



Coordinación: Tratamiento y Calidad del Agua

Subcoordinación: Tratamiento de Aguas Residuales

Informe proyecto TC2020.1

Diseño y evaluación de una planta tipo paquete de bajo consumo de energía para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias y su reutilización para riego agrícola

Participantes

Edson Baltazar Estrada Arriaga (Jefe de proyecto)

Liliana García Sánchez

Axel Falcón Rojas

Índice

Introducción	4
Objetivos del proyecto	4
1. Marco teórico	5
1.1. Problemática a nivel mundial	5
1.2. Problemática en México	6
1.3. Uso del agua en México	9
1.4. Agua residual doméstica	10
1.5. Tanque séptico	11
1.6. Tanques sépticos en el mercado	14
1.6.1. Biodigestor Autolimpiable Rotoplas	14
1.6.2. Tanque séptico Biobaf	15
1.6.3. Tanque séptico STAR	16
1.6.4. Mexalit–Eureka	16
1.6.5. Sistema séptico Eduardoño	17
1.7. Comparación de las distintas configuraciones de tanques sépticos	17
2. Metodología	19
2.1. Sistema experimental	19
2.2. Diseño de experimentos	19
2.3. Arranque del sistema de tratamiento	19
2.4. Medición de biogás	20
2.5. Determinaciones analíticas	20
3. Resultados	22
3.1. Elaboración del sistema de tratamiento	22



3.2. Arranque del sistema de tratamiento	22
4. Conclusiones	27
Referencias	28



Introducción

En México, es común que las plantas de tratamiento de aguas residuales sufran un deterioro considerable debido a un diseño inapropiado, falta de presupuesto, envejecimiento de la infraestructura y altos costos de operación y mantenimiento, lo que provoca que varias plantas queden fuera de operación. En consecuencia, la aplicación de un enfoque descentralizado de saneamiento en México y en el mundo es una alternativa atractiva y prometedora para la gestión de las aguas residuales, tanto en las zonas urbanas como en las rurales. Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el 2015, 10.2 millones de mexicanos no contaban con un sistema de alcantarillado conectado a una red pública o a una fosa séptica, siendo las poblaciones rurales las más afectadas con la falta de este servicio (25.8% para zonas rurales y 8.6% para zonas urbanas). Por otro lado, el Censo de Población y Vivienda 2010, reportó que sólo el 18.21% de las casas habitación que se encontraban habitadas contaban con tanques sépticos como sistemas de tratamiento para sus aguas residuales.

Los sistemas de fosas sépticas o tanques sépticos, se utilizan en todo el mundo para tratar las aguas residuales domésticas procedentes de viviendas individuales o de pequeños grupos de viviendas en zonas rurales (y algunas periurbanas y urbanas) que no están conectadas a una red de alcantarillado. Diversas investigaciones han demostrado que las fosas sépticas siguen siendo un método rentable de tratamiento de las aguas residuales domésticas en las zonas rurales, pero con grandes variaciones en su rendimiento de un sitio a otro. Sin embargo, estos sistemas de tratamiento solo permiten una parcial o nula remoción de los contaminantes (demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos (SS) de 30 y 60%, respectivamente), por lo que sus efluentes se caracterizan por un alto contenido de nutrientes, microorganismos patógenos y en general, altas concentraciones de materia orgánica; lo cual provoca que las descargas resultantes, que son vertidas en muchos casos al subsuelo, afecten los mantos freáticos. Además, cada vez hay más pruebas de la falta de un control adecuado, coherente, integrado y/o aplicado sobre el diseño, la instalación y la vigilancia de estos sistemas, lo que puede comprometer la calidad del agua, con un mayor riesgo para la salud humana. Ante tal situación y considerando la infraestructura de las fosas sépticas que ya existen en muchas viviendas de las zonas rurales, en el presente proyecto se propone diseñar y evaluar una planta tipo paquete bajo las dimensiones de una fosa séptica que genere un agua residual tratada de alta calidad, la cual pueda ser reutilizada para riego agrícola, disminuyendo así el impacto a la salud humana y a los cuerpos receptores (principalmente acuíferos).

Objetivos del proyecto

Diseñar, construir y evaluar una planta tipo paquete de bajo consumo de energía para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias y su reutilización para riego agrícola



1. Marco teórico

1.1. Problemática a nivel mundial.

La civilización ha contaminado los suministros de agua hasta el punto de tener que purificar el agua. En el pasado, la lluvia era la forma en que la naturaleza proporcionaba agua dulce, caso contrario a la actualidad, debido a los contaminantes existentes en la atmósfera. La escasez de agua pura asequible obliga a aproximadamente 1,200 millones de personas beber agua no potable. Aunque la tierra está compuesta en gran parte de agua, el agua dulce sólo representa el 3% del agua total disponible para nosotros. De ese total, sólo el 0.06% es de fácil acceso. Esto se refleja en el hecho de que más de 80 países tienen actualmente déficit de agua (Ahuja, 2013).

El agua potable proviene en gran parte de ríos, lagos, pozos y manantiales naturales. Estas fuentes están expuestas a una variedad de condiciones de las que pueden contaminarse. El fracaso en las medidas de seguridad relacionadas con la producción, utilización y eliminación de miles de compuestos inorgánicos y orgánicos causa la contaminación de suministros de agua. La inmensa mayoría de los problemas de calidad del agua están causados por fuentes difusas de contaminación de las tierras agrícolas, el desarrollo urbano, la explotación forestal y la atmósfera. Muchos contaminantes del agua provienen de los materiales que utilizamos con frecuencia para mejorar la calidad de vida: combustión de carbón y aceite, detergentes, desinfectantes, farmacéuticos, fertilizantes, gasolina, herbicidas, insecticidas, pesticidas (Ahuja, 2013).

Los recursos hídricos totales del planeta se estiman en 43,000 kilómetros cúbicos por año ($\text{km}^3/\text{año}$), que se distribuyen en todo el mundo de manera desigual por cuestiones climáticas y fisiográficas. A nivel continental, América tiene los recursos de agua dulce más abundantes del mundo (45%), seguida de Asia (28%), Europa (15.5%) y África (9%). Una vez que los recursos hídricos disponibles de un país caen por debajo de los $1,700 \text{ m}^3$ por persona y año, se puede esperar que el país experimente un estrés hídrico regular (Eslamian, 2016).

La cantidad de agua disponible está ligada a la calidad de la misma, ya que ambos son determinantes clave del suministro. La mala calidad, puede afectar a la cantidad de este recurso, por ejemplo, el agua contaminada que no puede utilizarse para beber, bañarse, tener uso industrial o agricultura, reduce en gran medida la cantidad de agua disponible en una zona determinada. Cuando el agua está contaminada, se requieren algunos costos adicionales para tratar el agua, y de esta manera, cumplir con los estándares de calidad de descarga y reutilización. Las principales zonas donde se ha observado un deterioro de la calidad del agua es en África, Asia y América Latina (Eslamian, 2016).

En el 2016, más de 2,600 millones de personas (42% de la población total) carecen de acceso a instalaciones básicas de saneamiento y están expuestas a fuentes de agua contaminada, que contienen altas concentraciones de compuestos químicos y patógenos. Estas sustancias transmitidas por el agua pueden provocar una gran variedad de afecciones a la salud (por ejemplo, diarrea, tifus, paludismo y otros). Se informa de que 2.2 millones de muertes al año, causadas por enfermedades relacionadas con el saneamiento, malas condiciones de higiene y agua contaminada (Eslamian, 2016).



En general, desde aproximadamente el año 1900 hasta principios de la década de 1970, los objetivos del tratamiento se centraban en la eliminación de material suspendido y flotante, el tratamiento de productos orgánicos biodegradables y la eliminación de organismos patógenos. Desde 1980, los objetivos de mejora de la calidad del agua se han enfocado en la eliminación de los componentes que pueden causar efectos a largo plazo sobre la salud e impactos ambientales (Tchobanoglous et al., 2014).

La Organización de las Naciones Unidas ha mostrado preocupación en este tema, por ello, ha desarrollado la Agenda 2030 donde plasma los objetivos para un desarrollo sustentable. Este documento se encuentra dividido en 17 apartados, de los cuales, uno de los objetivos es el garantizar la disponibilidad de agua con buena calidad para todos. En esta sección se estima, para el 2050, al menos una de cada cuatro personas probablemente viva en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce. A continuación se presentan las metas de este objetivo para el 2030 (ONU, 2016).

- Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.
- Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
- Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
- Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.
- Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.
- Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.
 - a. Ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua, desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización
 - b. Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento

1.2. Problemática en México

Un medidor muy importante es el grado de presión sobre los recursos hídricos (GPRH), este mide el porcentaje del agua renovable disponible que es destinada a los usos consuntivos (SEMARNAT, 2014). Por agua renovable se refiere a la cantidad máxima de agua que es factible explotar anualmente en un país sin alterar el ecosistema. Equivale a la que es renovada por la lluvia, la cual es 447,260 millones de m³ (CONAGUA, 2015). Respecto a los usos consuntivos se les denomina a los que cambian las propiedades del agua y no consuntivos lo contrario, como es el caso de la hidroeléctrica (SEMARNAT, 2014).

Para clasificar el grado de presión, la Comisión para el Desarrollo Sustentable (CDS) de la ONU define cuatro categorías, que van de “escasa” (donde el agua extraída no rebasa el 10% del líquido renovable disponible) a “fuerte” (cuando la extracción es mayor al 40% de la disponibilidad natural). En México, en 2012 el valor estimado de GPRH fue de 17.5%, lo que lo ubicaba en la categoría de presión moderada por arriba del promedio estimado para los países de la OCDE con un 11.5%. A nivel mundial, México ocupa el lugar 53 de los países con mayores grados de presión de un total de 180 países (Figura 1.1) (SEMARNAT, 2014).

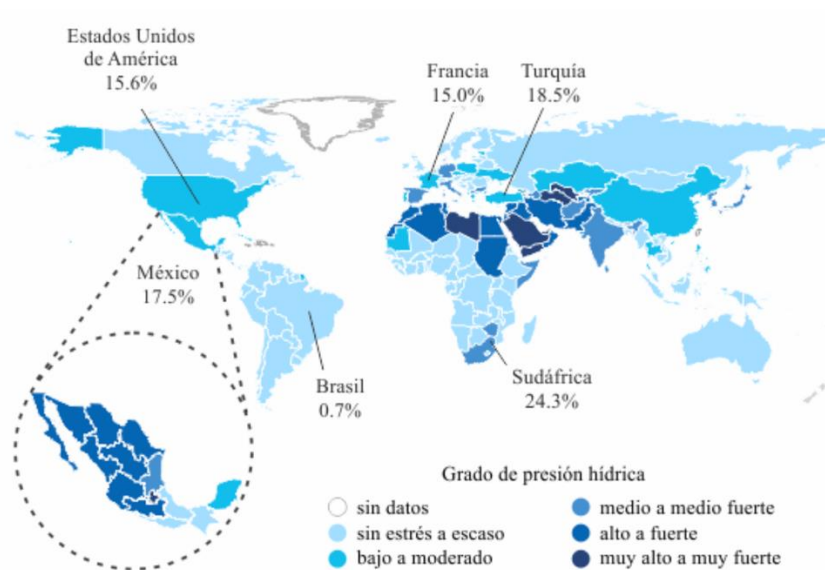
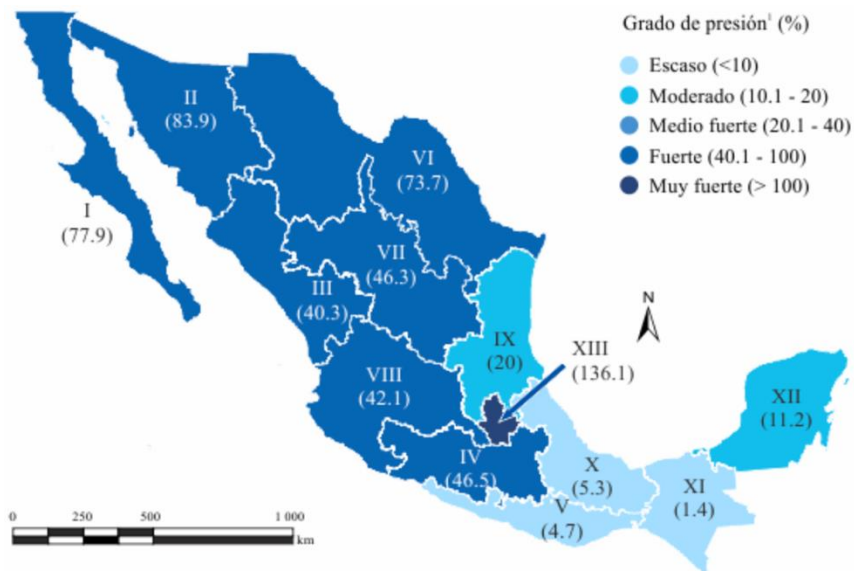


Figura 1.1. GPRH en el mundo

El GPRH nacional está influido por la alta disponibilidad de agua en el sur del país, en donde se extrae menos del 8% del agua disponible. En contraste, las regiones Península de Baja California, Noroeste, Pacífico Norte, Río Bravo, Cuencas Centrales del Norte, Balsas y Lerma-Santiago-Pacífico, registraron grados de presión superiores al 40% en 2012 (Figura 1.2). Caso extremo es la región Aguas del Valle de México, que alcanzó una presión sobre el recurso de 136.1% en ese mismo año (SEMARNAT, 2014).



Región hidrológico-administrativa:

I Península de Baja California; II Noroeste; III Pacífico Norte; IV Balsas; V Pacífico Sur; VI Río Bravo; VII Cuencas Centrales del Norte; VIII Lerma-Santiago-Pacífico; IX Golfo Norte; X Golfo Centro; XI Frontera Sur; XII Península de Yucatán; XIII Aguas del Valle de México.

Nota:

¹ La cifras entre paréntesis corresponden al grado de presión sobre los recursos hídricos.

Figura 1.2. GPRH por región en México

Referente a la calidad del agua en México, esta se vigila mediante la red de monitoreo, con tres parámetros principales: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DQO y DBO₅ resultan del vertido de aguas residuales municipales e industriales. Los SST se originan por descargas de aguas residuales o por erosión hídrica. Al 2014, con calidad aceptable se encuentran: 55% de los 2,635 sitios monitoreados en DQO; 92% de los 2,636 sitios monitoreados en DBO₅ y 93% de los 3,607 sitios monitoreados en SST (CONAGUA, 2015).

Debido a lo anteriormente descrito es imperante el tratamiento de las aguas residuales y de esta manera impulsar el reúso. Actualmente existe un incremento en la demanda de bienes y servicios públicos de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas residuales municipales que garanticen la sustentabilidad de las ciudades y el desarrollo de sus habitantes. En la Tabla 1.1 se expresa cómo ha incrementado el tratamiento de agua residual tratada en los años 2006 a 2014 (CONAGUA, 2016).

Tabla 1.1. Evolución del tratamiento de aguas residuales municipales 2006-2014

Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Agua residual tratada (m³/s)	74.4	79.3	83.6	88.1	93.6	97.6	99.8	105.9	111.3
Incremento de caudal (m³/s)	2.6	4.9	4.3	4.5	5.5	4.0	2.1	6.1	5.4
Agua residual colectada (m³/s)	206.0	207.0	208.0	209.1	209.1	210.1	210.2	211.0	211.0
Cobertura de tratamiento (%)	36.1	38.3	40.2	42.1	44.8	46.5	47.5	50.2	52.7
Incremento de cobertura (%)	1.1	2.2	1.9	1.9	2.7	1.7	1.0	2.7	2.5

Según CONAGUA, en el 2018, el 65.24% de las aguas residuales municipales que son captadas, reciben un tratamiento.

En el caso de México, es común que las plantas de tratamiento de aguas residuales sufran un deterioro considerable debido a un diseño inapropiado, falta de presupuesto, envejecimiento de la infraestructura y mantenimiento deficiente, lo que provoca que el 30% de ellas estén completamente discapacitadas. En consecuencia, la aplicación de un enfoque descentralizado de saneamiento en México es una alternativa atractiva y prometedora para la gestión de las aguas residuales, tanto en las zonas urbanas como en las rurales (Santiago-Díaz, et al., 2018).

Las casas deben de estar conectadas a un sistema de alcantarillado a red pública o fosa séptica. Según la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), en el 2015, 10.2 millones de mexicanos no contaban este sistema, siendo las poblaciones rurales las más afectadas, ya que el 22.5 % de esta población no cuenta con el servicio (CONAGUA, 2018).

1.3. Uso de agua en México

En México, respecto al uso que se le da al agua se divide principalmente en lo siguiente (CONAGUA, 2015):

- *Uso agropecuario:* De cada 100 litros de agua empleados en México, 77 son empleados en este sector, 50 provienen de aguas superficiales y 27 de aguas subterráneas.
- *Uso abastecimiento público:* En México la provisión del servicio de agua potable está a cargo de los municipios. De cada 100 litros de agua empleados en México, 14 son empleados en abastecimiento público, 9 provienen de aguas superficiales y 5 provienen de aguas subterráneas. Del 2005 al 2014 se incrementó el volumen para abastecimiento del 12.6%. A nivel mundial, se consume en promedio 1,358 m³/persona/año y en México, 1,978 m³/persona/año.

- *Uso industrial:* De cada 100 litros de agua empleados en México, 4 son empleados en esta rama, 2 de estos provienen de aguas superficiales y 2 de aguas subterráneas. Se incrementó el 24.7% del volumen para la industria de 2005 a 2014.
- *Uso eléctrica:* De cada 100 litros de agua, 5 son usados en energía eléctrica, de los cuales 1 proviene de aguas superficiales y 4 de aguas subterráneas. La generación por hidroelectricidad no consume o modifica las propiedades del agua, por lo que se contabiliza aparte.

1.4. Agua residual doméstica

El agua residual doméstica se puede caracterizar en dos principales tipos (Boutin y Eme, 2017):

- Agua negra: en este tipo de agua residual se encuentra la orina, las heces, el papel higiénico y el agua de descarga, así también, el agua de limpieza de los inodoros.
- Agua gris: este tipo incluye varias fuentes de emisión. Las características del efluente están vinculadas al fregadero, lavavajillas, lavadora, lavabo del baño, ducha y bañera.

Una persona, diariamente produce 119 litros de agua residual doméstica, de los cuales, 36 litros son de agua negra y 83 litros de agua gris; respecto a la división de estos últimos, el 47% son procedentes a actividades relacionadas con los alimentos, actividades de limpieza y lavandería, el 53% restante es el gasto de agua relacionado a limpieza personal (Boutin y Eme, 2017).

En la Figura 1.3 se muestra la composición de las aguas residuales domiciliarias y en la Tabla 1.2 el volumen producido por persona por día y valores de los parámetros que ayudan a determinar la calidad del agua.

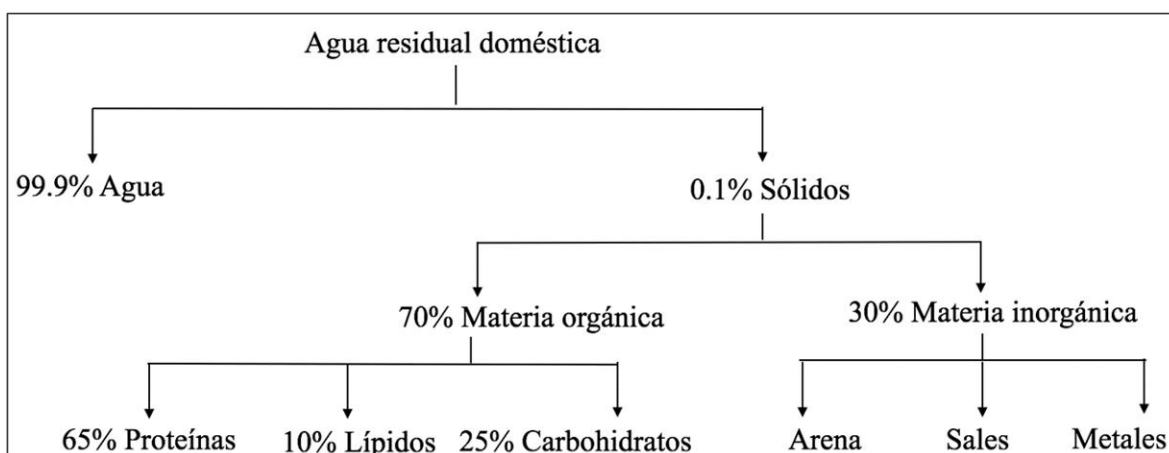


Figura 1.3. Composición de agua residual doméstica (Mara, 2003).

Tabla 1.2. Volumen y parámetros de calidad del agua residual doméstica

Variable		Agua negra			Agua gris		Suma de contribuciones
		Orina hidrolizada	Heces	Papel de baño	Higiene personal	Limpieza y alimentos	
Volumen (L/per*d)	Con descarga	-	36	-	39	44	119
	Sin descarga	1.3	0.1	0			84
Parámetros (g/per*d)	SS	1	28	23	3	15	67
	DBO ₅	5	23	12	5	21	65
	DQO	9	37	27	8	52	133
	NT	7.7	1.6	0	0.3	0.8	10.4
	PT	0.6	0.8	0	0	1.2	2.6

1.5. Tanque séptico

Como se mencionó con anterioridad, un porcentaje considerable de la población cuenta con tanque séptico para el tratamiento del agua residual doméstica, a consecuencia de no contar con un sistema de drenaje y alcantarillado. Los diversos tipos de tratamiento descentralizado de aguas residuales, si se ejecutan adecuadamente, pueden proteger la salud pública, preservar los valiosos recursos hídricos y mantener la vitalidad económica de una comunidad. Son una opción rentable y a largo plazo para el tratamiento de aguas residuales, particularmente en áreas menos densamente pobladas (EPA, 2018).

Los porcentajes de remoción de DBO y SS que suelen obtenerse con los tanques sépticos de un compartimento son de 30 y 60 % respectivamente. Por ello, es importante mencionar que su efluente se caracteriza por un alto contenido de nutrientes, gérmenes entéricos y, en general, materia orgánica. Por lo anterior, es necesario someterlo a un proceso complementario antes de su disposición final (el conjunto de tanque séptico más el proceso adicional se nombra sistema séptico). Las aguas residuales sin ningún tratamiento taponarían rápidamente cualquier tipo de suelo, pero el tanque séptico acondiciona estas aguas para que se puedan infiltrar con mayor facilidad en el subsuelo y, cuando sea el caso, como pretratamiento para arreglos formados por varios sistemas (CONAGUA, 2016).

Los STS comprenden típicamente por un tanque séptico y un campo de filtrado. En el primero, los sólidos se asientan y se someten a la digestión anaerobia, donde el procesamiento abiótico y biótico purifica el agua. Este efluente tratado se dispersa naturalmente en las aguas subterráneas. En algunos STS con eliminación avanzada de nutrientes, se puede permitir que el efluente se descargue directamente en el agua superficial más cercana. Mientras que el tanque reduce la carga de sólidos orgánicos, es la lenta percolación del efluente del tanque a través del suelo del campo de drenaje lo que atenúa la mayoría de los nutrientes, microcontaminantes y patógenos presentes en las aguas residuales domésticas (Withers et al., 2013).

Los sistemas de fosas sépticas suelen estar enterrados bajo tierra y, por lo tanto, ocultos a la vista y se supone que funcionan eficazmente. Cuando los STS se planifican, diseñan, instalan, operan y mantienen adecuadamente, las tasas de atenuación de contaminantes son realmente muy altas, del 70% al 90% de los contaminantes se eliminan. Se ha documentado que en un STS doméstico disminuye casi el 100% de la carga P, la atenuación del nitrógeno (N) es naturalmente más variable, entre 20-80%. (Withers et al., 2013).

Las investigaciones han demostrado que el STS sigue siendo un método rentable de tratamiento de las aguas residuales domésticas en las zonas rurales, pero con grandes variaciones en su rendimiento de un sitio a otro. Cada vez hay más pruebas de la falta de un control adecuado, coherente, integrado y/o aplicado sobre el diseño, la instalación y la vigilancia de estos sistemas, lo que puede comprometer la calidad del agua, con un mayor riesgo para la salud humana (Withers et al., 2013).

A continuación se presenta la manera en la que un sistema séptico convencional opera:

1. Toda el agua sale de su casa desde una tubería de drenaje principal a una fosa séptica (Figura 1.4)

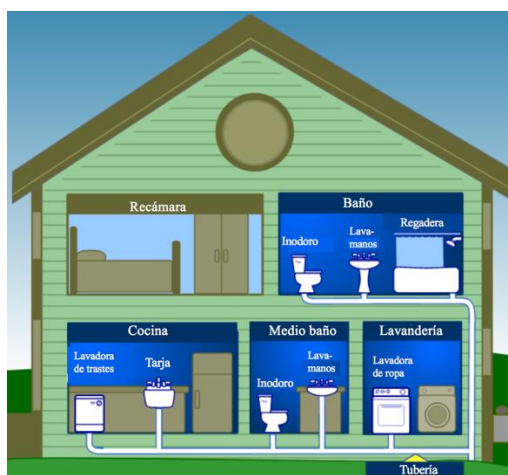


Figura 1.4. Diagrama de las fuentes de agua residual en una casa habitación

2. Como se mencionó anteriormente, en el tanque séptico, se retienen las aguas residuales el tiempo suficiente para permitir que los sólidos se asienten en el fondo, mientras que el aceite y la grasa flotan hacia la parte superior (Figura 1.5). Los compartimentos y una salida en forma de T evitan que el lodo y la nata salgan del tanque y se desplacen hacia el área del campo de drenaje. Este tanque es un contenedor enterrado y hermético hecho generalmente de concreto, fibra de vidrio o polietileno.

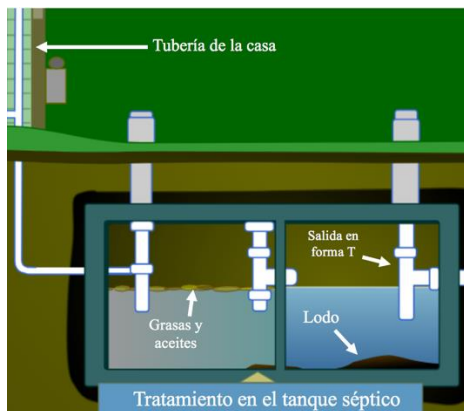


Figura 1.5. Diagrama de tanque séptico de una casa habitación

3. El agua residual líquida (efluente) sale del tanque hacia el campo de filtrado, este está hecho a base de grava y piedra. Las aguas residuales pretratadas se vierten a través de tuberías sobre superficies porosas que permiten que las aguas residuales se filtren a través del campo, al filtrarse, se eliminan naturalmente las bacterias coliformes, virus y nutrientes. descargando finalmente al agua subterránea (Figura 1.6).



Figura 1.6. Campo de drenaje de un sistema séptico

Los sólidos retenidos en el tanque séptico permanecen en el interior del sistema durante un periodo de tiempo que va de dos a tres años, dependiendo de la capacidad del pozo, para que se establezca la digestión anaerobia. El íntimo contacto del agua residual con la espuma y el lodo, en conjunto con la agitación de este último por el gas que asciende, tienden a hacer que el efluente del tanque tenga un alto contenido de nutrientes, gérmenes entéricos y, en general, materia orgánica finamente dividida y maloliente (CONAGUA, 2016).

Un tanque séptico de un solo compartimento, las burbujas de gas producidas arrastran partículas de materia orgánica en descomposición, inoculando de esta manera el líquido residual entrante con organismos necesarios para la putrefacción. Sin embargo, este mismo burbujeo a través del líquido obstaculiza, en cierto grado, la sedimentación normal de los residuos sólidos. Esta dificultad puede aminorarse agregando un segundo compartimento, en el que las materias más ligeras en suspensión que han pasado por el primero, encuentren condiciones más favorables para la sedimentación. Esto es particularmente útil cuando la descomposición anaerobia es rápida, y la cantidad de sólidos ya sedimentados en el primer compartimento es muy grande. La masa de lodos del depósito suplementario suele ser más homogénea, y tener un mayor grado de floculación que la del primero; se observa también una menor producción de espuma. El efluente de un tanque de este tipo, contendrá menor proporción de

materias en suspensión que el procedente del sistema de compartimento único, a la vez que se permite mayor espaciamento entre dos limpiezas consecutivas (Figura 1.7) (CONAGUA, 2016).

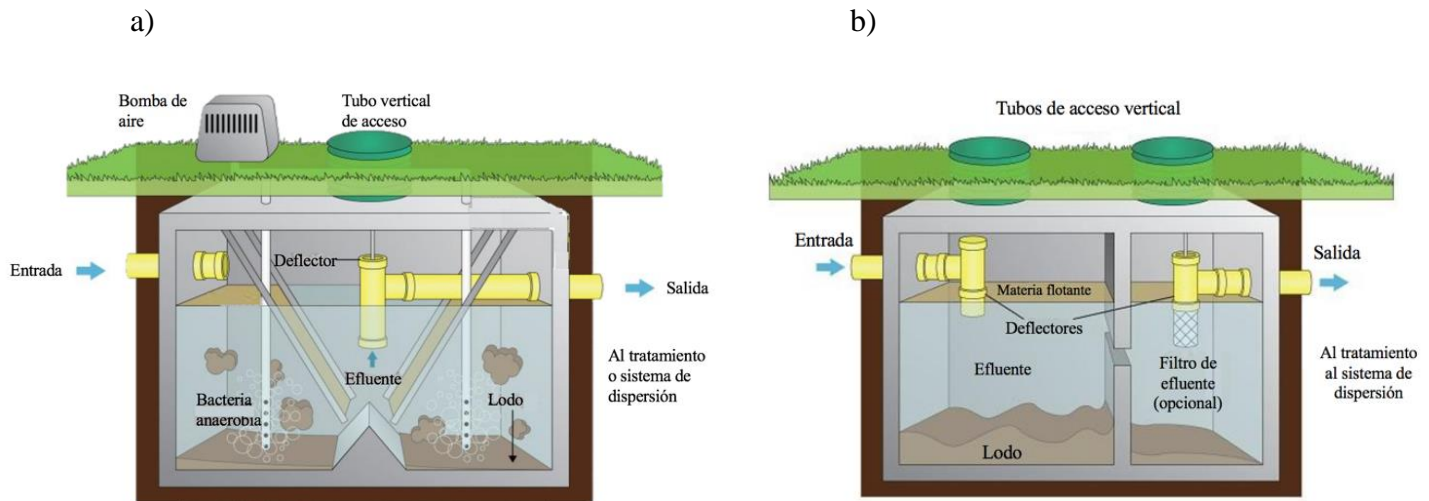


Figura 1.7. Diseños de tanque séptico. a) una cámara, b) dos cámaras.

El uso de un tercer compartimento permite separar las aguas grises de las residuales: en el primer depósito se recibe exclusivamente el agua que proviene del inodoro, ahí se sedimenta y pasa a la segunda etapa, en la cual se consigue que continúe la remoción de sólidos. El agua sigue fluyendo hasta el tercer compartimento, en el que también se reciben las aguas grises. La ventaja de esta estrategia es que el efluente final del tanque séptico contiene una cantidad menor de organismos patógenos, además de una proporción menor de sólidos (CONAGUA, 2016).

1.6. Tanques sépticos en el mercado

1.6.1. Biodigestor Autolimpiable Rotoplas

Para tratamiento de aguas residuales domiciliarias, Rotoplas maneja un biodigestor el cual cuenta con un sistema patentado de autolimpieza para purga de lodo, sin necesidad de usar equipo especial. Utiliza un proceso anaerobio (separa los líquidos de las grasas) para realizar un tratamiento primario del agua, no requiere de electricidad para su funcionamiento o algún producto químico para tratar el agua. Fabricado con HDPE 100% virgen de una sola pieza (polietileno de alta densidad). El Biodigestor Autolimpiable cumple con la NOM-006-CONAGUA-1997 “Fosas sépticas prefabricadas – especificaciones y métodos de prueba” (Rotoplas, 2018).

Respecto a su funcionamiento, la Figura 1.8 muestra el diseño del biodigestor, en el se encuentran números relacionados al siguiente proceso (Rotoplas, 2018):

1. Entrada de agua residual.
2. Separación de lodos y agua (primera etapa).
3. Digestión anaerobia y paso a través de cama de lodos (segunda etapa).
4. Filtro anaerobio (tercera etapa).
5. Salida de agua tratada a pozo de absorción, zanja de infiltración o campo de oxidación.

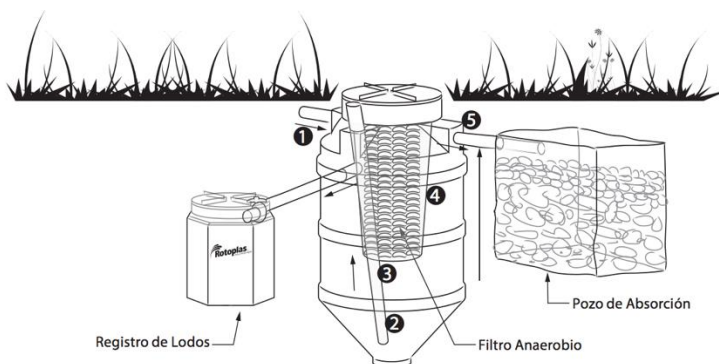


Figura 1.8. Diseño del biodigestor Rotoplas

Respecto a la remoción de lodos, es expulsada de forma sencilla mediante la válvula del tubo de extracción sin necesidad de bombas, como se muestra en la Figura 1.9.



Figura 1.9. Modo de expulsión de sólidos en el biodigestor Rotoplas

1.6.2. Tanque séptico Biobaf

Es un sistema séptico para tratamiento de aguas residuales domésticas fabricado por la empresa Synertech, en poliéster reforzado en fibra de vidrio, que a diferencia de otros tanques sépticos, el equipo BAF, se encuentra dividido en tres compartimientos que proceden de un pretratamiento el cual separa sólidos flotantes, grasas y aceites. En la primera cámara se encuentra un filtro anaerobio con biomasa adherida donde ocurre degradación de la materia orgánica; posteriormente, en el segundo compartimento existe un proceso de digestión aerobia por lecho móvil y por último, en el tercer compartimento es una cámara de clarificación, dando como resultado efluentes apto para infiltración o reúso (Figura 1.10) (Synertech, 2017).



Figura 1.10. Diseño tanque séptico Biobaf

1.6.3. Tanque séptico STAR

Es un sistema de dos fases originalmente desarrollado por FIBROMUEBLES para tratamiento de aguas residuales domésticas. Diseñado para mejorar la calidad del agua tratada al pasar primero por la etapa de sedimentación-biodigestión y luego por filtración ascendente anaerobia. Presente en una sola pieza ahorrando espacio y tiempo en su instalación (Figura 1.11) (Fibromuebles, 2017).

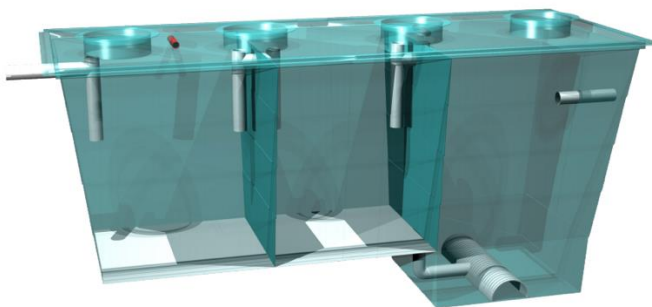


Figura 1.11. Diseño tanque séptico STAR

1.6.4. Mexalit–Eureka

Es un tanque fabricado por la empresa Aspyma, el material con el que está construido es de polietileno. Cuenta con un exclusivo filtro Polyplas, en el cual ocurre una digestión anaerobia de las aguas residuales doméstica que recibe. Separa la materia orgánica contenida en el agua y cuenta con un proceso que separa las aguas de servicio que contienen detergentes y grasas (cocina y lavadero) de las aguas de los sanitarios (Figura 1.12) (Aspyma, 2014).



Figura 1.12. Tanque séptico Mexalit–Eureka

1.6.5. Sistema séptico Eduardoño

Tanque fabricado en poliéster reforzado en fibra de vidrio, incluye un sistema complementario con filtro anaerobio de flujo ascendente para aumentar la remoción de materia orgánica frente a un séptico convencional. Primero ingresa el agua residual al tanque, sedimentándose los lodos y separándose las grasas y aceites en la superficie; posteriormente, el agua pasa a una segunda cámara, la cual contiene un filtro anaerobio de flujo ascendente, este material filtrante es exclusivo de Eduardoño (Figura 1.13) (Eduardoño, 2017).

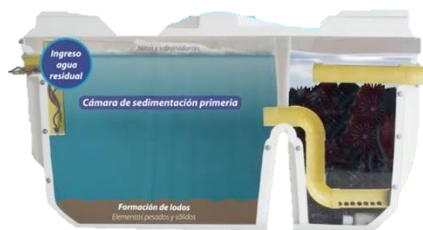


Figura 1.13. Diseño del tanque séptico Eduardoño

1.7. Comparación de las distintas configuraciones de tanques sépticos

En la Tabla 1.3 se realizó una comparación de los porcentajes de remoción y la concentración de coliformes del efluente de las distintas configuraciones del tanque, anotando en la última columna quienes realizaron la investigación.

Tabla 1.3. Porcentajes de remoción de distintos tipos de tanque y la concentración de coliformes del efluente.

Tipo de tanque	SST (%)	DBO (%)	DQO (%)	Coliformes (NMP/100 ml)	Referencia
Tanque 4 cámaras, biomasa adherida	95.92 ±3.46	98.17±0.94	92.46±4.5	1.3×10 ⁴ ± 1.2×10 ³	Abbassi et al. (2018)
Tanque 4 cámaras, biomasa suspendida	90.06±7.87	96.78±1.80	88.37 ± 7.2	2.6×10 ⁵ ± 1.3×10 ⁵	Abbassi et al. (2018)
Tanque una cámara	65.3	68.4	65.3	5.6 × 10 ⁷	Nasr y Mikhaeil (2014)
Tanque dos cámaras	73.0	74.4	72.3	5.6 × 10 ⁷	Nasr y Mikhaeil (2014)
Tanque tres cámaras	76.0	76.5	74.0	5.6 × 10 ⁷	Nasr y Mikhaeil (2014)
Tanque tres cámaras con filtro anaerobio	78.0	79.0	77.0	5.6 × 10 ⁷	Nasr y Mikhaeil (2014)
Tanque una cámara con filtro anaerobio	78 ±5	56 ±11	54 ± 9	6.1×10 ⁶ ± 2.2 x10 ⁶	Kumari-Sharma y Ahmad-Kazmi (2015)

Como se muestra en la Tabla 1.3, el tanque que presentó mayor remoción de contaminantes fue el tanque con 4 cámaras cuya biomasa está adherida al empaque realizada por Abbassi y sus colaboradores en el 2018.

2. Metodología

2.1. Sistema experimental

Se diseñó y dimensionó una planta tipo paquete a escala laboratorio como unidad experimental. El material a emplear fue de acrílico y con un volumen útil de 50 L. Para la determinación de las dimensiones de este, se calculó primero el volumen de un tanque necesario para tratar agua residual de una casa-habitación para 5 personas, con un TRH de 1.5 días.

La planta tipo paquete que se diseñó y construyó fueron de varias cámaras cada una de ellas con distinto volumen y TRH. La planta de tratamiento desarrollada está conformada por cuatro módulos de tratamiento. El primer módulo es un reactor anaerobio electroquímico que contiene un nuevo arreglo de electrodo desarrollado por nosotros el cual está conformado por fieltro de carbón y una membrana de intercambio catiónico al cual se le aplica un voltaje de 0.7 V. El segundo módulo es un filtro anaerobio, el cual contiene un módulo de filtrado innovador desarrollado por nosotros que contiene en su interior cubos de poliuretano colocados estratégicamente para un desarrollo de la biopelícula. El tercer módulo es un reactor aerobio de lecho móvil que contiene soportes móviles de nylon. Los soportes desarrollados, es un diseño innovador que contienen un área superficial grande que permite un buen desarrollo de microorganismos sobre estos. La cuarta cámara es una cámara de sedimentación.

2.2. Diseño de experimentos

En cuanto al diseño de experimentos, se evaluarían dos distintos TRH (0.75 y 1.5 días) y tres diferentes voltajes (0.3, 0.5 y 0.8), dando como resultado un diseño factorial 2 x 3 (Tabla 2.1). Sin embargo debido a la contingencia solo se pudo lograr el arranque del sistema de tratamiento. Las variables de respuesta para la evaluación del sistema fueron: DQO, DBO₅, nitrógeno total, amoníaco, nitratos, nitritos, fósforo total y ortofosfatos. Las muestras de agua residual fueron tomadas en el influente y efluente de cada módulo de tratamiento.

Tabla 2.1. Diseño de experimentos

Parámetros y niveles		Voltaje (V)		
		0.3	0.5	0.8
TRH (días)	0.75	a1b1	a1b2	a1b3
	1.5	a2b1	a2b2	a2b3

2.3. Arranque del sistema de tratamiento

Como primera fase experimental, el sistema de tratamiento fue operado en condiciones discontinuas con el objetivo de llevar la formación de las biopelículas en los diferentes módulos de tratamiento.

Para la inoculación de los reactores se utilizaron lodos activados obtenidos de la planta de tratamiento del IMTA. Para la inoculación del primer módulo, se introdujo agua residual cruda y tres días después

se introdujo el inóculo. Para enriquecer la alimentación de las bacterias exoelectrogénicas, del género *Geobacteraceae*, se añadieron ácido acético (1.4 g/L; en NaHCO₃, 5 g/L) y fumarato (8 g/L). Para la inoculación del reactor de filtro anaerobio se introdujo el 12.5% del volumen de lodos activados respecto al volumen total del filtro anaerobio. Este inóculo contenía de una concentración de sólidos volátiles de 28 g/L. Por último, para la inoculación del reactor de lecho móvil, este se inoculó con el 21.4% del volumen total del reactor. El sistema de tratamiento fue alimentado con agua residual obtenida de la Unidad Habitacional el “Texcal” ubicada en Jiutepec Morelos

2.4. Medición de biogás

El volumen del biogás generado en el reactor electroquímico se realizó por el método de desplazamiento volumétrico y su composición se determinó por cromatografía de gases (porcentaje de metano, hidrógeno y dióxido de carbono) en un cromatógrafo de gases modelo SRI 8610C acoplado a un detector de conductividad térmica, utilizando el detector HID y TCD. Se utilizó una columna empacada Micropacked Colum 2m 1mm/16” OD SILCO (RESTEK) para la determinación de la composición del biogás. El cromatógrafo de gases se mantuvo en condiciones isotérmicas y adiabáticas. La temperatura inicial del horno fue de 100 °C manteniéndose durante 8 min. En la Tabla 2.2 se muestran las condiciones del cromatógrafo de gases.

Tabla 2. 2 Condiciones en el cromatógrafo de gases

Controles electrónicos de presión de gas		Parámetros de detección		Horno inyector-detector-columna de temperaturas	
Fase gaseosa	30 PSI	Encendido de la llama	-753	Válvula	40 °C
Hid makeup	40 PSI			Inyector	100 °C
Hidrógeno	20 PSI			Detector 1	100 °C
Aire	5 PSI			Detector 2	100 °C
				Celda TCD	100 °C
				Horno de columna	100

2.5. Determinaciones analíticas

Para la determinación de la DQO, se usó el método establecido por la Norma Mexicana para la Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas (NMX-AA-030/2-SCFI-2011). Esta norma especifica un método para la DQO-TS usando el método de tubo sellado. El método es aplicable a muestras sin diluir con un valor de DQO-TS hasta 1 000 mg/L. Las muestras se oxidan mediante digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio en presencia de sulfato de plata y sulfato de mercurio (II).

Para la detección de DBO₅, se utilizó el método establecido por la Norma Mexicana para la Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en Aguas Naturales, Residuales (DBO₅) y residuales tratadas (NMX-AA-028-SCFI-2001). El método se basa en medir la cantidad de oxígeno que



requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C.

El nitrógeno total se determinó por el método de Hach. Este método se basa en una digestión alcalina de persulfato convierte todas las formas de nitrógeno en nitrato. El metabisulfito de sodio se añade después de la digestión para eliminar las interferencias del óxido halógeno. El nitrato reacciona entonces con el ácido cromatotrópico en condiciones fuertemente ácidas para formar un complejo amarillo. La longitud de onda de medición es de 410 nm para los espectrofotómetros o de 420 nm para los colorímetros. Los límites de detección son de L N (HR).

El nitrógeno amoniacal se realizó por el método de Nessler. Los compuestos de amoníaco se combinan con el cloro para formar monocloramina. La monocloramina reacciona con el salicilato para formar 5-aminosalicilato. El 5-aminosalicilato se oxida en presencia de un catalizador nitroprusiato de sodio para formar un compuesto de color azul. El color azul es enmascarado por el color amarillo del exceso de reactivo presente para dar una solución de color verde. La longitud de onda de medición es de 655 nm para los espectrofotómetros o 610 nm para los colorímetros (Hach, 2015).

Para la determinación de los SST se realizó usando un método gravimétrico dictado por la Norma Mexicana para el Análisis de agua – Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (NMX-AA-034-SCFI-2015). Los SST, están constituidos por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1.5 μm secado y llevado a masa constante a una temperatura de 105 °C \pm 2 °C.



3. Resultados

3.1. Elaboración del sistema de tratamiento

Debido a la contingencia solo fue posible diseñar, construir y evaluar parcialmente el sistema de tratamiento desarrollado.

En la Figura 3.1 se muestra la construcción del sistema desarrollado el cual fue elaborado de materia de acrílico. Una vez que fue construido el sistema de tratamiento se armaron y colocaron todos los componentes y accesorios que conforman el sistema experimental.



Figura 3.1. Elaboración del sistema de tratamiento con material de acrílico

3.2. Arranque del sistema de tratamiento

Después de que el sistema de tratamiento fue armando en su totalidad se realizaron pruebas hidráulicas con el objeto de observar fugas de agua. Una vez reparadas las fugas detectadas se procedió con el

arranque del sistema lo cual consistió en alimentar con agua residual y procedimiento de inoculación (Figura 3.2.)

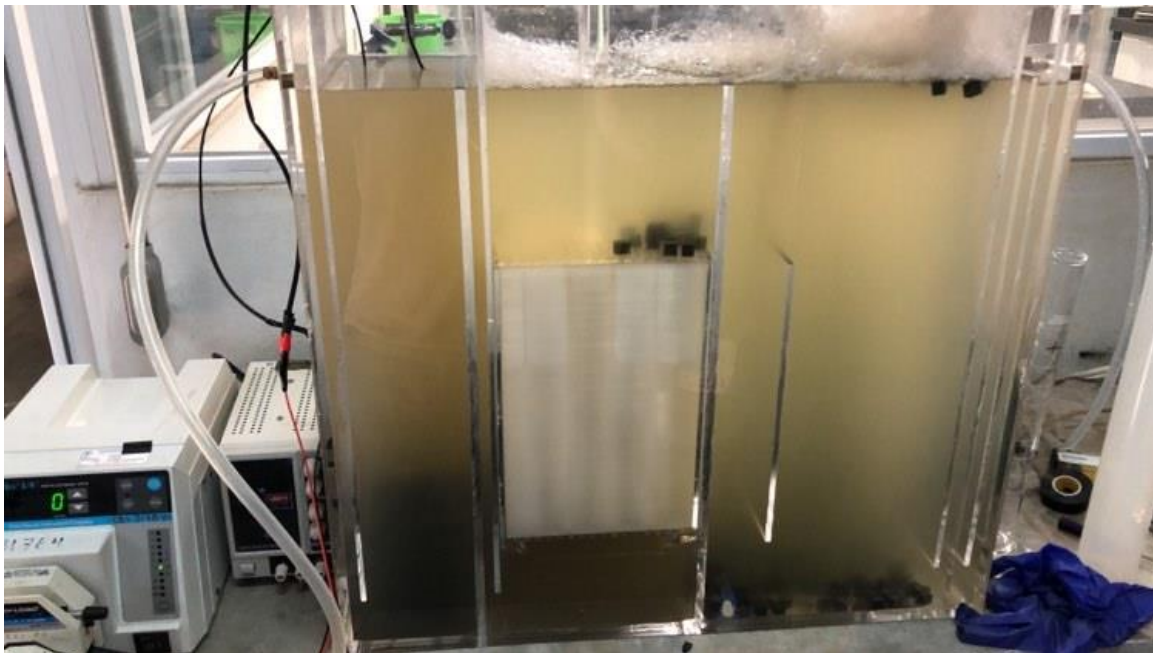


Figura 3.2. Arranque del sistema de tratamiento.

Después de la inoculación, se comenzó con la evaluación de la eficiencia de tratamiento del sistema desarrollado. Esta evaluación consistió en el monitoreo de la DQO, DBO, NT, Nitrógeno amoniacal y los SST en el influente y efluentes de los cuatro módulos de tratamiento.

Como se muestra en la Figura 3.3 durante los primeros 50 días de operación las remociones de DQO y DBO no son estables en la salida del sistema, esto debido a una etapa de estabilización, formación y fijación de las biopelículas en los tres módulos de tratamiento. El sistema de tratamiento ha generado hasta el momento una remoción de DQO y DBO de 85 y 75% respectivamente con valores para la DQO de 45 mg/L y para la DBO de 40 mg/L. La DQO y DBO que se ha medido en el agua residual cruda en promedio es de 300 mg/L y de 140 mg/L respectivamente.

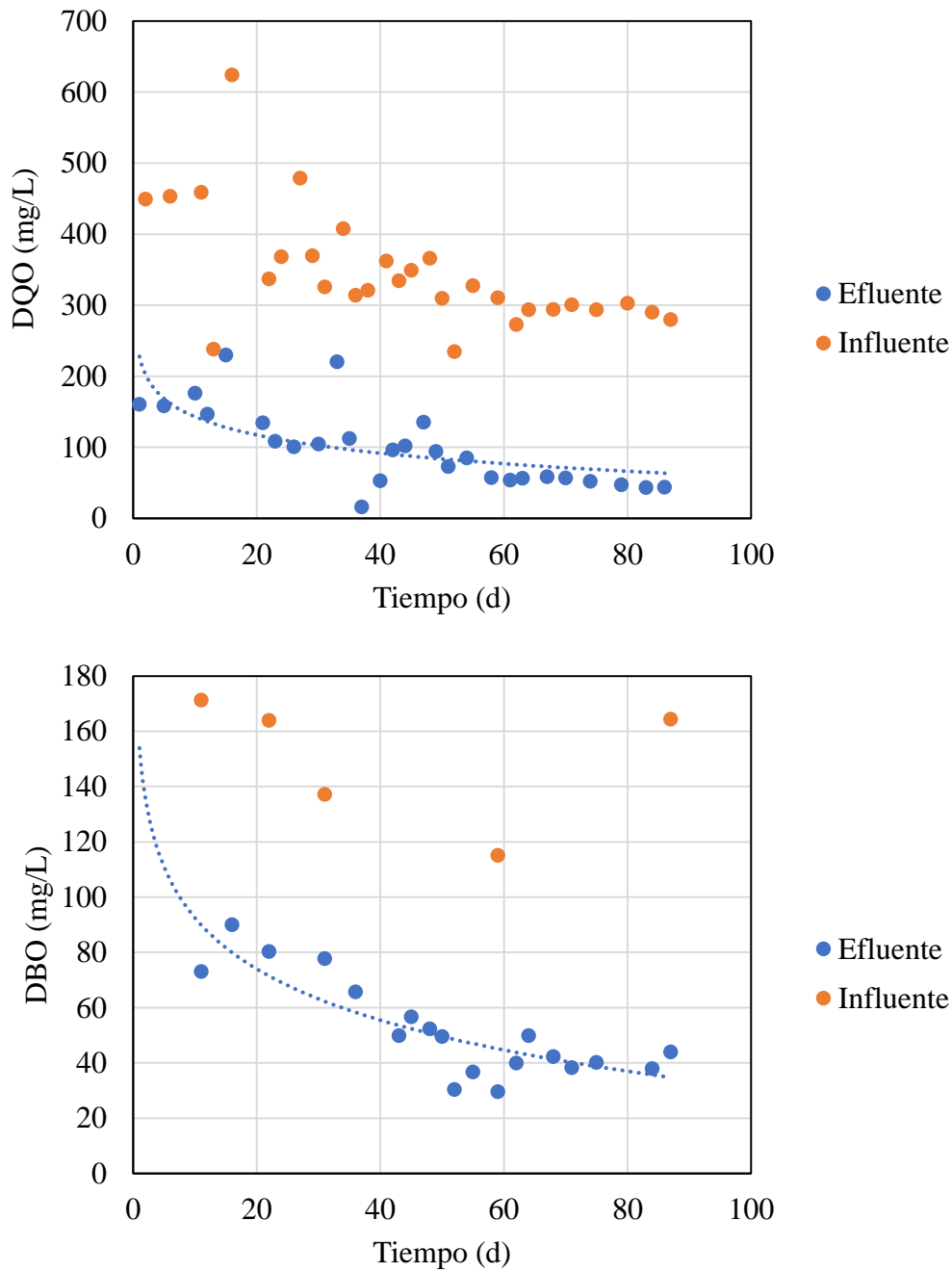


Figura 3.3. Comportamiento de la materia orgánica medida como DQO y DBO en el sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento a mostrado una remoción del nitrógeno total del 37% generandose una parcial desnitrificación (Figura 3.4). Las concentraciones alcanzadas hasta el monete en el efluente final ha sido de 20 mg/L, todavia no se han alcanzado valores estables en el sistema de tratamiento ya que los microorganismos encargados para llevar acabo de la desnitrificaci3n son le lento crecimiento y necesitan más tiempo para desarrollarse dentro de un proceso biológico. Para el nitr3geno amoniacal, el sistema ya

llegó a una estabilización en cuanto a la remoción de este parámetro ya que se han alcanzado remociones del 98% con concentraciones en el efluente por debajo de 1.5 mg/L (Figura 3.4). La alta remoción del nitrógeno amoniacal se dió en el reactor de lecho móvil debido principalmente por los soportes utilizados en los cuales se han desarrollado bacterias nitrificantes que han permitido altas remociones del nitrógeno amoniacal.

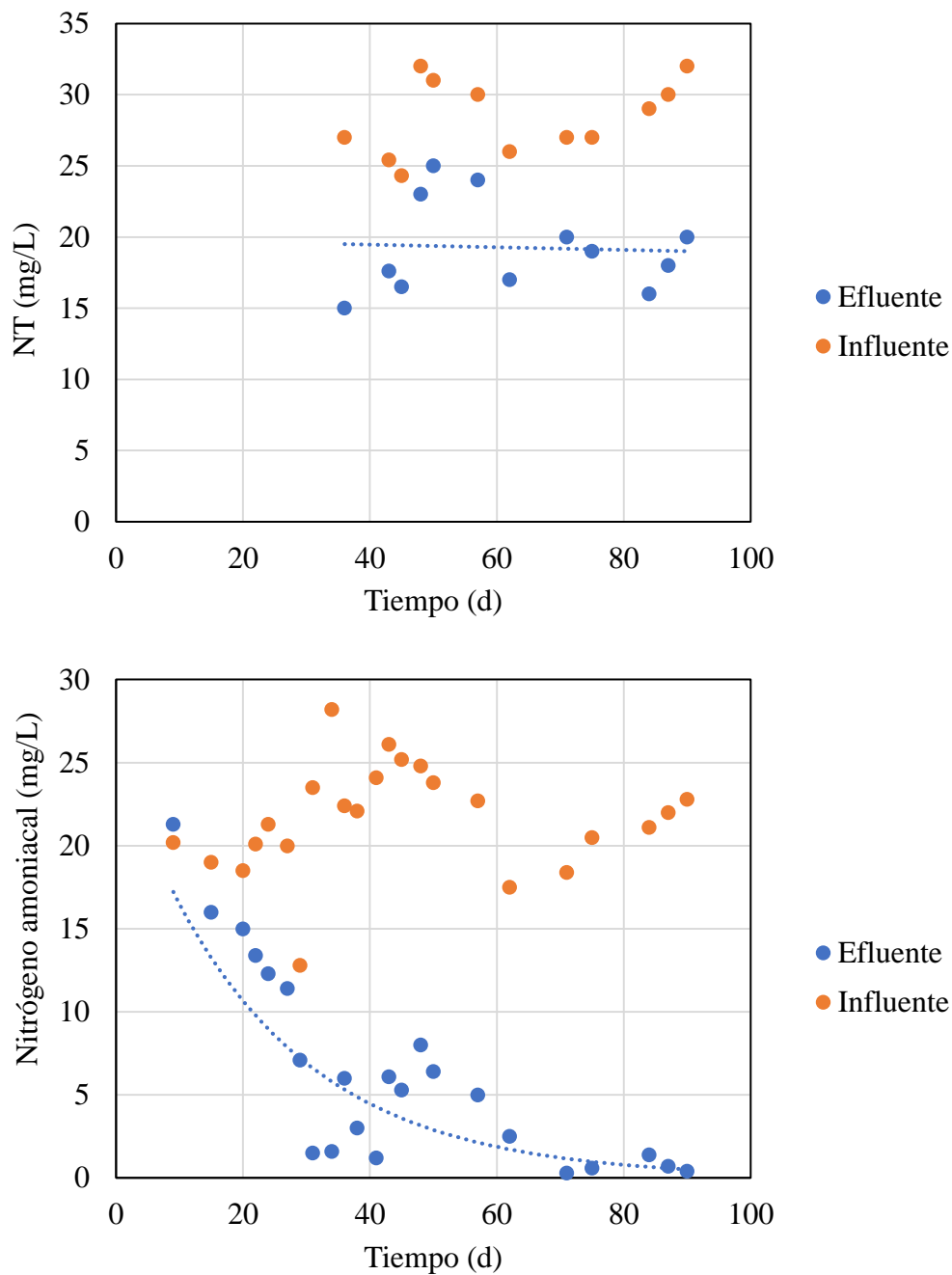


Figura 3.4. Comportamiento del nitrógeno total y nitrógeno amoniacal en el sistema de tratamiento

En cuanto a los SST, el sistema ha generado un comportamiento más estable en la remoción de los sólidos obteniéndose concentraciones por debajo de 25 mg/L (80%)

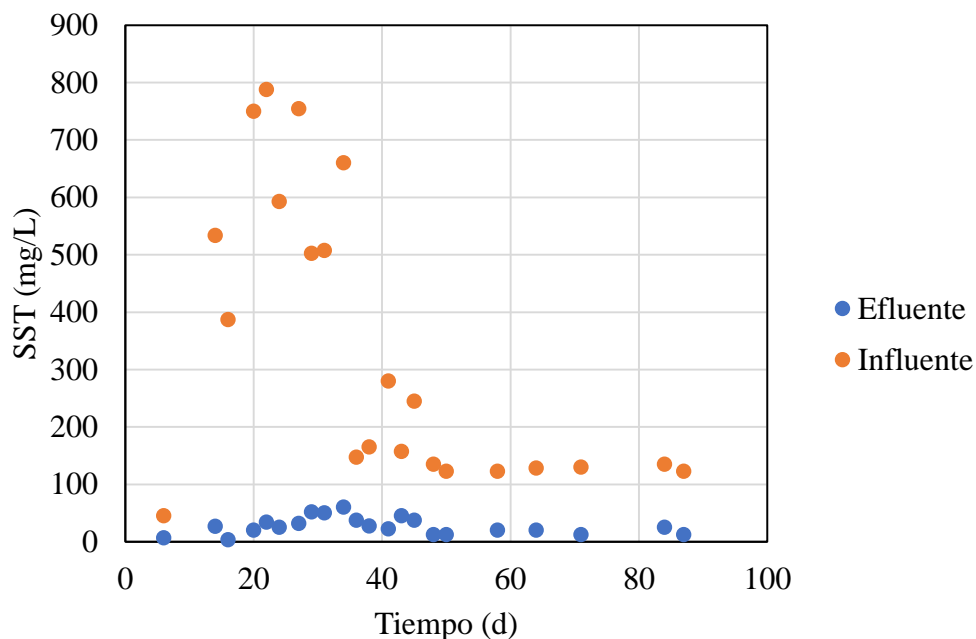


Figura 3.5. Comportamiento de los SST en el sistema de tratamiento

El reactor anaerobio electroquímico el cual corresponde al primer módulo de tratamiento ha generado una cantidad de biogás de 100 mL/d. El biogás fue caracterizado por cromatografía de gases encontrándose en su composición hidrógeno y no metano y dióxido de carbono (Figura 3.6). Este comportamiento nos indica hasta el momento que la vía por la cual se está formando este gas es por la vía de los dos electrones.

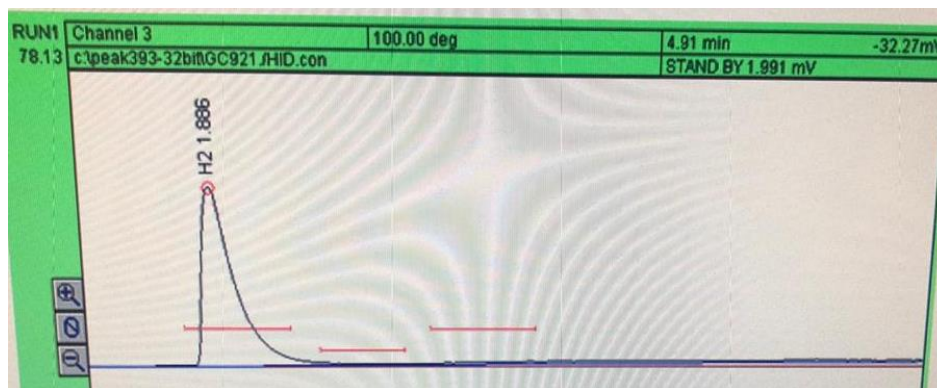


Figura 3.6. Composición del biogás en el reactor anaerobio electroquímico



4. Conclusiones

Se diseñó y construyó una planta tipo paquete de bajo consumo de energía para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias y su reutilización para riego agrícola.

El sistema de tratamiento tipo planta paquete ha mostrado hasta el momento buenos resultados en cuanto a la remoción de materia orgánica, nitrógenos y sólidos. El sistema todavía se encuentra en un periodo de arranque y estabilización.

El biogás generado por el reactor anaerobio electroquímico está compuesto principalmente por biohidrógeno el cual fue generado por la vía de dos electrones.



Referencias

- Abbassi, B. E., Abuharb, R., Ammary, B., Almanaseer, N., & Kinsley, C. (2018). Modified Septic Tank: Innovative Onsite Wastewater Treatment System. En *MDPI Journal*.
- Ahuja, S. (2013). *Monitoring Water Quality - Pollution Assessment, Analysis, and Remediation*. Boston, EU: Elsevier.
- Boutin, C., & Eme, C. (2017). Domestic Wastewater Characterization by Emission Source. En *HAL*. Recuperado Octubre 20, 2019, de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01469077/document>
- Eslamian, S. (2016). *Urban Water Reuse* (pp. 3-8). Boca Ratón, EU: CRC Press.
- Kumari-Sharma, M., & Ahmad-Kazmi, A. (2015). Anaerobic onsite treatment of black water using filter-based packaged system as an alternative of conventional septic tank. *Ecological Engineering*. 75, 457-461
- Mara, D. (2003). *Domestic Wastewater Treatment in developing countries*. Londres, Inglaterra: Earthscan.
- Nasr, F. A., & Mikhaeil, B. (2014). Treatment of domestic wastewater using modified septic tank. *Desalination and Water Treatment*. 56 (8), 2073-2081.
- Santiago-Díaz, n. L., García-Albortante, J., & Salazar-Peláez, M. L. (2018). UASB-septic tank as an alternative for decentralized wastewater treatment in Mexico. *Environmental Technology*. 40(14), 1780-1792
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., Abu-Orf, M., Bowden, G., & Pfrang, W. (2014). *Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). Nueva York: Mc Graw Hill.
- Withers, P. J., Jordan, P., May, L., Jarvie, H. P., & Deal, N. E. (2013). Do septic tank systems pose a hidden threat to water quality? *The Ecological Society of America*. 12 (2), 123-130.