbanas y periurbanas.

Analizando los resultados obtenidos del dimensionamiento del humedal artificial horizontal, presentados en la sección III.7). Se observa que la eliminación de coliformes fecales en las aguas residuales es el parámetro que requiere una mayor área de tratamiento. Para el escenario que plantea un caudal de 200 l/d se requiere un área de 5.45 m², mientras que para la eliminación de DBO₅, SST, PT y NT solamente se requiere un área de 1.45 m², es decir, menos del 26 %.

Estos resultados muestran que el área de tratamiento requerida por un HAh se reduciría significativamente si se implementara un tratamiento complementario, que eliminara los coliformes fecales presentes en el efluente del HAh. Sin embargo, entre las opciones disponibles de tratamientos complementarios se encuentran las lagunas de maduración, las cuales no presentaron una reducción significativa del área territorial y del área de construcción requerida (Sección III.8).

Otra opción de tecnología que se podría implementar para la desinfección del agua residual es la cloración del efluente del HAh. Sin embargo, se requiere de la adquisición de productos químicos, instrumentos de medición y de dosificación, lo que contrarrestaría el propósito principal de las tecnologías apropiadas. Además, si no se aplicará correctamente, podría generar problemas de contaminación al medio ambiente por la generación de compuestos organoclorados o trihalometanos en el efluente, los cuales son compuestos tóxicos y potencialmente cancerígenos (Gay y Tubau, 2000).

Es por lo anterior que en los últimos años ha tomado importancia la investigación en humedales artificiales electroquímicos (Ramírez-Vargas et al., 2018). Ya que al estudiar el mecanismo de biodegradación presente en los HAh se encontró que los microorganismos generan electrones durante el proceso de degradación oxidativa y que estos electrones



son transportados por aceptores naturales de electrones presentes en el humedal, como el oxígeno.

El oxígeno disuelto dentro de un HAh va disminuyendo a lo largo del proceso, por lo que se forma un cuello de botella que impide una biodegradación más rápida por parte de los microorganismos. Una posible solución para este inconveniente es la inyección de oxígeno al proceso, lo que implicaría un mayor costo de instalación y representaría un costo eléctrico que aumentaría el costo de operación de esta tecnología.

Basados en las Celdas de Combustible Microbiano (MFC por su siglas en inglés) se inició la exploración de materiales de empaque para los humedales artificiales, que además de cumplir con las funciones de los sustratos utilizados convencionalmente (soporte para la biopelícula y material de filtrado), sirvan como aceptores de electrones que permitan una rápida transferencia desde los microorganismos degradadores, lo que acelera el proceso de depuración de aguas residuales.

Los microorganismos que participan en este proceso de biodegradación de materia orgánica y transferencia de electrones son principalmente bacterias conocidas como Bacterias Electro Activas (BEA). Estas bacterias deben estar en contacto con el material conductor para ceder sus electrones (Figura 10a). Sin embargo, también pueden generar nano cables que son pequeños flagelos que pueden conducir la electricidad, conectándose con el material conductor (Figura 10b) o incluso, formando redes de conducción con otras Bacterias No Electro Activas (BNEA) (Figura 10c) (Ramírez-Vargas et al., 2018).

Utilizando los conceptos de MFC y BEA se han desarrollado dos configuraciones para el diseño y operación de humedales electroquímicos. El primero, aprovecha las zonas anaerobias (en el fondo) y aerobias (en la superficie) del humedal, para generar un potencial eléctrico que permite el flujo de electrones, acelerando el proceso de biodegradación de materia orgánica y produciendo un pequeño voltaje. Para implementar este tipo de humedales electroquímicos se coloca un ánodo en el fondo del humedal y un cátodo en la superficie, utilizando materiales conductores que actúan como electrodos. Dichos electrodos se conectan entre sí, para permitir el flujo de electrones (Figura 11).

Los primeros sistemas, con esta configuración, que se implementaron tuvieron una remoción de materia orgánica de 75 % y produjeron una máxima densidad de potencia de 15.73 mWm^{-2} y una corriente máxima de 69.75 mA m^{-2} (Ramírez-Vargas et al., 2018).

Actualmente, se han reportado diversos trabajos que evalúan diferentes configuraciones de humedales electroquímicos, variando la eficiencia de remoción de materia orgánica entre 57.4 y 99 % y produciendo una corriente eléctrica de hasta 713 mV (Srivastava et al. 2020).

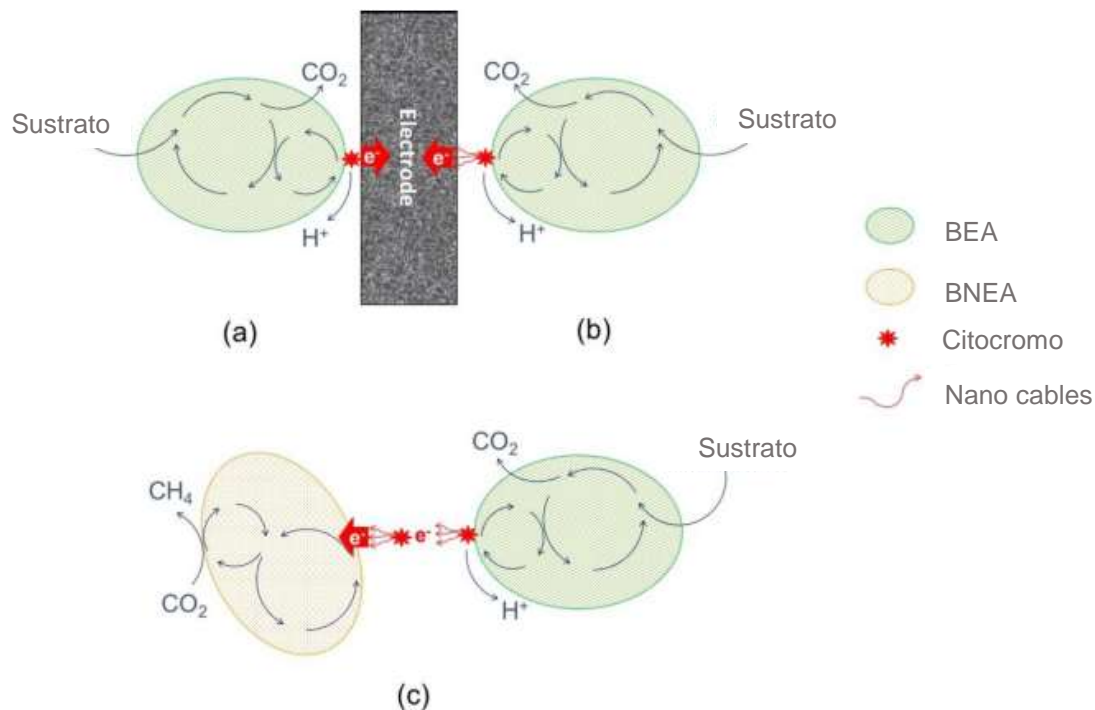


Figura 10. Mecanismos de transferencia de electrones de las BEA

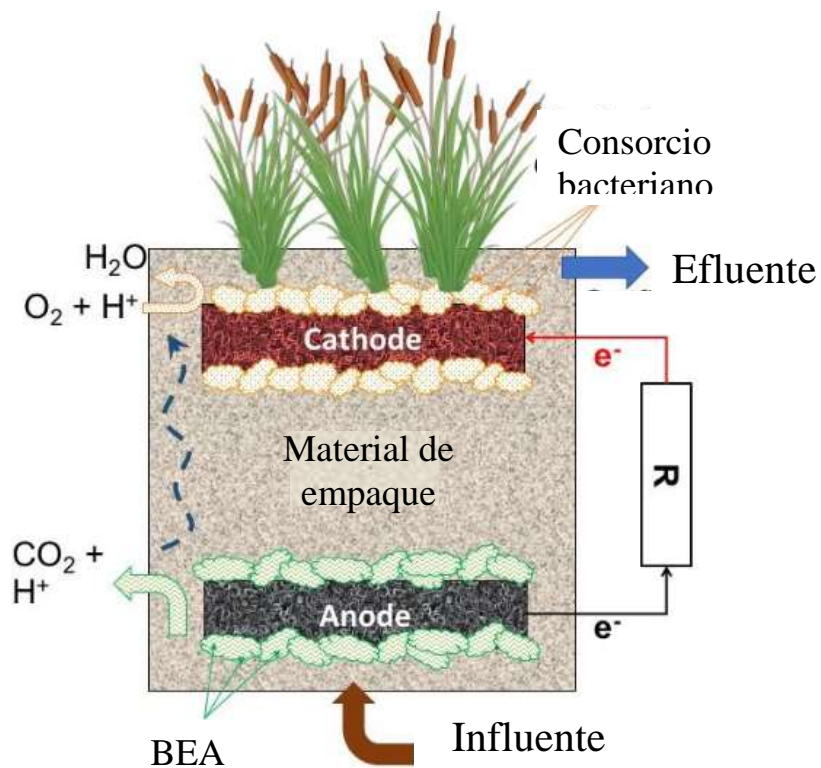


Figura 11. Humedal electroquímico basado en MFC

Tabla 22. Resultados reportados de eficiencia de remoción y producción de electricidad en humedales electroquímicos. Modificada de Srivastava et al. 2020.

Referencia	Carga orgánica inicial (mg/l)	Eficiencia de remoción (%)	Desempeño eléctrico
Yadav et al. (2012)	1500	75	15.73 mW / m ²
Villaseñor et al. (2013)	250	90 - 95	1161 mV
Oon et al. (2016)	314 +/- 9.6 y 624 +/- 16.3	99	20 +/- 7 y 435 +/- 18 mV
Wang et al. (2016)b	823	57.4 +/- 4.6	250 V
Oon et al. (2017)	642 - 650	97 - 99	545.77 +/- 325 mV
Yakar et a. (2018)	103 - 554	92.1	15.1 mW / m ²
Liu et al. (2019)	505	79.65	598 - 713 mV
Srivastava et al. (2020)	1,000 - 3,500	95.4 - 98.9	426 - 674 mV

La segunda configuración que se ha utilizado para el desarrollo e investigación de humedales electroquímicos son los humedales electroquímicos basados en microorganismos electroquímicos (METland), estos humedales tienen como objetivo la aceleración de los procesos de degradación y el aumento en las eficiencias de degradación de materia orgánica, sin poner atención a la producción de electricidad. Estos humedales no requieren la instalación de electrodos (ánodo y cátodo) conectados entre sí para la transferencia de electrones, en su lugar son empacados con materiales conductores de electricidad que actúan como aceptores de electrones que no presentan limitaciones (Figura 12).

Los materiales que se utilizan para el empaque de este tipo de humedales son residuos orgánicos tratados por pirolisis para aumentar sus propiedades conductoras de electricidad. El principal material de empaque que se ha utilizado es el coque (Coke) un derivado de los procesos petroquímicos, así como resinas vegetales.

Las eficiencias de remoción para este tipo de sistemas son entre 78 y 80 % para remoción de materia orgánica, reportada como DQO y entre 82 y 85 % para PT (iMETland, 2020). Aunque pareciera que las eficiencias de remoción son bajas respecto a las reportadas para humedales artificiales horizontales, la principal aportación de estos sistemas es la reducción del área requerida para el tratamiento, ya que mientras los humedales artificiales horizontales requieren de 3 m² por habitante (Ortega et al. 2010), los METland requieren áreas de 0.4 m² por habitante (iMETland, 2020).

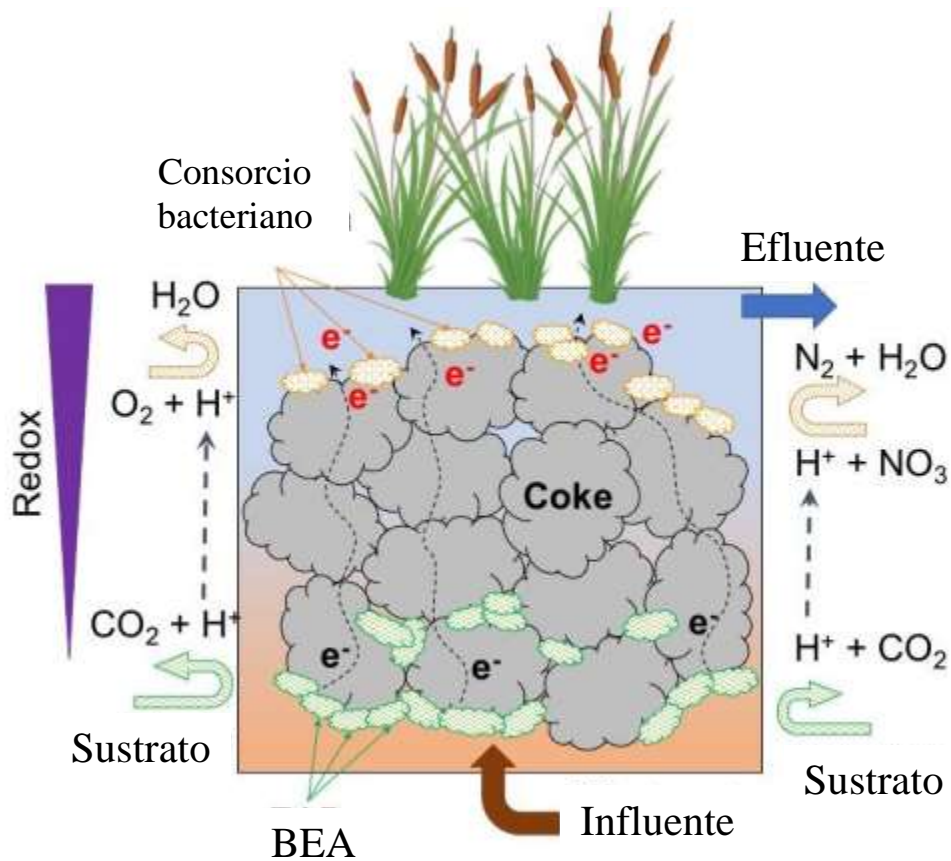


Figura 12. Humedal electroquímico METland

Por lo antes expuesto, se recomienda estudiar el desempeño de los humedales electroquímicos como una opción para la reducción del área requerida para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Estos sistemas podrían ser una opción viable para la depuración de aguas residuales a nivel vivienda, en comunidades rurales y periurbanas, así como en zonas urbanas que presentan limitaciones de espacio para la implementación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

También, se recomienda explorar tecnologías apropiadas que pudieran complementar el proceso de desinfección en el efluente de los humedales artificiales, reduciendo así el área requerida para implementar las tecnologías de tratamiento. Una de las opciones que se recomienda estudiar es la tecnología solar para la desinfección.

IV. Conclusiones y recomendaciones

Se dimensionaron trenes de tratamiento de aguas residuales municipales a nivel vivienda, que incluyen el uso de tecnologías apropiadas, considerando las dotaciones de agua potable recomendadas por la OMS (2006) (50 y 100 l/hab/d) y el número de habitantes promedio por casa que reporta INEGI (2015) para México.

El tren de tratamiento que considera un tanque séptico como pretratamiento y un filtro anaerobio de flujo ascendente seguido de un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial, como tratamiento secundario, resultó poco viable debido a que las dimensiones del filtro anaerobio dificultan su construcción (0.14 m x 0.14 m con altura de 2.8 m para un caudal de 0.2 m³/d y 0.2 m x 0.2 m con altura de 2.8 m para un caudal de 0.4 m³/d). Además, un filtro que presenta esa altura requiere de una excavación profunda o un sistema de bombeo del agua residual, lo que complica su instalación y uso.

El tratamiento que considera un tanque séptico como pretratamiento y un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial como tratamiento secundario, resultó viable para la remoción de materia orgánica (como DBO₅), sólidos suspendidos totales, nutrientes (fósforo y nitrógeno), así como coliformes fecales hasta concentraciones que se encuentran por debajo de la normatividad (DOF, 2018). El sistema requiere de un humedal artificial de 0.6 m x 1.5 m y una altura de 0.6 m para tratar un caudal de 0.2 m³/d y 2.3 m x 1.1 m con altura de 0.6 m para tratar un caudal de 0.4 m³/d.

Con el objetivo de disminuir el área de tratamiento requerida y así, buscar una disminución en los costos de construcción e implementación, se analizó la adición de una laguna de maduración como etapa posterior al HAh. Se determinó el área de construcción requerida si se disminuye el área del HAh en diferentes porcentajes y se sustituye por la LM. Se encontró que para un caudal de tratamiento de 0.2 m³/d se puede obtener una disminución del 6.5 % del área total de construcción si se disminuye el área del HAh 90 % y para un caudal de 0.4 m³/d, disminuye el área total requerida si se sustituye el 10 % del área del HAh por una LM. Estos resultados no solo implican una reducción del área de construcción requerida para el sistema de tratamiento, también se reducen los requerimientos de material de empaque del HAh.

Sin embargo, esta disminución en el área de construcción es menor de 1 m² para cada caso, debido a que los sistemas a nivel vivienda son pequeños, por lo que el beneficio de utilizar la LM podría no ser significativo.

Por último, se recomienda analizar opciones de tratamiento que puedan disminuir significativamente el área requerida en el HAh, estas opciones incluyen el uso de humedales artificiales electroquímicos y sistemas de desinfección solar, ya que la eliminación de coliformes fecales es el proceso que demanda mayor área.



V. Referencias

- Gay C., Om Tubau J. 2000. *Dióxido de cloro y su efecto en la formación de trihalometanos*. Tecnología del Agua. Vol. 20 (201)
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019a. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 4*. CONAGUA, México D.F. 2019.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019b. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 46*. CONAGUA, México D.F. 2019.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019c. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 29*. CONAGUA, México D.F. 2019.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2019d. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 30*. CONAGUA, México D.F. 2019.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 1996. *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996*. Disponible en:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510140&fecha=05/01/2018
Consulta: diciembre 2020.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2001. *Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001*. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf> Consulta: diciembre 2020.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2013. *Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013*. Disponible en: http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa007-2014_01.pdf Consulta: diciembre 2020.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2015. *Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015*. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf> Consulta: diciembre 2020.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2016. *Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016*. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf> Consulta: diciembre 2020.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2018. *Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017*. Disponible en:
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510140&fecha=05/01/2018
Consulta: diciembre 2020.
- HACH COMPANY. 2000. *Manual de análisis de agua*. HACH COMPANY. Loveland, Colorado, EE.UU. 2 edición.



- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2015. *Encuesta Intercensal*. Disponible en: www.inegi.org.mx/temas/vivienda Fecha de consulta: diciembre 2020.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1993. *Aportaciones en alcantarillado, Proyecto UI9302*. Informe final. IMTA. Jiutepec. México. 1993
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua): Córdova M.A., Cruz A., Rivera M.E., Hernández I., Reyes M.A., Lara J., Mireles V.H., Villegas D. 2007a. *Tecnologías apropiadas en materia de agua para comunidades rurales y periurbanas*. Informe Técnico. IMTA. Jiutepec, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua): Cortés F., Treviño A., Tomasini AC. 2007b. *Dimensionamiento de lagunas de estabilización*. Informe Técnico. IMTA. Jiutepec, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). Mijaylova P., Moeller G., Mantilla G. 2012. *Reactor con biomasa inmovilizada (BIOSTAR): alternativa para remoción biológica de nitrógeno*. Informe Técnico. IMTA. Jiutepec, México.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua): Cortés Martínez F., Treviño Cansino A., Tomasini Ortiz AC. 2017. *Dimensionamiento de lagunas de estabilización*. IMTA, Jiutepec, México. ISBN 978-607-9368-57-9.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2019. *Transferencia de técnicas sencillas para manejo del agua en zonas rurales*. Disponible en: <https://www.gob.mx/imta/es/articulos/desarrollo-de-tecnicas-sencillas-para-manejo-del-agua-en-zonas-rurales?idiom=es> Fecha de consulta: diciembre 2020.
- Kadlec R.H., Knight R.L. *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, Boca Ratón. 1996.
- Liu, F., Sun, L., Wan, J., Tang, A., Deng, M., Wu, R., 2019. *Organic matter and ammonia removal by a novel integrated process of constructed wetland and microbial fuel cells*. RSC Adv. 9, 5384-5393.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2006. *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. Volume III. WHO Library. Francia.
- Oon, Y.-L., Ong, S.-A., Ho, L.-N., Wong, Y.-S., Dahalan, F.A., Oon, Y.-S., Lehl, H.K., Thung, W.-E., Nordin, N., 2017. *Role of macrophyte and effect of supplementary aeration in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery*. Bioresour. Technol. 224, 265-275.
- Oon, Y.L., Ong, S.A., Ho, L.N., Wong, Y.S., Dahalan, F.A., Oon, Y.S., Lehl, H.K., Thung, W.E., 2016. *Synergistic effect of up-flow constructed wetland and microbial fuel cell for*

simultaneous wastewater treatment and energy recovery. Bioresour. Technol. 203, 190-197.

- Ortega E., Ferrer Y., Salas J., Aragón C.M., Real A. 2010. *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. ISBN 978-84-491-1071-9.
- Ramírez-Vargas C.A., Prado A., Arias C., Carvalho P., Esteve-Nuñez A., Brix H. 2018. *Microbial Electrochemical Technologies for Wastewater Treatment: Principles and Evolution from Microbial Fuel Cells to Bioelectrochemical-Based Constructed Wetlands*. Water. Vol 10, 1128.
- Segura I.S. 2017. *Cinética de decaimiento de coliformes fecales en un humedal artificial de flujo subsuperficial vertical*. Tesis IMTA. Jiutepec, Morelos, México.
- Srivastava P., Abbassi R., Kumar-Yadav A., Garaniya V., Asadnia M. 2020. *A review on the contribution of electron flow in electroactive wetlands: Electricity generation and enhanced wastewater treatment*. Chemosphere. Vol. 254.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 1999. *Handbook of Constructed Wetlands a Guide to Creating Wetlands For Agricultural Wastewater Domestic Wastewater Coal Mine Drainage Stormwater in the Mid-Atlantic Region Volume 1: General Considerations*. Washington, USA. ISBN 0-16-052999-9.
- Villasenor, J., Capilla, P., Rodrigo, M.A., Canizares, P., Fernandez, F.J., 2013. *Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland-microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates*. Water Res. 47, 6731-6738.
- Von Sperling M., De Lemos C.A. 2005. *Biological wastewater treatment in warm climate región*. IWA Publishing. London Seattle. Volume I.
- Wang, J., Song, X., Wang, Y., Abayneh, B., Li, Y., Yan, D., Bai, J., 2016. *Nitrate removal and bioenergy production in constructed wetland coupled with microbial fuel cell: establishment of electrochemically active bacteria community on anode*. Bioresour. Technol. 221, 358-365.
- Yadav, A.K., Dash, P., Mohanty, A., Abbassi, R., Mishra, B.K., 2012. *Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal*. Ecol. Eng. 47, 126-131.
- Yakar, A., Türe, C., Türker, O.C., Vymazal, J., Saz, Ç., 2018. *Impacts of various filtration media on wastewater treatment and bioelectric production in up-flow constructed wetland combined with microbial fuel cell (UCW-MFC)*. Ecol. Eng. 117, 120-132.