



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“MEJORAMIENTO DE LA FLUIDIZACIÓN DE UN REACTOR
ANAEROBIO HÍBRIDO SEMIFLUIDIZADO”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA:

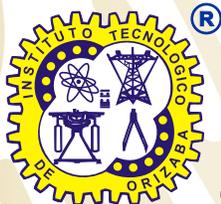
I.Q. Anahí Cruz Ramos

DIRECTOR DE TESIS:

M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alejandro Alvarado Lassman



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

NOVIEMBRE 2019



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 12/11/2019
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. ANAHI CRUZ RAMOS
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

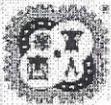
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"MEJORAMIENTO DE LA FLUIDIZACION DE UN REACTOR ANAEROBIO HIBRIDO SEMIFLUIDIZADO".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRIGUEZ
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 16/10/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRIGUEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

ANAHI CRUZ RAMOS

la cual lleva el título de:

"MEJORAMIENTO DE LA FLUIDIZACION DE UN REACTOR ANAEROBIO HIBRIDO SEMIFLUIDIZADO".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : M.I. **NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTU**

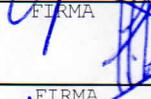
SECRETARIO : DR. **ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN**

VOCAL : M.I. **ADRIAN REYES BENITEZ**

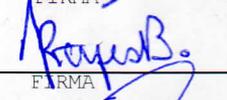
VOCAL SUP. : DR. **ERIK SAMUEL ROSAS MENDOZA**



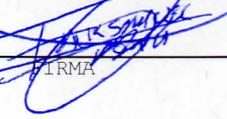
FIRMA



FIRMA



FIRMA



FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA**

OPCION: **I** **Tesis**



Declaración

Yo, Anahí Cruz Ramos, certifico que esta tesis, que tiene una extensión de 95 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección de M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú y Dr. Alejandro Alvarado Lassman y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Fui admitido como estudiante de la maestría en Agosto 2017 y mi trabajo de tesis fue liberado para su impresión el 12 de Noviembre de 2019.

También declaro que, al presentar esta tesis, el Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba tiene permiso para publicarla en formato electrónico bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

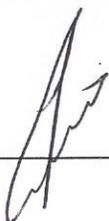
Fecha: 12 Noviembre 2019 Firma: _____



Vo. Bo.

Asesor: M.I. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Firma del asesor: _____



DEDICATORIAS

A Dios, por acompañarme y otorgarme su bendición a lo largo de mi vida, y principalmente para realizar y terminar plenamente mis estudios de maestría.

A mi madre, por ser la principal promotora para realizar mi maestría, gracias por creer en mí, siempre alentándome a realizar las cosas con amor, guiándome para enfrentar cualquier situación, eres mi ejemplo de esfuerzo y valentía, para superarme en la vida.

A mi padre, por su apoyo para realizar mi maestría, agradezco tu amor, cuidados y sabios consejos, que me han ayudado a tomar decisiones determinantes en mi vida, siempre alentándome a superarme como persona y profesionalista.

A mi hermana Arely, por ser mi compañera de vida, gracias por tu apoyo y respaldo sincero, por darme siempre palabras de aliento, siempre me contagias tu alegría.

A mi abuelita Silvia, por estar pendiente de mi bienestar, velando día a día por mí, dándome siempre su bendición, cariño y amor que me llenan de alegría el corazón.

A mi abuelita Juana, por enseñarme el ejemplo de mujer fuerte y perseverante, gracias a usted me llena de orgullo y satisfacción mis raíces.

A mi abuelito Ángel, quien en vida recalcó la persona de bien que debía llegar a ser, son tus valores inculcados los que me hacen hoy la profesionalista que esperaste ver.

A mis amigos, de quienes recibí apoyo y amistad incondicional, gracias a su compañía mi estancia y la realización de mi proyecto de tesis fue mucho más amena: **Iris, Eder, Viri, Paco, Luis Pablo, Marín**, así como aquella persona que me ha brindado su apoyo incondicional, y me motiva a alcanzar mis sueños, gracias por tu comprensión, cariño y amor **Enrique**.

Agradezco a mis amigos **Valaur, Román y Aron** de la UAM, por su colaboración y enseñanzas aportadas para la realización de mi tesis, su hospitalidad y amistad hicieron amena mi estancia en la Universidad.

RECONOCIMIENTOS

A la M.I.Q. Norma Vallejo, por la confianza otorgada para ser miembro de su grupo de investigación, siempre otorgando todo el apoyo para cubrir las necesidades presentadas en la realización del proyecto de tesis, motivándome a dar siempre lo mejor como persona y profesionista.

Al Dr. Alejandro Alvarado, por ser un gran investigador y compartir sus conocimientos en el área, brindándome siempre su orientación y asesoría sobre las dudas que surgieron durante el desarrollo de mi proyecto, logrando con ello cumplir con los objetivos planteados.

Al M.I.A. Adrián Reyes, por ser partícipe de mi formación académica desde mis estudios de licenciatura, propiciando en mí, desempeñarme con esfuerzo y dedicación como estudiante de posgrado, para alcanzar mis aspiraciones como profesionista. Gracias también por sus aportaciones y sugerencias en la revisión de mi proyecto de tesis.

Al Dr. Erick Rosas, por ser un excelente profesor y ser humano, dándome desde el inicio de mis estudios de maestría toda la motivación para culminar con mi proyecto de tesis, además de compartir sus conocimientos y experiencias en el tema. Gracias por su compromiso como miembro de mi jurado, fueron sus meticulosas revisiones, las que dieron una mejor presentación a mi redacción de tesis.

Al Dr. Jorge, por permitirme ser partícipe de su grupo de investigación en la Universidad Autónoma Metropolitana, ampliando mis conocimientos como estudiante de posgrado, en temas totalmente nuevos, cumpliendo con el propósito de enriquecer mi trabajo de tesis, es usted un gran profesor investigador y ser humano.

A mis profesores, quienes me alentaron siempre para culminar exitosamente mis estudios de maestría, cada uno de ustedes tiene una valiosa aportación en mi formación como estudiante de posgrado: **Dr. Juan Manuel, Dr. Denis, Dr. Atenodoro, Dra. Lupita**, y especial agradecimiento al **M.C Gabriel**, quien ha sido partícipe de mi formación académica, motivándome a adquirir nuevos conocimientos, además de proporcionarme facilidades de material y equipo para realizar técnicas de laboratorio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca con número de registro 851018, para poder lograr este grado académico.

RESUMEN

“Mejoramiento de la fluidización de un reactor anaerobio híbrido semifluidizado”

Elaborada por: I.Q. Anahí Cruz Ramos

Dirigida por: M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Esta investigación tiene como objetivo principal mejorar la fluidización sin pérdida de soporte de un Reactor Anaerobio Híbrido (RAH), constituido por un reactor de lecho fijo en la parte superior y un reactor de lecho fluidizado inverso en la parte inferior. Para lograr dicho mejoramiento en la fluidización se realizaron pruebas hidrodinámicas empleando tres placas para la retención de soporte en la sección inferior del reactor, empleando como medio de soporte Extendsphere™ con un diámetro promedio de 169 μm , un área de superficie específica de 20,000 m^2/m^3 y densidad de 0.7 g/cm^3 . Se determinó la expansión del lecho dentro del reactor a diferentes velocidades, usando tres configuraciones diferentes denominadas: 1) cono invertido, 2) cono invertido con placa y 3) placa con orificios en la sección inferior del mismo. Los resultados indican que empleando un 30 % de soporte colonizado, los diseños de cono invertido con placa y placa con orificios son capaces de retener el soporte dentro de la zona del lecho fluidizado utilizando velocidades descensionales mayores a 2.5 m/h , cumpliendo su función de lograr un lecho semifluidizado y a su vez evitar la salida del soporte del reactor en su operación cotidiana. Posteriormente fueron evaluados los parámetros físicos y químicos pH, DQO_T , DQO_s , ST y STV, empleando el diseño de placa perforada con orificios, logrando con ello, porcentajes de remoción de 75.26 % DQO_T , 73.15 % DQO_s , 74.3 % ST y 70 % STV, en apenas 35 días de monitoreo con C_{va} de 5 gDQO/Ld .

ABSTRACT

“Fluidization improvement in a semifluidized anaerobic hybrid reactor”

By: I.Q. Anahí Cruz Ramos

Advisor(s): M.I.Q. Norma Alejandra Vallejo Cantú

Dr. Alejandro Alvarado Lassman

The main objective of this research is to improve the fluidization of an Anaerobic Hybrid Reactor (AHR), consisting of a fixed bed reactor at the top and an inverse fluidized bed reactor at the bottom. To achieve this improvement in the fluidization, hydrodynamic tests using three configurations designed for the bottom section of the reactor were carried out. Using Extendsphere™ as support medium with a mean diameter of 170 μm , a specific surface area of 20,000 m^2/m^3 and density of 0.7 g/cm^3 . For the tests, the bed expansion inside the reactor at different liquid velocities was determined using three different configurations called: 1) inverted cone, 2) inverted cone with plate and 3) perforated plate in the bottom section. The results indicate that using 30 % of colonized support, inverted cone with plate design and perforated plate are able to retain the support within the area of the fluidized bed above using liquid velocities greater than 2.5 m/h , fulfilling its function of achieving a semifluidized bed and at the same time avoiding the exit of support from the reactor in its daily operation. Subsequently, physicochemical parameters pH, τCOD , sCOD , TS, TVS were evaluated, using the perforated plate and operating the reactor 35 days with a 5 gCOD/Ld achieving total COD removal of 75.26 %, soluble COD removal of 73.15 %, 74.3 % ST and 70 % STV,

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABLAS	VI
NOMENCLATURA	VII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
1.1 Biodegradación Anaerobia	5
1.1.1 Etapas de la digestión anaerobia	5
1.1.2 Ventajas del tratamiento anaerobio	8
1.2 Reactores Anaerobios.....	9
1.2.1 Reactores de digestión anaerobia para la generación de biogás.....	10
1.3 Nuevas tecnologías de digestión anaerobia.	14
1.3.1 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI)	15
1.3.2 Reactor de Lecho Semifluidizado	19
1.3.3 Reactor Híbrido	19
1.4 Soportes para reactores tipo Lecho Fluidizado (LF)	21
1.4.1 Soporte Extendosphere™	22
1.5 El fenómeno de la fluidización.....	23
1.5.1 Clasificación del Reactor de Lecho Fluidizado (RLF)	24
1.5.2 Influencia de las condiciones hidrodinámicas	26
1.6 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	26
1.6.1 Fluidización sólido-líquido	27
1.6.2 Estudios hidrodinámicos en RLF I	27

1.6.3	Modelos computacionales desarrollados para RFLI.....	30
1.6.4	Modelo de flujo Euleriano- Lagrangiano	33
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS		38
2.1	Diseño y construcción del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)	39
2.2	Diseño y construcción de tres configuraciones para la retención de soporte de la sección inferior del RLF I.....	40
2.2.1	Evaluación de las tres configuraciones para la retención de soporte empleando CDF (Dinámica de Fluidos Computacionales)	41
2.3	Pruebas hidrodinámicas con soporte Extendsphere del RAH	42
2.3.1	Expansión con soporte limpio.....	43
2.3.2	Expansión con soporte colonizado sin biogás	44
2.3.3	Expansión con soporte colonizado con biogás.....	45
2.4	Monitoreo del Reactor Anaerobio Híbrido	45
2.5	Determinaciones analíticas en el monitoreo del RAH	46
2.5.1	Medición de pH	46
2.5.2	Demanda Química de Oxígeno (DQO _T y DQO _S)	46
2.5.3	Determinación de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles (ST y STV).....	47
2.5.4	Determinación de Materia Volátil Adherida (MVA).....	48
2.6	Estudio comparativo de las tres configuraciones evaluadas	49
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		51
3.1	Diseño y construcción del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)	51
3.2	Diseño y construcción de las tres configuraciones de la sección inferior del RAH.....	54
3.2.1	Primera configuración. Cono invertido	54

3.2.2	Segunda configuración. Cono invertido con placa	55
3.2.3	Tercera configuración. Placa perforada con orificios.....	57
3.3	Evaluación de las tres configuraciones empleando CDF (Dinámica de fluidos computacionales).....	59
3.3.1	Definición de geometrías del dominio computacional para el RAHS ...	59
3.3.2	Modelado del flujo de un Reactor Anaerobio Híbrido Semifludizado ...	61
3.4	Monitoreo y seguimiento del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)	64
3.4.1	Monitoreo del pH.....	66
3.4.2	Monitoreo de ST y STV.....	67
3.4.3	Monitoreo de la DQO _T Y DQOs.....	69
3.1	Pruebas hidrodinámicas con soporte Extendsphere™ del RAH	73
3.1.1	Pruebas hidrodinámicas con soporte no colonizado	73
3.1.2	Pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado	76
3.1.3	Efecto de la fluidización del biogás sobre la fluidización del soporte ...	79
CONCLUSIONES.....		85
RECOMENDACIONES.....		87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Etapas de la Digestión Anaerobia.....6

Figura 1.2 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLF)......16

Figura 1.3 Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso (RLSFI).19

Figura 1.4 Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)......20

Figura 1.5 Soporte Extendsphere colonizado.22

Figura 1.6 Clasificación del Reactor de Lecho Fluidizado24

Figura 2.1 Diagrama general de la Metodología38

Figura 2.2 Diagrama del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH) y sus líneas de corriente.
.....40

Figura 3.1 Reactor Anaerobio Híbrido (RAH).....51

Figura 3.2 (a) Tubos concéntricos conformando el LF (b) LF y accesorios.52

Figura 3.3 Sección de Lecho Fluidizado Inverso (LFI).53

Figura 3.4 Diagrama de la configuración del cono invertido55

Figura 3.5 Diagrama de la configuración del cono invertido con placa.56

Figura 3.6 Diagrama de la configuración de placa perforada con orificios58

Figura 3.7 Diagrama de las piezas impresas a) cono invertido, b) cono invertido con
placa, c) placa perforada con orificios.59

Figura 3.8 Mallas de los Diagrama de las piezas: a) Cono invertido, b) Cono
invertido con placa, c) Placa perforada con orificios.....60

Figura 3.9 Contornos de fracción volumen de sólidos en las trampas de soporte
analizadas. a) Cono invertido, b) Cono invertido con placa y c) Placa
perforada con orificios.61

Figura 3.10 Líneas de corriente en las trampas de soporte analizadas.63

Figura 3.11 Reactor Anaerobio Híbrido con soporte colonizado65

Figura 3.12 Monitoreo de pH de entrada y salida del RAH66

Figura 3.13 Monitoreo de ST en la entrada y salida del RAH67

Figura 3.14 Monitoreo de STV en la entrada y salida del RAH.68

Figura 3.15 Monitoreo del % de Remoción de ST y STV.....69

Figura 3.16 Concentración de DQO Total de entrada y salida del RAH70

Figura 3.17 Concentración de DQO Soluble de entrada y salida del RAH71

Figura 3.18 Monitoreo del % de Remoción de DQO Total y DQO Soluble72

Figura 3.19 Resultados de pruebas de fluidización con soporte limpio74

Figura 3.20 Retención de soporte limpio con los diseños a) como invertido, b) como invertido con placa, c) placa perforada con orificios.75

Figura 3.21 Resultados de pruebas de fluidización con soporte colonizado y las tres configuraciones77

Figura 3.22 Retención de soporte colonizado con los diseños a) como invertido con placa, b) placa perforada con orificios.....78

Figura 3.23 Producción de biogás (L).80

Figura 3.24 Relación entre la producción diaria de biogás y la velocidad descensional.....81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Correlaciones para calcular la expansión de lecho o la porosidad de la cama, desarrolladas para RLFI.30

Tabla 1.2 Ecuaciones de conservación para ambas fases.35

Tabla 1.3 Modelos de arrastre de las partículas sólidas empleados.36

Tabla 2.1 Propiedades físicas del Extendsphere®43

Tabla 2.2 Flujos utilizados en las pruebas hidrodinámicas44

Tabla 2.3 Parámetros evaluados en el efluente y soporte colonizado46

Tabla 3.1 Dimensiones del Reactor de Lecho fijo (LF)52

Tabla 3.2 Dimensiones del RLFI.53

Tabla 3.3 Distribución porcentual del RLFI.53

Tabla 3.4 Configuración de las mallas60

Tabla 3.5 Parámetros de Alimentación del RAH65

Tabla 3.6 Comparación de las Velocidades de expansión de cada diseño utilizado.82

Tabla 3.7 Comparación del RAHS con un RAH.83

NOMENCLATURA

Nomenclatura	Significado
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
CFD	Dinámica de Fluidos Computacionales
CSTR	Reactor Continuo de Tanque Agitado
DG	Digestión Anaerobia
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EGBS	Reactor de Manto de Lodo Granular Expandido
FA	Filtro Anaerobio
LF	Lecho Fluidizado
RAH	Reactor Anaerobio Híbrido
RAHS	Reactor Anaerobio Híbrido Semifluidizado
RALF	Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado
RLFI	Reactor de Lecho Fluidizado Inverso
RP	Residuos Peligrosos
RSOM	Residuos Sólidos Orgánicos Municipales
DQO _T	Demanda Química de Oxígeno Total
DQO _s	Demanda Química de Oxígeno Soluble
ST	Sólidos Totales
STV	Sólidos Totales Volátiles
UFC	Unidades Formadoras de Colonias

INTRODUCCIÓN

Los tratamientos biológicos aerobios y anaerobios constituyen dos grandes alternativas para la depuración de aguas residuales y residuos orgánicos biodegradables. Sin embargo, el tratamiento anaerobio resulta mucho más favorable económicamente por el hecho de no requerir aireación, y por la generación de biogás (metano y dióxido de carbono), que se puede utilizar como energía alternativa. No obstante, uno de los mayores problemas en los procesos anaerobios de tratamiento de aguas residuales es la pérdida de biomasa en sistemas con alta carga hidráulica. En relación con esto, muchos de los sistemas anaerobios empleados involucran sistemas de biomasa fija. La biopelícula proporciona interesantes ventajas tales como: ofrecer una mayor superficie de contacto entre la materia orgánica y la biomasa, además de la fácil separación del agua tratada de la biomasa y de un diseño de sistema compacto (Alvarado-Lassman *et al.*, 2010, Thaiyalnayaki y Sowmeyan 2012). Los reactores anaerobios fluidizados que se han diseñado hasta ahora utilizan como soporte ya sea materiales más densos que el agua (Reactor de Lecho Fluidizado) o menos densos que el agua (Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado Inverso, RALFI). Estos últimos se han utilizado para el tratamiento anaerobio de efluentes industriales (Alvarado *et al.*, 2010, Abdurahman *et al.*, 2013). El LFI utiliza como soporte pequeñas partículas con una densidad específica menor que la del agua que flotan y son expandidas hacia abajo por el influente (Sowmeyan y Swaminathan 2008).

La selección de un material adecuado de soporte debe considerar varios aspectos, además de los relacionados con la fluidización. Estos aspectos comprenden las propiedades físicas y químicas del medio, además de su costo. Las características físicas que deben considerarse son tamaño, forma, densidad de partícula, dureza, rugosidad y área superficial. La fluidización inversa tiene ventajas adicionales comparadas con la fluidización convencional, entre ellas, permite la recuperación de sólidos en el fondo. Sin embargo, durante el crecimiento de la biopelícula, el diámetro efectivo del soporte se incrementa, esto modifica el espaciamiento entre partículas y la interacción hidrodinámica entre ellas (Ramírez-Muñoz, 2007) y por consiguiente el

mezclado en el interior del reactor. Adicionalmente, la producción de biogás también contribuye a la expansión del lecho, fenómeno llamado pseudofluidización (Amaiz *et al.*, 2005), lo cual a su vez afecta también la distancia entre partículas. Por lo cual, las condiciones hidrodinámicas óptimas, determinadas inicialmente con el soporte sin colonizar deberían variar a medida que crece la biopelícula y se produce biogás, lo cual no ha sido estudiado a la fecha en reactores LFI porque implicaría realizar pruebas invasivas al sistema que podrían afectar la estabilidad de la biomasa adherida al soporte.

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto es evaluar tres diseños de placas en la sección inferior de un Reactor de Lecho Fluidizado Inverso para la retención de soporte realizando pruebas hidrodinámicas con soporte sin colonizar y colonizado para lograr mayor estabilidad que en el sistema de lecho fluidizado, esto en base al lecho expandido y desprendimiento y pérdida de biopelícula del mismo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar diversas configuraciones de la sección inferior de un Reactor Anaerobio Híbrido Semifluidizado (RAHS) a nivel laboratorio, para lograr una fluidización mejorada sin pérdida de soporte.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Realizar pruebas hidrodinámicas en el RAHS, con soporte colonizado.
- 2.- Diseñar 3 configuraciones de la sección inferior del RAHS y fabricarlos en la impresora 3D.
- 3.- Realizar pruebas hidrodinámicas con las 3 configuraciones diseñadas.
- 4.- Realizar un estudio comparativo de la fluidización entre el reactor actual y las 3 configuraciones diseñadas.

CAPÍTULO 1.
FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Biodegradación Anaerobia

La Digestión Anaerobia (DA) ha sido ampliamente utilizada para la degradación y estabilización de residuos domésticos, industriales y orgánicos, lo que representa una alternativa válida a la disposición final de residuos, así como una fuente atractiva de energía renovable (Pöschl *et al.*, 2010).

La DA es un proceso biológico que consta de cuatro etapas en el que se presenta un proceso de bioconversión que involucra diferentes especies bacterianas del cual se puede obtener beneficios para el tratamiento de residuos orgánicos: recuperación de energía en forma de biogás, producción de fertilizantes orgánicos y control de emisiones de gases de efecto invernadero (Lim y Wang, 2013). Los sustratos más comúnmente utilizados para alimentar a los digestores anaeróbicos son el estiércol de ganado, la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, los desechos generados por las fábricas de alimentos y la agricultura (Esposito *et al.*, 2012).

1.1.1 Etapas de la digestión anaerobia

La vía de degradación anaerobia de la materia orgánica es un proceso escalonado en serie y reacciones paralelas, muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar, como por la cantidad de grupos de bacterias involucradas en ellas, se conforma por cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Kothari *et al.*, 2014). En la Figura 1.1 se muestra esquemáticamente las distintas etapas del proceso de digestión anaerobia, así como los productos intermedios generados y las bacterias que intervienen en cada etapa.

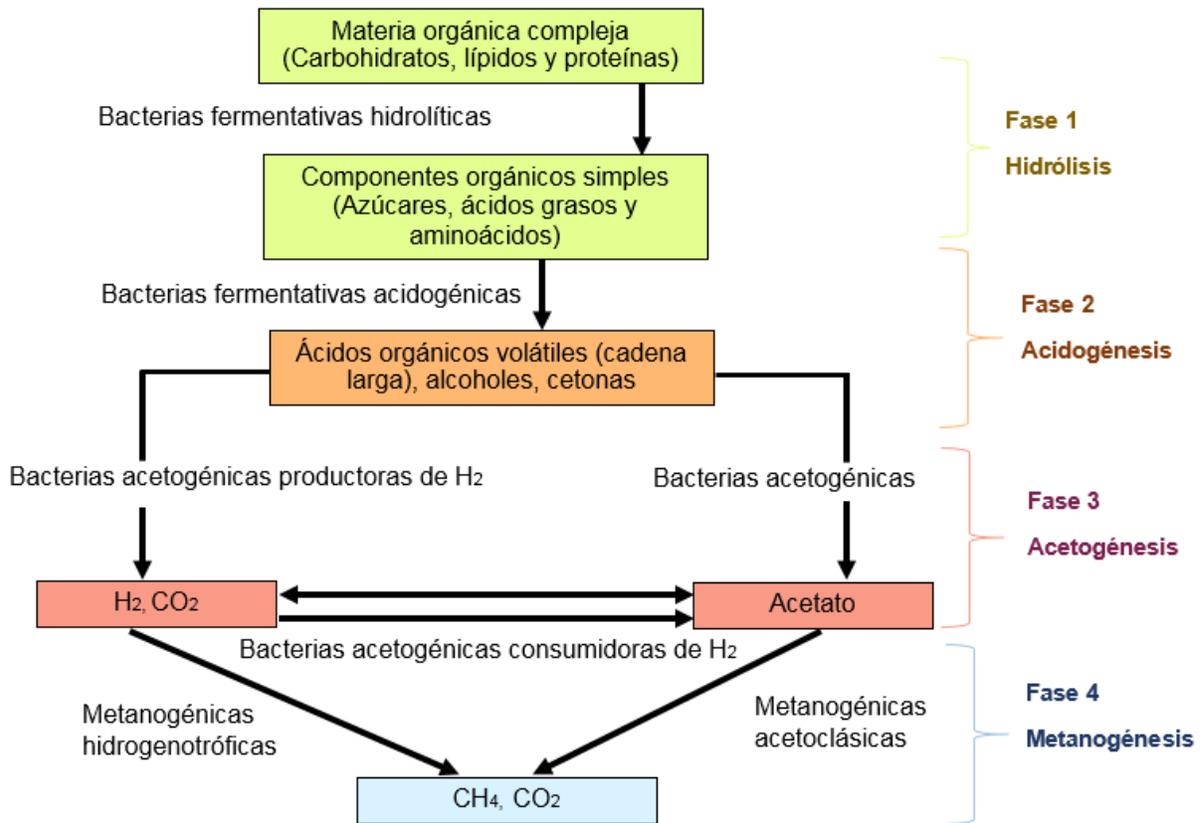


Figura 1.1 Etapas de la Digestión Anaerobia.

➤ Etapa 1. Hidrólisis

Durante la hidrólisis de los compuestos orgánicos polimerizados, en su mayoría insolubles, como los carbohidratos y las proteínas, las grasas se descomponen en monómeros y dímeros solubles, es decir, monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos. Esta etapa de la metanogénesis pasa a través de enzimas extracelulares del grupo de hidrolasas (amilasas, proteasas y lipasas) producidas por cepas apropiadas de bacterias hidrolíticas. La velocidad del proceso de hidrólisis depende de parámetros tales como el tamaño de las partículas, el pH, la producción de enzimas, la difusión y la adsorción de enzimas sobre las partículas de desechos sometidos al proceso de digestión. La hidrólisis es llevada a cabo por bacterias del grupo de anaerobios relativos de géneros como *Streptococcus* y *Enterobacterium* (Moraes *et al.*, 2015).

➤ **Etapa 2. Acidogénesis**

Durante esta etapa las bacterias acidificantes convierten las sustancias químicas solubles en agua, incluidos los productos de hidrólisis, en ácidos orgánicos de cadena corta (fórmica, acética, propiónica, butírica y pentanóica), alcoholes (metanol, etanol), aldehídos, dióxido de carbono e hidrógeno. De la descomposición de las proteínas, surgen aminoácidos y péptidos, que pueden ser una fuente de energía para los microorganismos anaeróbicos. Como resultado de estas transformaciones, los metanógenos pueden usar directamente los nuevos productos como sustratos y fuente de energía. La acumulación de electrones por compuestos como el lactato, etanol, propionato, butirato y ácidos grasos volátiles más altos es la respuesta bacteriana a un aumento en la concentración de hidrógeno en la solución. Los nuevos productos no pueden ser utilizados directamente por bacterias metanogénicas y deben convertirse por bacterias obligatorias que producen hidrógeno en el proceso llamado acetogénesis. Entre los productos de acidogénesis, también se debe mencionar el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno que dan un intenso olor desagradable a esta fase del proceso (Adekunle y Okolie, 2015).

➤ **Etapa 3. Acetogénesis**

En la tercera etapa, conocida como acetogénesis, mientras que algunos productos de la acidogénesis pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H_2 y acetato), otros (valerato, butirato, propionato, algunos aminoácidos, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas. La acetogénesis es una fase que representa la eficiencia de la producción de biogás, ya que aproximadamente el 70 % del metano surge en el proceso de reducción de acetatos. En consecuencia, los acetatos son un producto intermedio clave del proceso de digestión con metano. En la fase de acetogénesis, aproximadamente el 25 % de los acetatos se forman y aproximadamente el 11 % de hidrógeno se produce en el proceso de degradación de residuos (Ali Shah *et al.*, 2014).

➤ **Etapa 4. Metanogénesis**

Esta fase consiste en la producción de metano por bacterias metanogénicas. El metano en esta fase del proceso se produce a partir de sustratos que son productos de fases previas, es decir, ácido acético, H₂, CO₂ y formato y metanol, metilamina o dimetilsulfo. Solo el 30 % del metano producido en este proceso proviene de la reducción de CO₂ llevada a cabo por las bacterias metotróficas autótrofas. Durante este proceso el H₂ se consume, lo que crea buenas condiciones para el desarrollo de bacterias ácidas que dan lugar a ácidos orgánicos de cadena corta en la fase de acidificación y, en consecuencia, a una producción demasiado baja de H₂ en la fase acetogénica.

1.1.2 Ventajas del tratamiento anaerobio

Van Lier, Mahmoud, y Zeeman (2008) enuncian las siguientes ventajas del tratamiento anaerobio de aguas residuales sobre los sistemas de tratamiento aerobio convencionales:

- Reducción del exceso de producción de lodos hasta un 90 %.
- Hasta un 90 % de reducción en el requisito de espacio cuando se utilizan sistemas de lecho de lodo expandido.
- Altas tasas de carga de DQO
- Puesta en marcha rápida (<1 semana), utilizando lodo anaeróbico granular como material de siembra.
- No o muy poco uso de productos químicos.
- Tecnología simple con altas eficiencias de tratamiento.
- Los lodos anaeróbicos se pueden almacenar sin alimentar.

1.2 Reactores Anaerobios

Dentro del sector industrial, se utilizan diferentes tipos de reactores para el tratamiento de aguas residuales. Estos se diferencian por su configuración física, los diferentes requisitos que se imponen al proceso y a la actividad metabólica microbiana (Levin y Gealt, 1997).

Dentro de la digestión anaerobia se han propuesto varios procesos con configuraciones diferentes que buscan optimizar el sistema. Estas configuraciones pueden agruparse por la forma en que se encuentra la biomasa en su interior, lo que origina dos grandes bloques: reactores con crecimiento celular en suspensión y reactores con biomasa fija. Los reactores se dividen en tres generaciones de acuerdo a la evolución tecnológica que presenten, la primera corresponde a aquellos procesos donde la biomasa se encuentra en suspensión; en la segunda generación los microorganismos son retenidos en el reactor mediante un soporte fijo o bien por sedimentación y en los de tercera generación, los microorganismos están adheridos en un soporte que se expande o fluidiza.

➤ Reactores de Primera Generación.

Son aquellos donde la biomasa se encuentra en suspensión, es decir los microorganismos flotan sin estar fijos a ninguna superficie, algunos de ellos son: fosa séptica, tanque imhoff, laguna anaerobia, digestor convencional, contacto anaerobio.

➤ Reactores de Segunda Generación.

En estos sistemas se logran tiempos de retención hidráulica de 0.5 a 3 días, lo que da como resultado volúmenes de reactor menores, mayor estabilidad y facilidad en su operación. Esto se logra al retener la biomasa anaerobia dentro del reactor mediante la formación de la biopelícula de microorganismos fijos sobre soportes, o bien por medio de la sedimentación de flóculos microbianos con muy buenas características de decantación.

➤ Reactores de Tercera Generación.

Es la más reciente generación de reactores anaerobios, El principio general de estos sistemas de lecho fluidizado, es el de retener a los microorganismos, desarrollando biopelículas que consumen el sustrato disponible en el medio. Para esto se deben de crear las condiciones hidrodinámicas necesarias para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos. Utilizan una corriente de recirculación para provocar un flujo ascendente y fluidificar el lecho de partículas de soporte, que puede ser de arena, material plástico, cerámica y otros tipos de materiales. Ejemplo de estos, son los Reactores de Lecho Fluidizado (RLF) de flujo ascendente o descendente (Inverso).

1.2.1 Reactores de digestión anaerobia para la generación de biogás

➤ Reactores anaerobios convencionales.

a) Reactor Continuo de Tanque Agitado (CSTR)

El Reactor Continuo de Tanque Agitado (CSTR) por sus siglas en inglés es el reactor anaerobio de alta velocidad más antiguo (la primera generación). Es conocido por su confiabilidad y se usa ampliamente para tratar aguas residuales que contienen altos niveles de sólidos en suspensión durante un proceso de DA, especialmente para el tratamiento de estiércol líquido animal de alta resistencia y desechos industriales orgánicos. En un sistema CSTR, los microorganismos se suspenden en el digestor a través de la mezcla intermitente o continua. La mezcla completa ofrece un buen contacto del lodo del sustrato con una ligera resistencia a la transferencia de masa, pero consume una energía considerable y también requiere mucha mano de obra (Mao *et al.*, 2015).

b) Reactor Anaerobio de Flujo Pistón (APFR)

El Reactor Anaerobio de Flujo Pistón (APFR) por sus siglas en inglés, es otro proceso convencional que proporciona bajas concentraciones de AGV'S en el efluente, un alto grado de retención de lodo y un rendimiento estable del reactor.

El tiempo de retención suele ser de 15-20 días. Por lo tanto, en los países industrializados como en los países en desarrollo, el reactor proporciona un bajo costo de inversión inicial, una alta eficiencia y un funcionamiento y mantenimiento relativamente simples, además tiene un potencial significativo para producir biogás. Dicho reactor ha sido probado experimentalmente utilizando sustratos, como estiércol de cerdo, aguas residuales de destilería, residuos de ganado, fracción orgánica de basura y residuos orgánicos urbanos, etc. (Mao *et al.*, 2015).

➤ Reactores de retención de lodos.

a) Reactor Anaerobio de Contacto (ACR)

El Reactor Anaerobio de Contacto (ACR) por sus siglas en inglés, se emplea principalmente para efluentes con altas concentraciones de sólidos en suspensión. En algunos casos, se ha demostrado que los ACR mesófilos de alta velocidad son una tecnología sostenible para una amplia gama de efluentes industriales, tales como las aguas residuales de la industria alimentaria. El tiempo de retención del sustrato y el grado de contacto entre el sustrato influente y las comunidades de microorganismos son los parámetros principales que afectan el rendimiento del reactor. Las ventajas reportadas incluyen tiempos de retención hidráulicos suficientemente cortos y calidad de efluente relativamente alta, pH favorable (Sentürk *et al.*, 2012).

b) Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB)

El UASB por sus siglas en inglés, es una tecnología común, simple, compacta y económica utilizada ampliamente para el tratamiento de efluentes. La estructura principal del reactor es un lecho de lodo denso ubicado en la parte inferior, que

garantiza un buen contacto de las aguas residuales con la biomasa. Entre las ventajas notables son que requiere menos volumen y espacio del reactor, presenta una mayor velocidad de flujo y producción de biogás.

Además, el reciclaje de efluentes no es necesario porque se garantiza un contacto suficiente entre las aguas residuales y los lodos, incluso con cargas orgánicas bajas con el sistema de distribución de efluentes. Asimismo, la disponibilidad de lodo granular o floculento permite el manejo de mayores tasas de carga de DQO y proporcionar un tratamiento adecuado a TRH más bajos de lo que es posible con el Filtro Anaeróbico (FA) (Mao *et al.*, 2015).

➤ Reactores anaerobios de membrana.

a) Reactor de Filtro Anaerobio (RFA)

El Reactor de Filtro Anaerobio (FA) se desarrolló inicialmente para proporcionar un medio de soporte para el contacto íntimo entre el influente y la masa bacteriana, lo que permite un tiempo de retención de la biomasa más largo que el TRH. En el medio, se genera una biopelícula que soporta la biomasa separada del efluente en esta configuración del reactor. Los filtros se pueden operar en condiciones de flujo ascendente o descendente. La aplicación exitosa del FA ha sido reportada, al tratar las aguas residuales vertidas por los laboratorios de control de calidad de la leche cruda, se pudo obtener una eliminación de DQO superior al 90 % sin lavado de biomasa y la mayor parte de la grasa contenida en las aguas residuales se degradó con éxito.

b) Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado (RALF)

Para un Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado (RALF), el medio para la unión y el crecimiento bacteriano son partículas pequeñas e inertes, como arena fina o alúmina, mantenidas en suspensión por un rápido flujo ascendente de las aguas residuales entrantes. En estado fluidizado, cada medio proporciona gran área de superficie para

la formación y el crecimiento de la biopelícula. Permite alcanzar un alto nivel de retención de biomasa en el reactor y promueve la eficiencia y la estabilidad del sistema. Esto proporciona una oportunidad para mayores tasas de carga orgánica y una mayor resistencia a los inhibidores.

Estos reactores tienen varias ventajas sobre los filtros anaeróbicos, como la eliminación de la obstrucción del lecho, una baja pérdida de carga hidráulica combinada con una mejor circulación hidráulica y una mayor área superficial por unidad de volumen del reactor (Rajeshwari *et al.*, 2000).

Además, la capacidad de eliminar partículas sólidas suspendidas de aguas residuales domésticas utilizando el RALF es mejor que la de la UASB; Andalib *et al.* (2014), utilizaron un RALF para investigar y comparar la capacidad de tratamiento de sólidos suspendidos muy altos con diferentes fracciones de partículas biodegradables y el fraccionamiento DQO, el lavado fino (un subproducto de la industria del etanol del maíz), así como el lodo primario derivado del tratamiento de aguas residuales municipales. Los resultados mostraron que los rendimientos máximos de producción de metano fueron de 0.31 LCH₄/gDQO y 0.25 LCH₄/gDQO se lograron para el estilado fino y el lodo primario, respectivamente.

c) Manto de lecho granular expandido

El reactor de manto de lecho granular expandido (EGSB) por sus siglas en inglés, se define como una modificación del reactor UASB, el EGSB responde a las necesidades de las industrias pequeñas y medianas en el tratamiento de aguas residuales solubles y complejas de baja resistencia. Mao *et al.* (2015) describen que el reactor EGSB se distingue por varias ventajas sobre el UASB:

- (i) El EGSB ofrece una huella más pequeña, mayor mezcla debido a las mayores velocidades de flujo ascendente y, en consecuencia, mejora la transferencia de masa, la actividad de la biomasa y un mejor transporte del sustrato a los agregados de lodo.

- (ii) El reactor presenta mayores cargas orgánicas e hidráulicas, especialmente para aguas residuales acidificadas en condiciones psicrófilas, incluso a temperaturas tan bajas como 10°C.
- (iii) El EGSB es más adecuado para tratamientos de contaminantes solubles, especialmente para aguas residuales de baja resistencia.

1.3 Nuevas tecnologías de digestión anaerobia.

La aplicación de una tecnología de lecho fluidizado al tratamiento biológico de aguas residuales ha traído un gran avance. La tecnología debe su éxito de alta velocidad a una mayor área de superficie y concentración de biomasa que las que se pueden lograr en los procesos de tratamiento convencionales. Un Reactor Biológico de Lecho Fluidizado (RBLF) por sus siglas en inglés ha atraído un interés considerable como alternativa a los procesos convencionales de crecimiento suspendido y tratamiento de aguas residuales de película fija debido a su rendimiento de alta eficiencia (Sokól y Woldeyes, 2011).

El tratamiento anaerobio de efluentes con elevado contenido de materia orgánica biodegradable presenta diversas ventajas, por ejemplo se puede alcanzar alta eficiencia de remoción alimentando altas cargas, presenta bajos requerimientos de nutrientes, genera pequeñas cantidades de lodos y produce un biogás combustible. La producción de biogás permite al proceso no sólo ahorrar energía, sino también generarla. Esto puede reducir significativamente los costos de operación comparado con el alto consumo de energía de los procesos aerobios (Fernández *et al.*, 2008).

Sin embargo, uno de los mayores problemas en los procesos anaerobios de tratamiento de aguas residuales es la pérdida de biomasa en sistemas con alta carga hidráulica. En relación con esto, muchos de los sistemas anaerobios empleados involucran sistemas de biomasa fija.

La biopelícula proporciona interesantes ventajas tales como: ofrece una mayor superficie de contacto entre la materia orgánica y la biomasa, además de la fácil separación del agua tratada de la biomasa y de un diseño de sistema compacto (Houbron *et al.*, 2012; Thaiyalnayaki y Sowmeyan, 2012).

1.3.1 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI)

Dentro de los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante un lecho fijo se encuentran los RLFI, mismos que se han sugerido para el tratamiento anaerobio de efluentes industriales (Alvarado *et al.*, 2010). El RLFI utiliza como soporte pequeñas partículas con una densidad específica menor que la del agua, estas partículas flotan y son expandidas hacia abajo por el influente (Sowmeyan y Swaminathan, 2008). En el caso de la producción de gas, éste también contribuye a la expansión del lecho, fenómeno llamado pseudofluidización (Arnaiz *et al.* 2005). La entrada para la alimentación del reactor se encuentra en la parte superior, mientras que la salida del efluente en la parte inferior del reactor. Cuenta con una recirculación la cual aprovecha la fuerza descendente ejercida por el líquido y así expandiendo el soporte en la parte inferior del lecho tal como se observa en la Figura 1.2.

El diseño del RLFI surgió de la necesidad de solucionar los inconvenientes relacionados con la biopelícula en los RLF convencionales, para operar el reactor eficientemente el grosor de la biomasa debe ser aproximadamente de 100 μm (Karamanev y Nikolov, 1996).

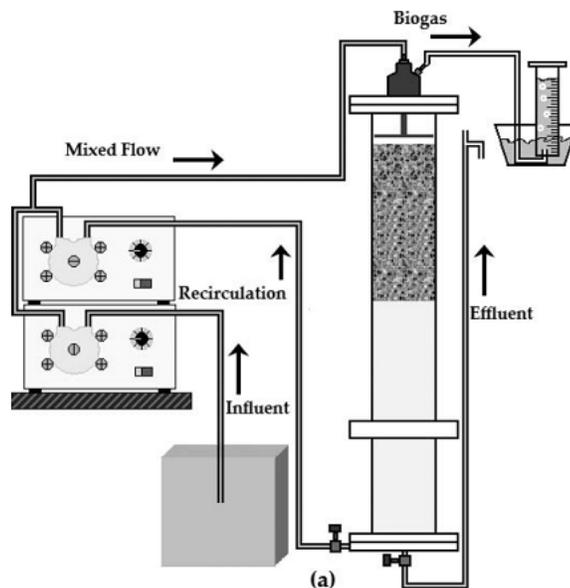


Figura 1.2 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLF).

La fluidización inversa tiene ventajas adicionales comparadas con la fluidización convencional, entre ellas, permite la recuperación de sólidos en el fondo del reactor. En este sentido, la biopelícula que crece en la parte superior del reactor permanece separada de los precipitados, así el reactor no está propenso a atascamientos y tiene menor requerimiento de energía. Por otro lado, se considera que los reactores LFI pueden alcanzar una carga orgánica volumétrica superior a 30 g DQO/Ld (Alvarado *et al.*, 2008). Este proceso ha sido probado a nivel laboratorio con éxito sobre aguas residuales urbanas, aguas residuales de la industria vinícola (Sowmeyan y Swaminathan 2008; Thaiyalnayaki y Sowmeyan 2012) y aguas residuales de cervecería (Alvarado *et al.*, 2008).

➤ Características de operación

En un reactor de lecho fluidizado inverso la configuración de flujo descendente permite recuperar partículas sobrecargadas en el fondo del reactor, evitando pérdidas de material de soporte; por otro lado, el líquido y el biogás producido fluyen en direcciones opuestas, lo cual ayuda a la expansión del lecho (García Calderón *et al.*, 1998a; Arnaiz *et al.*, 2003).

Las partículas que sirven de medio de soporte a la colonización son fluidizadas por una corriente de flujo descendente de líquido, lo cual equivale a ahorro en los costos de bombeo.

a) Grado de expansión del lecho

Una de las variables más importantes de un reactor de lecho fluidizado es su expansión, debido a que ésta establece el tiempo de residencia de la materia orgánica en la zona de biocatálisis, y está directamente relacionada con los costos de bombeo del proceso (Diez Blanco *et al.*, 1995). La variable de caracterización de un sistema fluidizado líquido-sólido es la velocidad superficial necesaria para lograr una expansión del 20 al 40 %. Altas velocidades superficiales pueden producir desgastes de la biopelícula por fricción, pero muy bajas velocidades pueden producir adherencias cruzadas entre partículas y cambiar las condiciones de fluidización del lecho.

b) Medio de Soporte

La selección de un material adecuado de soporte debe considerar varios aspectos, además de los relacionados con la fluidización. Estos aspectos comprenden las propiedades físicas y químicas del medio, además de su costo. Las características físicas que deben considerarse son tamaño, forma, densidad de partícula, dureza, rugosidad y área superficial.

c) Relación de recirculación

En reactores de lecho fluidizado, el efluente usualmente se recircula, de tal modo que se logre la velocidad de fluidización y la relación utilizada alcance valores moderadamente altos. Las bacterias que llevan a cabo la digestión anaerobia de los contaminantes del agua residual, adheridas a las pequeñas partículas fluidizadas, modifican su densidad, tamaño y forma y, por tanto, su comportamiento hidrodinámico. Así, es necesario fijar la relación de recirculación a la cantidad de microorganismos adheridos, con el fin de mantener una expansión fija del lecho (Diez Blanco *et al.*, 1995).

d) Rendimiento de sólidos biológicos y lodo residual

En un reactor de lecho fluidizado es necesario controlar el crecimiento de biomasa sobre las partículas de soporte. Debido a la gran fuerza de fricción generada entre el líquido y las partículas, algunas veces es posible que grandes cantidades de biomasa adherida sean arrastradas y abandonen el reactor, disminuyendo el rendimiento del proceso o desestabilizando su operación por “lavado” de biopartículas. Para evitar esto, se recomienda incluir un dispositivo de sedimentación, el cual algunas veces sirve como una trampa de partículas.

e) Tiempo de residencia hidráulico

En el caso de un reactor de lecho fluidizado inverso, el medio de soporte fluidizado permite al reactor retener una concentración alta de biomasa y, por tanto, operar a tiempos de retención hidráulica considerablemente reducidos (Chen y Chen, 2000).

Cresson *et al.* (2008) establece que, debido a la competencia entre microorganismos planctónicos y fijos durante la etapa de arranque de un reactor anaeróbico de película fija, un TRH corto parece ser el más indicado para promover la adherencia y el crecimiento de la biomasa fija. Michaud *et al.* (2005) demostraron que un día de TRH inicial, es claramente más favorable que 6 días para la colonización de un soporte móvil por un inóculo metanogénico.

f) Carga orgánica

Un reactor de lecho fluidizado tiene la ventaja de soportar altas tasas de carga orgánica. Generalmente, la tasa de carga orgánica se puede incrementar por disminución del TRH, es decir, incrementando la velocidad del flujo de alimentación, mientras se mantiene constante la concentración de la demanda química de oxígeno a la entrada al reactor.

1.3.2 Reactor de Lecho Semifluidizado

Un Reactor de Lecho Semifluidizado se forma restringiendo la expansión de un lecho fluidizado por medio de una malla o placa perforada que se encuentra en la parte superior del lecho. Formándose de esta manera en la parte superior del lecho un lecho fijo con las partículas cuya expansión está siendo restringida y en la parte inferior se tiene un lecho fluidizado con las partículas que si pueden expandirse. Es decir que un lecho semifluidizado tradicional está compuesto de un lecho fijo en la parte superior y un lecho fluidizado en la parte inferior (Figura 1.3) (Domínguez-Hernández *et al.*, 2015).

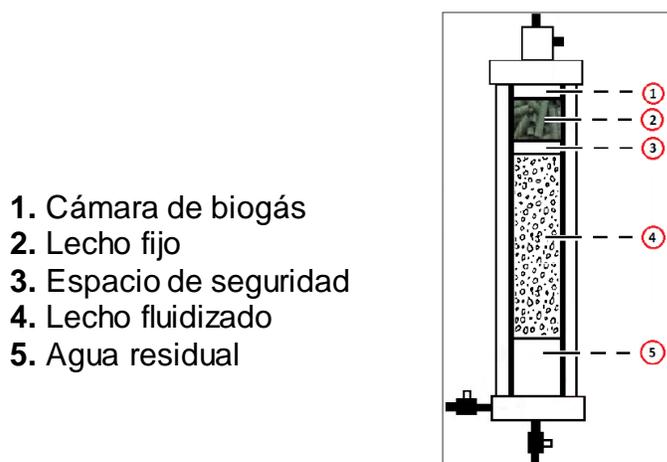


Figura 1.3 Reactor de Lecho Semifluidizado Inverso (RLSFI).

1.3.3 Reactor Híbrido

Los reactores híbridos para el tratamiento de aguas residuales se caracterizan por un diseño que permite la combinación de dos reactores en un mismo equipo, una fracción de biomasa fija y otra en forma de biopelículas, por lo que si se ajusta su diseño adecuadamente puede combinar las ventajas propias de ambos sistemas. El reactor anaerobio híbrido LF/RLFI consta de una primera sección de reactor de Lecho Fijo (LF) y una segunda sección de Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI), ambas dispuestas consecutivamente en una misma unidad.

La sección de LF la conforman, una tapa superior que se une al acoplamiento superior mediante una rosca; y el acoplamiento superior a su vez va unido a dos tubos de acrílico concéntricos. Los componentes se encuentran dispuestos de tal manera que, en la operación del reactor, el ciclo de tratamiento de agua comienza cuando el agua residual es bombeada hacia la sección de lecho fijo pasando a través de la tapa donde llega a los tubos concéntricos y hace contacto con los microorganismos anaerobios adheridos al medio de soporte de esta sección, lo que permite la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual a tratar, generándose CO_2 y metano como productos finales. El agua sigue su recorrido hacia la sección de LFI donde se pone en contacto directo con los microorganismos adheridos al medio de soporte de la misma, los cuales degradan la materia orgánica que no fue degradada por los microorganismos presentes en la sección de LF y, producen también CO_2 y metano como productos finales. Los gases producidos por ambos reactores, fluyen en sentido contrario al del agua residual, pasando por los orificios que constan los acoplamientos, hasta el orificio de extracción que consta la tapa superior. El efluente tratado atraviesa esta sección de LFI y sale a través de las válvulas de salida hacia su disposición final como se muestra en la Figura 1.4

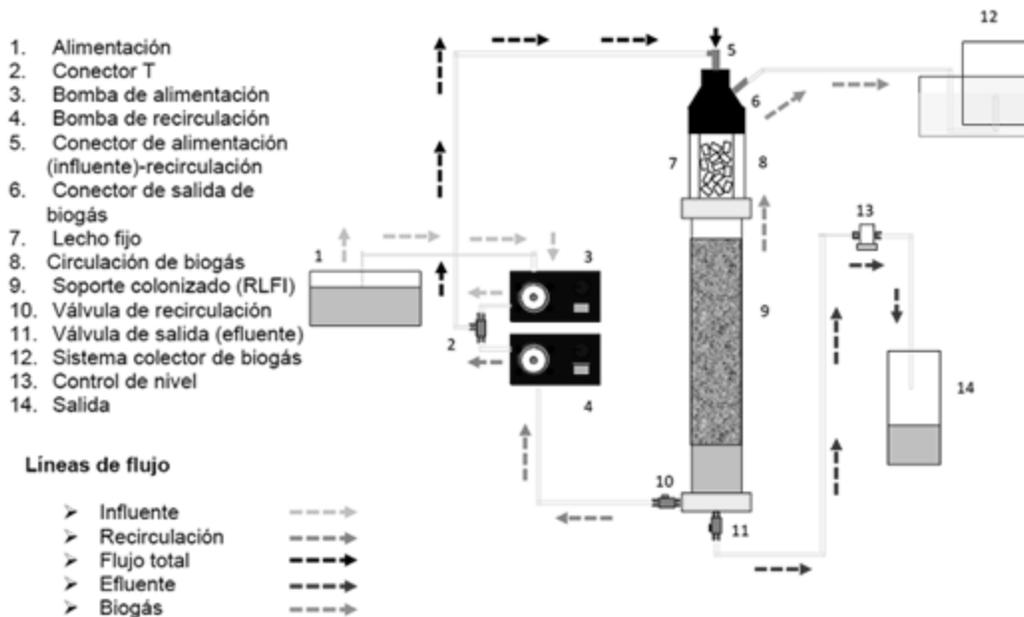


Figura 1.4 Reactor Anaerobio Híbrido (RAH).

1.4 Soportes para reactores tipo Lecho Fluidizado (LF)

El propósito de los medios de soporte o empaque es el de proporcionar un medio sólido y estable para la formación de la biopelícula. Cuando se opera con lechos fluidizados, el aspecto fundamental a considerar, dado el modo de operación de estas tecnologías, es el tamaño de partícula del soporte. El uso del soporte de biomasa permite el reaprovisionamiento parcial del lecho fluidizado sin interrumpir la operación, con el fin de mantener alta actividad microbiana.

Existen diferentes tipos de soportes entre los cuales se encuentran la arcilla, material volcánico, puzolana, bentonita, sepiolita, carbón activado, cerámica, resinas sintéticas, espuma de vidrio, polietileno y Extendsphere™.

Estas partículas, además, deben ser inertes a las sustancias en contacto con él, de manera que no inhiba el crecimiento de la biopelícula, ni que sea atacado por las sustancias presentes a tratar. También deben tener forma y tamaño uniforme para obtener la fluidización uniforme del lecho en toda la longitud del digestor.

En un reactor de lecho fluidizado inverso, existen muchas ventajas que pueden lograrse con partículas de densidad ligeramente menor a la del agua. Sin embargo, un leve incremento en la densidad de las partículas pudiera resultar en un lavado considerable de medio de soporte. De hecho, en la fluidización inversa, la acumulación de biomasa hace a las partículas más pesadas, incrementando la densidad de las partículas y la expansión del lecho. Si hay un exceso o acumulación de biomasa, la densidad de las partículas puede alcanzar $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, pudiendo las partículas ser lavadas del reactor (García-Calderón *et al.*, 1998a).

Las principales finalidades del medio de soporte son:

- Proporcionar un medio sólido y estable para la formación de biopelículas.

- Mejorar el contacto entre el sustrato y los sólidos biológicos contenidos en el reactor.
- Facilitar un flujo uniforme en el reactor.
- Permitir la acumulación de gran cantidad de biomasa.
- Actuar como una barrera física, evitando que los sólidos sean arrastrados por fuera del sistema de tratamiento.
- Actuar como un dispositivo para separar los sólidos de los gases.

1.4.1 Soporte Extendsphere™

Este soporte está hecho de pequeñas partículas de sílice, con una burbuja de aire en el interior, con una densidad de 0.7 g/cm^3 , diámetro promedio de $169 \mu\text{m}$, tamaño de partícula promedio de $100\text{-}400 \mu\text{m}$ y área superficial de $0.0355 \text{ m}^2/\text{g}$. En la Figura 1.5 se observa soporte Extendsphere colonizado.

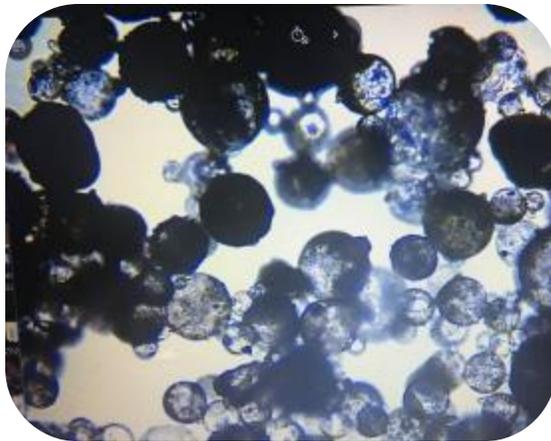


Figura 1.5 Soporte Extendsphere colonizado.

Alvarado-Lassman *et al.*, (2008) evaluaron el desempeño de las partículas de material de Extendsphere y polietileno implementando dos RLFIs, utilizando como sustrato efluentes de la industria cervecera, con soporte de polietileno mostró una remoción de DQO con una carga volumétrica aplicada de 10 gDQO/Ld , mientras que con el soporte

Extendsphere tuvo un comportamiento hidrodinámico y biológico excelente trabajando con cargas orgánicas de hasta 70 gDQO/Ld.

1.5 El fenómeno de la fluidización

El término fluidización está usualmente asociado con un sistema de dos o tres fases, en el cual las partículas sólidas son fluidizadas por una corriente de un líquido o gas fluyendo en sentido contrario a la gravedad.

La manera de retener a los microorganismos dentro del reactor consiste en inmovilizarlos sobre las partículas de un material más pesado que el líquido y después mantenerlos en suspensión utilizando el propio líquido.

La suspensión se consigue cuando el arrastre friccional ejercido por el fluido es equivalente a la gravedad. El fenómeno fisicoquímico denominado "fluidización", transmite la idea de convertir un lecho de materiales particulados finos en un estado similar al fluido al pasar un gas o líquido a través de él. Los fenómenos de transporte en lechos fluidizados tienen varias características complejas que pueden utilizarse con gran beneficio en diversos procesos. Si un líquido pasa a través de un lecho de partículas finas, a velocidades más bajas, el líquido simplemente se filtra a través de los espacios vacíos entre las partículas y esto se conoce como un lecho fijo.

Cuando el desplazamiento de partículas se produce al aumentar la velocidad de flujo del fluido, se conoce como un lecho expandido, las partículas se suspenden a una velocidad más alta en el fluido. La fuerza de flotación actúa como la fuerza de equilibrio entre las fuerzas gravitacionales y de arrastre cuando el lecho está en forma suspendida. Cuando la caída de presión en el lecho se vuelve igual al peso de las partículas, el lecho se considera fluidizado y la velocidad superficial del fluido a la que se observa esta situación se denomina velocidad mínima de fluidización.

Khan *et al* (2014) enuncian una serie de factores influyentes para controlar la calidad de la fluidización:

- En general las propiedades de sólidos y fluidos determinan la suavidad de la fluidización,
- La mezcla de sólidos
- El tamaño de las burbujas
- La geometría del lecho
- El tamaño de las partículas
- Los interiores de los recipientes son otros factores que afectan la fluidización.

1.5.1 Clasificación del Reactor de Lecho Fluidizado (RLF)

En la Figura 1.6 se describe la clasificación del RLF basado en las fases presentes y en la dirección que ocurre la fluidización

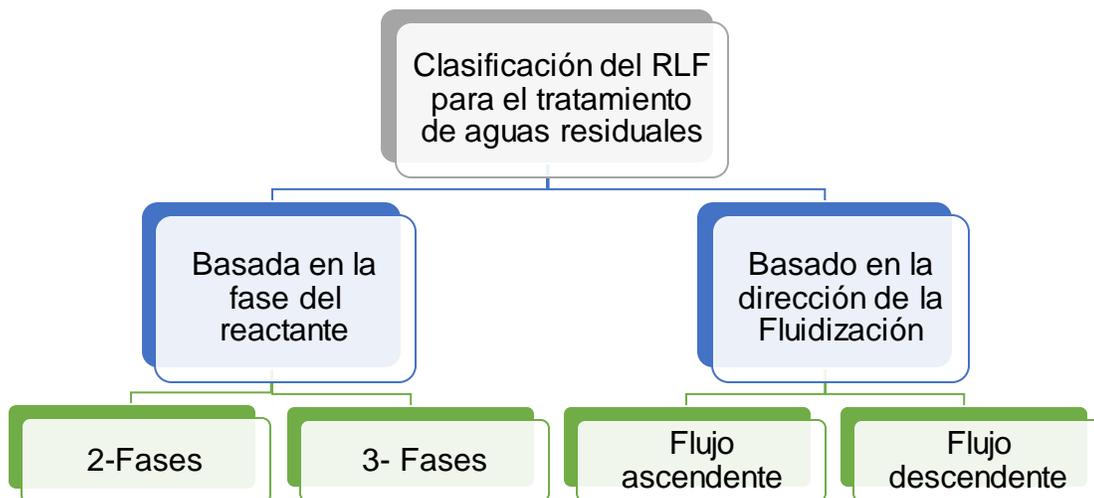


Figura 1.6 Clasificación del Reactor de Lecho Fluidizado

➤ RLF de dos fases versus trifásico

El Reactor de Lecho Fluidizado (RLF) bifásico implica una fase sólido-líquido o gas-sólido donde la fluidización es provocada por el líquido o el gas. En el tratamiento de aguas residuales solo el sistema líquido-sólido es aplicable. La fase sólida podría ser una variedad de materiales de soporte o catalizadores, mientras que la fase líquida es siempre el agua residual. El sistema trifásico en un proceso aeróbico implica un proceso de gas-líquido-sólido donde la aireación u oxigenación se agrega a un RLF líquido-sólido típico. En un RLF de dos fases, la fluidización es proporcionada por el flujo de aguas residuales a través del catalizador o lecho de biomasa. En un sistema trifásico, la fluidización es proporcionada por el flujo contracorriente del líquido y el gas a través del lecho sólido. Sin embargo, el sistema trifásico tiene algunos desafíos, como la elutriación de partículas con un alto flujo de gas y un aumento de la agitación que puede causar la falla del reactor.

➤ Fluidización ascendente versus fluidización descendente / inversa en RLF

El Reactor de Lecho Fluidizado también se puede clasificar según la dirección del flujo de fluido. El RLF convencional utiliza partículas sólidas que son más densas que la fase fluida y la fluidización se logra mediante el flujo de un fluido ascendente desde la parte inferior del reactor. Sin embargo, el RLF_I se introdujo posteriormente para superar algunos desafíos intrínsecos al RLF convencional, como el crecimiento no controlado de biomasa que puede afectar la hidrodinámica de las biopartículas. En RLF_I, la densidad de las partículas sólidas es menor que la fase fluida y la fluidización se logra mediante el flujo de fluido descendente opuesto a la flotabilidad neta de las partículas. Se argumenta que el RLF_I posee características hidrodinámicas superiores a las del RLF convencional. A pesar de ello, el inconveniente de RLF_I es que generalmente requiere una mayor velocidad del fluido superficial (García-Calderón *et al.*, 1998).

1.5.2 Influencia de las condiciones hidrodinámicas

Las condiciones de flujo en el reactor modifican las propiedades físicas de la biopelícula, por consiguiente afectan su estabilidad y el transporte de masa. Si se tienen altas velocidades de flujo (con una misma concentración de sustrato), se tienen biopelículas delgadas y compactas. Conforme se obtiene un incremento en la turbulencia, aumentan la densidad de la biopelícula, su rigidez y su estabilidad mecánica, dando como resultado mayor resistencia al desprendimiento. Esto se puede interpretar como una respuesta biológica en la que las bacterias refuerzan la matriz extracelular para protegerse de las agresivas condiciones hidrodinámicas (Trinet *et al* 1991).

Como consecuencia, se tiene un incremento en la resistencia a la difusión y disminuciones en la transferencia de masa y en la tasa de reacción. Por otro lado, las velocidades bajas favorecen la formación de biopelículas gruesas con una mayor cantidad de biomasa activa, concentrada en las capas exteriores, que consumen grandes cantidades de sustrato.

Sin embargo, son menos resistentes a los esfuerzos mecánicos, por lo que sus capas superficiales pueden ser afectadas fácilmente por las fuerzas cortantes del agua. Esto significa que la mayor parte de la biomasa activa (la de las zonas exteriores) puede ser eliminada durante el proceso de desprendimiento. A pesar de esto, las biopelículas parecen ser menos susceptibles a la carencia de sustrato en ciertos periodos que otras formas de crecimiento microbiano (Bello *et al.*, 2017).

1.6 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Los lechos fluidizados líquidos-sólidos contienen un amplio rango de tamaño de partícula y distribución de la densidad del lecho. Es importante poder predecir la expansión del lecho, la segregación de partículas y la mezcla. Además de estos esfuerzos teóricos y experimentales, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por

sus siglas en inglés ha sido una herramienta poderosa y aumenta en popularidad como un método para modelar la hidrodinámica de flujo en reactores multifásicos con el rápido avance en hardware de computadoras y comprensión física durante las últimas décadas. Por ello en el proceso de diseño de reactores de lecho fluidizado las simulaciones por computadora pueden ser una herramienta útil. Sin embargo, la principal dificultad para modelar lechos fluidizados, es la gran separación de las escalas de longitud y tiempo ya que las estructuras de flujo pueden verse directamente influenciadas por las colisiones partícula-partícula y las interacciones partícula-fluido (Khan *et al.*, 2014).

1.6.1 Fluidización sólido-líquido

La fluidización sólido-líquido es la suspensión de la fase dispersa (sólido) por un fluido en movimiento continuo (líquido). El modelado computacional de un Lecho Fluidizado Sólido-Líquido (LFSL) es desafiante debido a su comportamiento de flujo multifacético e interacciones entre las fases. El análisis numérico que ayuda en el diseño y el rendimiento de los sistemas LFSL es realmente beneficioso.

Es posible debido a los avances en recursos computacionales y al desarrollo de modelos físicos mejorados para interacciones multifásicas (Khan *et al.*, 2015). Específicamente, las simulaciones de CFD se pueden usar para proporcionar detalles completos, como la distribución espacial y temporal de las fracciones de volumen local de líquido y sólidos, las alturas de mezcla de las fases separadas, particularmente en las áreas donde la cuantificación es tediosa o difícil.

1.6.2 Estudios hidrodinámicos en RLF

Estudios anteriores sobre lechos fluidizados inversos de dos fases sólido- líquido se centraron en las características hidrodinámicas, como la velocidad mínima de

fluidización, la caída de presión y la expansión del lecho, en general, se observa que la expansión del lecho aumenta con el incremento de la velocidad superficial del fluido, la altura inicial del lecho y la densidad de las partículas y disminuye con el aumento del tamaño de las partículas (Sivasubramanian, 2010). Estos cambios en la inercia de las partículas generan que la fuerza de flotación aumente y, para contrarrestar esta fuerza, se requiere una mayor energía para mantener las partículas en estado fluidizado en comparación con partículas más densas o de menor tamaño (Ulaganathan y Krishnaiah, 1996; Femin Bendict *et al.*, 1998). Aunque, la caída de presión aumenta con el incremento de las fuerzas de flotación, la capacidad de transferencia de calor y masa se ve mejorada (Nikov y Karamanev, 1991).

Para estas variables se han desarrollado algunas correlaciones basadas en distintas teorías o datos empíricos. Los diferentes modelos de correlación para la expansión del lecho basados en la velocidad superficial del fluido pueden clasificarse en tres grupos principales (Fan *et al.*, 1982). El primer grupo, se basa en correlaciones que dan la dependencia entre velocidad relativa del fluido (U_R) y la porosidad del lecho (ϵ), siendo el modelo de Richardson y Zaki (1954) es el más popular en este grupo. En el segundo grupo de modelos se usa la función de arrastre para el sistema de multipartícula. Por lo general se da en función del número de Reynolds ($Re = d_p U_i \rho_l / \mu_l$) y el número de Archimedes ($Ar = d_p^3 (\rho_l - \rho_s) \rho_l g / \mu_l^2$). Los modelos de Ramamurthy y Subbaraju (1973) y Riba y Couderc (1977) son típicos de este grupo. El tercer grupo de modelos se basa en la dependencia entre ϵ (porosidad del lecho) y las principales variables del lecho fluidizado como en la correlación de Wen y Yu (1966).

Con base en este tipo de modelos se han desarrollado ecuaciones para calcular la magnitud de la expansión de lecho (H/H_0) o la porosidad de la cama de los RLFI. En la Tabla 1.1 se presentan algunas correlaciones desarrolladas para RLFI. Las correlaciones de la expansión del lecho se expresan en una relación entre la velocidad relativa del fluido (U_R) y la porosidad del lecho (ϵ), que es de naturaleza teórica, semi-teórica o empírica como lo representa Fan *et al* (1982) con la Ecuación 1.1, la

predicción basada en Lewis y Bowerman es satisfactoria para el rango de $350 < Re_t < 1250$ e insatisfactoria para el rango de $Re_t > 1250$.

Para predecir la caída de presión del régimen de lecho fluidizado, se debe determinar la altura del lecho fluidizado, H_f . En régimen de lecho totalmente fluidizado, la altura se correlaciona como se muestra en la Ecuación 1.2, donde H_f es la altura del lecho fluidizado, H_o es la altura inicial del lecho, Re es número de Reynolds, Ar es Número de Arquímedes, ρ_l es densidad del líquido y ρ_s densidad del sólido, tal y como lo demostraron Ulaganathan y Krishnaiah (1996).

Los diversos parámetros que afectan la altura del lecho en condiciones totalmente fluidizadas se agrupan en forma de grupos adimensionales, a saber. Femin Benedict *et al* (1998) propusieron una correlación empírica para la predicción de la altura del lecho en condiciones totalmente fluidizadas para líquidos no newtonianos obteniendo una correlación adimensional utilizando el análisis de regresión múltiple lineal para la predicción de la altura del lecho (H_f/H_o) y se proporciona a continuación: tal y como se muestra en la Ecuación 1.3

Campos-Díaz *et al* (2012) emplearon la Ecuación 1.4 para calcular la porosidad del lecho, para partículas esféricas para el rango del número de Reynolds y las porosidades abarcadas por los datos ($5.5 < Re_s < 200$ y $0.375 < \epsilon < 0.928$), donde Ar es el número de Arquímedes y ϵ es la porosidad del lecho. El coeficiente de arrastre inercial se calculó utilizando la ecuación propuesta por Becker (1959) para los valores del número de Reynolds en el rango $5.5 < Re_s < 200$, donde C_i es el coeficiente de resistencia inercial y Re_s es el número de Reynolds superficial.

En la condición completamente fluidizada, la expansión del lecho de la fluidización inversa líquido-sólido está influenciada por varias variables del sistema como diámetro de la partícula (d_M), diámetro de la columna (d_t), propiedades físicas del líquido y del sólido, altura inicial del lecho H_o , velocidad del líquido, esfericidad de la partícula (ϕ_s), aceleración debida a la gravedad (g).

El uso del análisis dimensional de la relación funcional de las variables anteriores se puede reducir a la Ecuación 1.5 desarrollada por Das *et al* (2015).

Tabla 1.1 Correlaciones para calcular la expansión de lecho o la porosidad de la cama, desarrolladas para RFLI.

Autor(es)	Ecuación	Ecu.	Rango
Fan <i>et al.</i> (1982)	$U_R = \varepsilon^n$ $n = 15Re_t^{-0.35} e^{3.9 d_p/D} \text{ para } 350 < Re_t < 1250$ $n = 8.6Re_t^{-0.2} e^{-0.75 d_p/D} \text{ para } Re_t < 1250$	(1.1)	$12.2 < Re_t < 6350$ $1.1 \cdot 10^5 < Ar < 7.65 \cdot 10^6$ $0.062 < d_p/D < 0.250$
Ulaganathan y Krishnaiah (1996)	$\frac{H_f}{H_0} = 0.572Re^{0.92} Ar^{-0.345} [(\rho_l - \rho_s)/\rho_l]^{0.21}$	(1.2)	$10^6 < Ar < 7.0 \cdot 10^7$ $0.4 < (\rho_l - \rho_s)/\rho_l < 0.9$
Femin Bendict <i>et al.</i> (1998)	$\frac{H_f}{H_0} = 2.65Re^{1.258} Ar^{-.88}$	(1.3)	Sin datos
Campos- Díaz <i>et al.</i> (2012)	$1.753\varepsilon^{-3.807} = \frac{Ar}{0.75(24Re + C_l Re^2)}$ $C_l = 2.25 \left(\frac{5.5}{Re_s} \right)^{0.34}$	(1.4)	$5.5 \leq Re \leq 200$ $0.375 \leq \varepsilon \leq 0.928$
Das <i>et al.</i> (2015)	$\frac{H}{H_0} = 0.988 Ar^{-0.2124} Re^{0.4049} \phi_s^{-1.804} \left(\frac{d_t}{d_M} \right)^{0.4613}$	(1.5)	$1.012 \leq H/H_0 \leq 5.212$ $0.0341 \leq Ar_m \leq 985.742$ $0.00594 \leq Re \leq 15.542$ $0.777 \leq \phi_s \leq 1.00$ $8.33 \leq d_t/d_M \leq 23.00$

1.6.3 Modelos computacionales desarrollados para RFLI.

En la actualidad, el diseño y escalamiento de los RLF son en su mayoría procesos totalmente empíricos, debido a la limitada información sobre los fundamentos del flujo partícula-fluido, en los cuales los fenómenos relacionados con las interacciones partícula-fluido (fuerzas de arrastre) y las interacciones partícula-partícula (fuerzas de colisión) aún se encuentran en desarrollo constante (Kuipers y Van Swaaij, 1998).

Si bien los métodos empíricos y experimentales pueden generar resultados confiables con factores de influencia variados, todavía tienen sus propias restricciones: los análisis teóricos tradicionales donde los objetos de cálculo siempre se simplifican, están restringidos por las no linealidades de la hidrodinámica de flujo para obtener soluciones analíticas para sistemas multifásicos; los experimentos están restringidos por un reactor específico, alteración de fluidos, seguridad humana y precisión de medición. Por esta razón, se deben realizar numerosas pruebas preliminares en reactores modelo a escala piloto, lo que es una actividad tardada y, por lo tanto, costosa. Desde el punto de vista de la hidrodinámica de múltiples fases, los lechos fluidizados líquidos-sólidos a menudo se operan en condiciones inestables, como la puesta en marcha y el apagado del reactor, así como el cambio del caudal. Por lo tanto, la información dinámica sobre el proceso de expansión/contracción con un cambio en la velocidad del líquido es necesaria para una mejor comprensión de la hidrodinámica en condiciones inestables (Zhang *et al.*, 2012).

Claramente, no es posible tener un solo método de simulación que pueda cubrir todas las escalas de longitud y tiempo; en su lugar, se necesita una jerarquía de métodos para el modelado de los fenómenos fluido-partícula en diferentes escalas de tiempo y longitud, y por lo tanto también con diferentes niveles de detalle (Ranade, 2001).

Existen dos formas de modelar estos fenómenos mediante simulación CFD, los métodos Euleriano-Lagrangiano y Euleriano-Euleriano dependiendo del marco de referencia empleado para cada una de las fases.

Un modelo E-L resuelve las ecuaciones de movimiento (segunda ley de Newton) para cada partícula en el sistema en el que se toman en cuenta las colisiones partícula-partícula y las fuerzas que actúan sobre la partícula. El enfoque de E-L, que también se reconoce como Modelo de Partículas Discretas (DPM) o Método de Elementos Discretos (DEM) por sus siglas en inglés, considera el fluido como un continuo, mientras que los sólidos se consideran como la fase dispersa. El DPM utiliza el marco de Euleriano para modelar la fase continua y las trayectorias de las partículas se

simulan en el marco Lagrangiano, a pesar de la ventaja de tener una descripción detallada del movimiento de las partículas, los modelos lagrangianos requieren un recursos de cómputo elevados y tiempos de simulación largos para poder obtener valores promedio del campo de flujo, por lo cual son poco empleados en simulaciones de equipos de proceso a escala real o simulaciones tridimensionales.

Una alternativa a esto son los modelos con un enfoque Euleriano-Euleriano, donde ambas fases (sólidos y fluido) se cuentan como un continuo totalmente interpenetrante (Roy *et al.*, 2006; Ahuja y Patwardhan, 2008). Está usualmente representada por el Método de las Diferencias Finitas (FDM).

Este tipo de modelos han sido implementados con éxito en RLF de flujo ascendente para distintos procesos y aplicaciones, una revisión detallada de varios casos de simulación en RLF convencionales puede ser consultada en Deen *et al.* (2007), Van der Hoef *et al.*, (2008), Khan *et al.*, (2014) y Pan *et al.*, (2016). Sin embargo, para reactores de lecho fluidizado inverso a la fecha únicamente se han realizado dos trabajos de simulación CFD que se describen a continuación.

Wang *et al.* (2014), simuló el comportamiento del flujo de partículas en un RLF mediante un modelo bidimensional Euler-Euler que incluye la teoría cinética de flujo granular, empleando el modelo de arrastre de Huilin-Gidaspow (Huilin *et al.*, 2004) y fuerza de masa virtual para obtener la interacción entre fase sólida y líquida. Compararon las predicciones con datos experimentales del perfil de concentración axial de la fase sólida reportado por Renganathan y Krishnaiah (2005), mostrando que el modelo puede capturar el comportamiento de flujo de las fases líquida y sólida en un lecho fluidizado inverso. Las simulaciones indicaron que la velocidad axial de las partículas y la expansión del lecho se incrementan con un aumento de la velocidad del líquido. También se encontraron que la altura y la velocidad del lecho aumentan con el incremento de la viscosidad del fluido que afecta al comportamiento del flujo de las partículas en el lecho.

Recientemente, mediante simulación con un enfoque de Euleriano-Lagrangiano Wang *et al.* (2018) propusieron un modelo bidimensional CFD-DEM para el mismo RLFI analizado por Renganathan y Krishnaiah (2005). En este modelo se empleó el modelo de arrastre de Huilin-Gidaspow y las fuerzas de lubricación, encontrando que el comportamiento de las partículas se divide en tres etapas: las partículas fluyen hacia abajo; las partículas fluyen hacia arriba y se alcanza un equilibrio dinámico en el lecho. La calidad de la fluidización se puede mejorar aumentando la velocidad del líquido, la viscosidad del líquido, el coeficiente de restitución de partículas y la densidad de partículas.

1.6.4 Modelo de flujo Euleriano- Lagrangiano

El modelo de fase discreta Lagrangiano en ANSYS Fluent que es un software de CDF sigue el enfoque de Euleriano-Lagrangiano. La fase fluida se trata como un continuo mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, mientras que la fase dispersa se resuelve mediante el seguimiento de un gran número de partículas, burbujas, o gotitas a través del campo de flujo calculado.

La fase dispersa puede intercambiar impulso, masa y energía con la fase fluida. Un supuesto fundamental realizado en este modelo es que la fase secundaria dispersa ocupa una fracción de volumen bajo, a pesar de una alta carga masiva ($m_{partículas} \geq m_{líquido}$) es aceptable ((Laín, 2008).

1.6.5 Modelo de flujo Euleriano- Euleriano

En el planteamiento Euleriano-Euleriano las diferentes fases son tratadas matemáticamente como continuas. Dado que el volumen ocupado por una de las fases no puede ser ocupado por las otras fases, se utiliza el concepto de fracción de volumen y se asume que las fracciones de cada una de las fases presentes son funciones continuas del espacio y tiempo y que su suma es igual a la unidad.

Las ecuaciones de conservación para cada fase se derivan para obtener un conjunto de ecuaciones, que tienen una estructura similar para todas las fases. Este conjunto de ecuaciones es resuelto mediante el uso de relaciones constitutivas obtenidas a partir de datos empíricos o en el caso de flujos granulares mediante la teoría cinética. (Zamora Pina, 2016)

➤ **Modelo Euleriano fluido-sólido**

El modelo Euleriano soluciona un conjunto de n ecuaciones de momento y continuidad para cada fase. El acoplamiento se logra a través de los coeficientes de intercambio de presión e interfase. Para flujos granulares, las propiedades se obtienen de la aplicación cinética. El modelo consta de las siguientes consideraciones:

- a) El campo de presión es compartido por todas las fases.
- b) Las ecuaciones de movimiento y continuidad se resuelven para cada fase.
- c) La temperatura granular (energía fluctuante de sólidos) se puede calcular para cada fase sólida.
- d) El corte y las viscosidades en fase sólida se obtienen aplicando la teoría cinética a los flujos granulares.

➤ **Ecuaciones Gobernantes**

El modelo implementado para un RLFI se resume en las Tablas 1.2 y 1.3. Este modelo involucra un conjunto de dos ecuaciones de continuidad (Ecuaciones 1.6 y 1.7) donde y conservación de movimiento (ecuaciones 1.8 - 1.10), además de un conjunto de ecuaciones constitutivas necesarias para cerrar las ecuaciones de movimiento como son: el tensor de esfuerzos de la fase líquida (τ_l , Ecuación 1.9), el tensor de esfuerzos de la fase sólida (τ_s , Ecuación 1.11) y el intercambio de momento entre las fases sólida y líquida, que es función de la masa virtual (f_m), y fuerza de arrastre (β).

La fuerza de masa virtual (Ecuación. 1.12) actúa sobre una partícula cuando una fase secundaria se acelera en relación con la fase primaria, la inercia de la masa de la fase primaria encontrada por las partículas aceleradoras, este efecto es significativo cuando la densidad de fase sólida es mucho menor que la densidad de fase líquida.

Tabla 1.2 Ecuaciones de conservación para ambas fases.

	Ecuación	Ecu.
Ecuaciones de continuidad	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_l \rho_l) + \nabla \cdot (\varepsilon_l \rho_l \vec{u}_l) = 0$	(1.6)
	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{u}_s) = 0$	(1.7)
Ecuaciones de conservación de movimiento	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_l \rho_l \vec{u}_l) + \nabla \cdot (\varepsilon_l \rho_l \vec{u}_l \vec{u}_l)$ $= -\varepsilon_l \nabla p + \nabla(\varepsilon_l \cdot \tau_l) + \varepsilon_l \rho_l \vec{g} + \beta(\vec{u}_s - \vec{u}_l)$	(1.8)
	$\tau_l = \mu_l [\nabla \cdot \vec{u}_l + (\nabla \cdot \vec{u}_l)^T] - \frac{2}{3} \mu_l (\nabla \cdot \vec{u}_l) I$	(1.9)
Ecuaciones de conservación de movimiento	$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s \vec{u}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{u}_s \vec{u}_s)$ $= -\varepsilon_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla(\varepsilon_s \cdot \tau_s) + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + f_m$ $+ \beta(\vec{u}_l - \vec{u}_m)$	(1.10)
	$\tau_s = \mu_s [\nabla \cdot \vec{u}_s + (\nabla \cdot \vec{u}_s)^T] - \frac{2}{3} \mu_s (\nabla \cdot \vec{u}_s) I + \xi_s \nabla \cdot \vec{u}_s I$	(1.11)
Masa virtual	$f_m = -0.5 \varepsilon_s \rho_l \left(\frac{du_l}{dt} - \frac{du_s}{dt} \right)$	(1.12)

La precisión de estos modelos depende principalmente del modelo de fuerza de arrastre seleccionado, siendo uno de los términos importantes en las ecuaciones de movimiento. Existen varios modelos de arrastre para el coeficiente de intercambio de interfase sólido-líquido dentro de los cuales se encuentran los modelos de arrastre: Gidaspow (1994) y Syamlal y O'Brien (1989), utilizando las ecuaciones (1.13)-(1.15) y la ecuación. (1.16)-(1.19), respectivamente.

Tabla 1.3 Modelos de arrastre de las partículas sólidas empleados.

Modelo	Ecuaciones	Ecu.
Modelo de arrastre de Gidaspow (1994)	$\beta = \begin{cases} \frac{3\varepsilon_s \varepsilon_l \rho_l}{4d_p} C_D \vec{u}_s - \vec{u}_l \varepsilon_l^{-2.65} & , \varepsilon_l > 0.8 \\ 150 \frac{\varepsilon_s (1 - \varepsilon_l) \mu_l}{\varepsilon_l d_p^2} + 1.75 \frac{\rho_l \varepsilon_s \vec{u}_s - \vec{u}_l }{d_p} & , \varepsilon_l \leq 0.8 \end{cases}$	(1.13)
	$C_D = \frac{24}{Re_k} [1 + 0.15(Re_k)^{0.687}]$	(1.14)
	$Re_s = \frac{\rho_l d_p \vec{u}_s - \vec{u}_l }{\mu_l}$	(1.15)
Modelo de arrastre de Syamlal and O'Brien (1989)	$\beta = \frac{3\varepsilon_s \varepsilon_l \rho_l}{4v_{r,s}^2 d_p} C_D \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) \vec{u}_s - \vec{u}_l $	(1.16)
	$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{Re_s}{v_{r,s}}}} \right)^2$	(1.17)
	$v_{r,s} = 0.5 \left(A - 0.060 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s (2B - A) + A^2} \right)$	(1.18)
	$A = \varepsilon_l^{4.14}; \quad B = \begin{cases} 0.8 \varepsilon_l^{1.28} & , \varepsilon_l \leq 0.85 \\ \varepsilon_l^{2.65} & , \varepsilon_l > 0.85 \end{cases}$	(1.19)

CAPÍTULO 2.
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describe la metodología así como las actividades planteadas para cumplir con los objetivos programados, para la realización de este estudio se aplicará de la metodología descrita en la Figura 2.1.

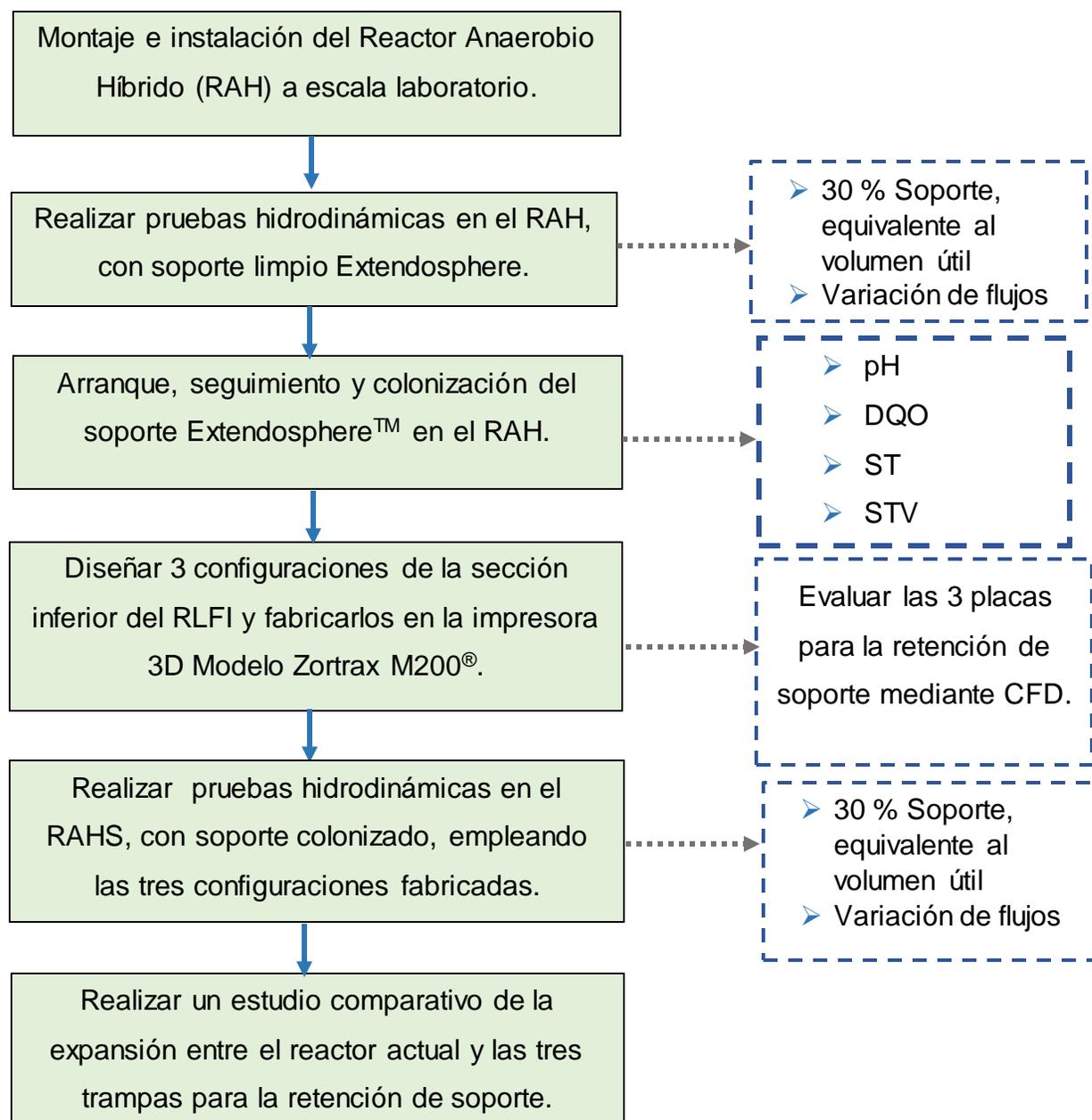


Figura 2.1 Diagrama general de la Metodología

2.1 Diseño y construcción del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)

El RAH fue diseñado a escala laboratorio constituido por dos secciones, en la parte superior un Lecho Fijo (LF) y en la parte inferior un Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RFLI) como se muestra en la Figura 2.2. Esta configuración permite tratar efluentes con alto contenido de carga orgánica, cuyos beneficios son lograr una mejor distribución del flujo a través del reactor mediante el LF, retener una mayor cantidad de sólidos en el LF, así como generar una biopelícula resistente en las dos secciones

El LF fue diseñado a partir de un tubo de acrílico con longitud de 23 cm y diámetro nominal de 7.62 cm (3 in) y como medio de soporte 330 anillos poliméricos con longitud promedio de 2.75 cm recubiertos con esmalte acrílico para mejorar la adhesión de la biopelícula.

El RFLI fue construido con un tubo de acrílico de 80 cm de longitud y diámetro nominal de 8.89 cm (3.5 in), se empleó como medio de soporte una arena sílica llamada Extendsphere™ con un diámetro promedio de 169 μm , un área superficial específica de 20,000 m^2/m^3 y densidad de 0.7 gr/cm^3 . Este soporte fue seleccionado porque tiene una densidad inferior al agua y su forma esférica permite una expansión más homogénea del lecho. Es nombrado lecho fluidizado inverso, puesto que, a diferencia de los sistemas tradicionales, el flujo es alimentado por la parte superior del reactor y el lecho al poseer una densidad menor a la del agua tiende a flotar, logrando que sus partículas finas sean fácilmente fluidizadas para promover un mayor contacto entre la biopelícula y la materia orgánica presente en el agua residual.

El biogás producido en el lecho fluidizado inverso asciende por un tubo de acrílico con longitud de 19.5 cm y diámetro nominal de 10.16 cm (4 in) que recubre al lecho fijo para ser captado en un sistema de desplazamiento gas-líquido.

Durante el periodo de operación del reactor, se instaló un sistema de control para el nivel del lecho fluidizado inverso, debido a que éste tiende a desplazarse dependiendo de la presión generada en el interior del reactor, así mediante este sistema se alcanzó la estabilización del nivel del lecho fluidizado.

Para la alimentación y recirculación del efluente se emplearon dos bombas peristálticas Masterflex/Cole-Parmer respectivamente.

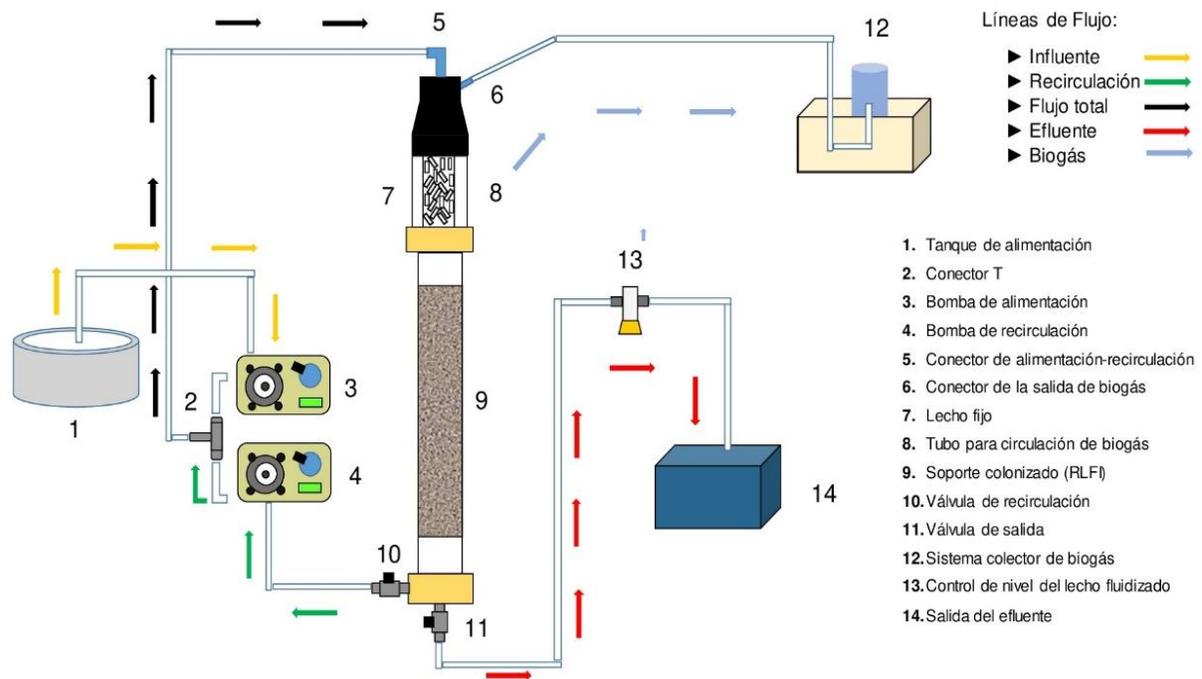


Figura 2.2 Diagrama del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH) y sus líneas de corriente.

2.2 Diseño y construcción de tres configuraciones para la retención de soporte de la sección inferior del RLFI

Se diseñaron tres configuraciones diferentes para ser colocadas en la sección inferior del RLFI a una distancia del 85 % del volumen total de trabajo, a fin de abarcar la mayor expansión posible del lecho, empleando la paquetería de diseño SolidWorks

2017, considerando para su diseño un diámetro interno del reactor de 8.2 cm, y una altura máxima de 8 cm en cada diseño propuesto.

Las tres configuraciones diseñadas para la retención de soporte a) Cono invertido, b) Cono invertido con placa y c) Placa perforada con orificios fueron propuestas a modo de que su geometría permitiera la circulación del flujo, sin taponamientos en las mismas. Además de que fueran manejables y sencilla su colocación dentro de reactor.

Seguidamente fueron exportadas al programa Z-SUIT el cual permitió convertir los diseños a modelos de impresión 3D, permitiendo así realizar ajustes de impresión además de conocer los tiempos requeridos de impresión y material necesario para la construcción de cada pieza.

Posteriormente, fueron fabricadas en una impresora 3D Modelo Zortrax M200®, empleando como material de construcción Z-ULTRAT, el cual consiste en un filamento duradero compuesto de plástico Acrilonitrilo Butadieno Estireno o ABS (por sus siglas en inglés), llamado plástico de ingeniería debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes, y policarbonato.

2.2.1 Evaluación de las tres configuraciones para la retención de soporte empleando CDF (Dinámica de Fluidos Computacionales)

Las geometrías de las trampas para la retención de soporte fueron creadas usando SolidWorks, para después exportarlas a ANSYS DM con el propósito de extraer los dominios de flujo. Los dominios computacionales de cada configuración fueron mallados en el módulo ANSYS Meshing.

Para modelar el flujo bifásico (sólido-líquido) en las trampas, se empleó el modelo *Mixture-Laminar* disponible en ANSYS Fluent. Este modelo acopla la teoría cinética de

flujo granular de dos fluidos en un esquema Euleriano-Euleriano. Para representar el arrastre de las partículas sólidas se usó el modelo de Syamlal y O'Brien (1989), el cual ha demostrado predecir adecuadamente la distribución de sólidos en los reactores de lecho fluidizado convencional e inverso. Como condiciones de frontera se consideraron: 1) una velocidad lineal de entrada de 3 m/h para ambas fases, 2) una fracción volumen de sólidos de 0.05 siguiendo las recomendaciones de Rodríguez-Pérez (2018) y 3) como condición de salida se estableció la presión atmosférica, en las paredes se usó la condición de no deslizamiento, para la fase líquida se usó la condición límite de deslizamiento parcial de Johnson y Jackson. Por otro lado, las partículas de sólidos (Extendsphere™) fueron consideradas en las simulaciones con una densidad de 950 g/mL, un diámetro de 189 μm y forma esférica.

El esquema SIMPLE para fases acopladas se utilizó para el acoplamiento de velocidad-presión, para discretizar los términos de las ecuaciones gobernantes se empleó el esquema QUICK. Se realizaron simulaciones transitorias con un tamaño de paso de tiempo de 0.01 s y los criterios de convergencia en 1×10^{-3} . El tiempo de simulación se estableció en 43200 s, tiempo suficiente para alcanzar el estado estacionario en todos los sistemas analizados.

2.3 Pruebas hidrodinámicas con soporte Extendsphere del RAH

Las características de fluidización y la expansión del lecho son parámetros hidrodinámicos importantes que deben ser considerados para el buen desempeño de los RLF. Se realizaron diferentes pruebas hidrodinámicas de expansión de lecho, dichas pruebas se llevaron a cabo usando 30 % de Extendsphere™ como medio de soporte equivalente al 30 % del volumen útil. Se fluidizó con soporte sin colonizar, soporte colonizado en presencia de biogás y sin biogás.

2.3.1 Expansión con soporte limpio

Las características de fluidización y la expansión del lecho son parámetros hidrodinámicos importantes que deben ser considerados para el buen desempeño de los reactores de lecho fluidizado inverso.

El material de soporte utilizado fue Extendsphere[®], son pequeñas partículas de sílice con una burbuja de aire en el interior el cual presenta características que se muestran en la Tabla 2.1. Este soporte fue seleccionado porque tiene una densidad inferior al agua y su forma esférica permite una expansión más homogénea del lecho. El soporte fue lavado con agua para eliminar las impurezas que contenía.

Tabla 2.1 Propiedades físicas del Extendsphere[®]

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	0.7
Diámetro promedio	µm	169
Tamaño de partícula promedio	µm	100-400
Área superficial	m ²	0.0355

Luego de ser instaladas las mangueras, válvulas y bomba en el reactor, se debe verificar que no existan fugas en ninguna de las conexiones, para poder realizar las pruebas hidrodinámicas con soporte sin colonizar. Para la realización de las pruebas hidrodinámicas se introdujo al reactor 1056 cm³ de Extendsphere sin colonizar, equivalente a 30 % del volumen útil. Una vez que el lecho alcanzó su mayor compactación aproximadamente después de 1 h de reposo, se hizo pasar un flujo de agua a diferentes velocidades través del mismo, de menor a mayor. Con cada variación de velocidad en el flujo se dejó que el lecho se expandiera por 20 minutos para lograr la expansión máxima del lecho. En la Tabla 2.2 se muestran los flujos utilizados en las pruebas hidrodinámicas.

Tabla 2.2 Flujos utilizados en las pruebas hidrodinámicas

Ensayo	Flujo (mL/min)
1	6
2	35
3	66
4	95
5	137
6	176
7	210
8	249
9	287
10	325

2.3.2 Expansión con soporte colonizado sin biogás

Se utilizó soporte colonizado extraído del RLF1 de planta piloto de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos municipales, situada en el Instituto Tecnológico de Orizaba, a dicho soporte se le determinó Materia Volátil Adherida (MVA) a su vez se observó con un microscopio digital QUASAR modelo Qm10 starter para poder observar el desarrollo de la biopelícula

Para la realización de la determinación de expansión, se montaron las tres configuraciones diseñadas y fabricadas al 85 % de expansión del lecho total. A su vez se introdujeron 1056 mL de soporte colonizado y se siguió la misma metodología que con el soporte sin colonizar, haciendo pasar un flujo de agua a diferentes velocidades y determinando el cambio de altura en el lecho.

2.3.3 Expansión con soporte colonizado con biogás

Para esta determinación se alimentó el RLSFI por un periodo de 35 días en modo Batch, a una temperatura de 35°C, empleando una Cva de 5 gDQO/Ld, con sustrato hidrolizado de RSO proveniente de un reactor de hidrólisis ubicado en Planta Piloto de Instituto Tecnológico de Orizaba.

2.4 Monitoreo del Reactor Anaerobio Híbrido

La inoculación tuvo por objetivo desarrollar la biopelícula en ambas secciones del reactor (LF/RLF) y lograr su estabilización. La inoculación se realizó tomando en consideración el volumen total de la sección del RLF debido a que se debe inocular un 30 % (soporte no colonizado + colonizado). Para la etapa de inoculación y arranque se empleó el efluente hidrolizado de frutas y verduras, que fue obtenido de los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) del mercado Emiliano Zapata de Orizaba, Veracruz, México. Los RSO fueron reducidos de tamaño y triturados hasta formar un semisólido pastoso, y la porción líquida fue separada y filtrada para obtener la fracción líquida. Esta fracción fue alimentada a un reactor de hidrólisis a escala piloto, localizado en el Instituto Tecnológico de Orizaba, para obtener un efluente hidrolizado de frutas y verduras.

Se extrajeron 1200 mL de soporte colonizado del RLF de Planta Piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba, los cuales fueron colocados dentro de la columna del reactor. Se inició la alimentación del RAH con el efluente hidrolizado de frutas y verduras provenientes del reactor de hidrólisis por un periodo de 35 días con una Cva de 5 gDQO/Ld y pH neutro.

Alvarado-Lassman *et al.*, (2008) recomiendan iniciar la alimentación con cargas menores a 10 gDQO/Ld para tener una mejor expansión del soporte. En la operación y seguimiento se monitorearon los siguientes parámetros al influente y efluente: pH, DQO total, DQO soluble, ST, STV.

2.5 Determinaciones analíticas en el monitoreo del RAH

Tabla 2.3 Parámetros evaluados en el efluente y soporte colonizado

FÍSICOS	UNIDAD	MÉTODO
pH	-	Potenciométrico 4500-H ⁺ B Standard Methods
Sólidos Totales (ST)	g/L	Gravimétrico
Sólidos Totales Volátiles (SV)	g/L	Gravimétrico
QUÍMICOS	UNIDAD	MÉTODO
DQO Total (DQO _T)	g/L	Micrométodo Colorimétrico 5220 D Standard methods
DQO Soluble (DQO _s)	g/L	

2.5.1 Medición de pH

El principio básico de la medida electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medición potenciométrica usando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia.

Para la determinación del pH se llevó a cabo utilizando un potenciómetro marca OAKTON modelo pH 700, el cual se calibra con solución tampón de pH 4.0, 7.0 y 10.0, siguiendo el método Potenciométrico 4500-H⁺ B *Standard Methods*.

2.5.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO_T y DQO_s)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es un parámetro analítico de contaminación que mide el material orgánico en una muestra líquida mediante oxidación, la cual se determinó por el método colorimétrico 5220 D *Standard Methods* y utiliza al dicromato de potasio en medio ácido (H₂SO₄) como agente oxidante, en presencia de sulfato de plata y sulfato mercuríco como catalizadores en la ebullición, se llevó a cabo en una placa digestora ODYSSEY DR2500 marca HACH a 150 °C durante 2 horas. Después se leyeron las muestras en un espectrofotómetro HACH DR/2500 a 620 nm.

Para efectuar la DQO soluble, se tomaron 7 mL de muestra y se colocaron en una centrífuga HERMLEZ 383 a 3500 rpm durante 5 minutos, se tomó el sobrenadante para realizar la DQO soluble. Las concentraciones de DQO total y soluble se analizaron en un espectrofotómetro HACH a 620 nm.

Se determinó la DQO total y DQO soluble del agua a la entrada y salida del reactor para poder evaluar los porcentajes de remoción de materia orgánica asociada con la colonización del soporte y estabilización del mismo, para ello se empleó la siguiente fórmula tanto para remoción de DQO total como DQO soluble

$$\% \text{ Remoción DQO} = \frac{(DQO_{\text{entrada}} - DQO_{\text{salida}})}{DQO_{\text{entrada}}} * 100 \quad (2.1)$$

2.5.3 Determinación de Sólidos Totales y Sólidos Totales Volátiles (ST y STV)

Los Sólidos Totales se definen como el material residual después de evaporación y secado de una muestra a cierta temperatura, esta determinación se realizó mediante la técnica gravimétrica NMX-AA-034-SCFI-2015. Para los ST se tomaron 3 mL de muestra y se colocaron en un crisol a peso constante, después la muestra se evaporó en una estufa marca Riossa a una temperatura de 105 °C durante 24 horas

El aumento de peso sobre el peso del crisol vacío representa los Sólidos Totales y el cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

$$ST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{M_3 - M_1}{V} \cdot 1000 \quad (2.2)$$

Dónde:

M₁= Peso del crisol a peso constante (g)

V= Volumen de la muestra (mL)

M₃= Peso del crisol a peso constante + Peso de la muestra seca (g)

De la misma forma que los ST la determinación de STV se realizó mediante la técnica gravimétrica NMX-AA-034-SCFI-2015, para lo cual el residuo producido en la determinación de ST, fue calcinado a 550 °C en una mufla marca Barnstead/Themolyne modelo Furnace 1300, durante dos horas. El peso perdido en el crisol tras la incineración del residuo seco, representa el contenido en Sólidos Totales Volátiles; se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$STV \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{M_3 - M_4}{V} \cdot 1000 \ 000 \quad (2.3)$$

Dónde:

M₃= Peso del crisol a peso constante + Peso de la muestra seca (g)

V= Volumen de la muestra (mL)

M₄= Peso del crisol a peso constante + Peso de la muestra calcinada (g)

2.5.4 Determinación de Materia Volátil Adherida (MVA)

Se determinó la Materia Volátil Adherida al soporte del Reactor Anaerobio Híbrido por el método gravimétrico de sólidos volátiles. Se tomó una muestra de 3 mL de soporte con una jeringa, después de que se separara el agua se determinó visualmente el volumen real de soporte que contenía la muestra, posteriormente se depositó en un

sobre de aluminio a peso constante para llevarlo a la estufa a 105° C por 24 horas y al finalizar a la mufla por 2 horas a 550° C.

Con esta determinación se obtuvo la cantidad de Sólidos Volátiles (SV) adheridos al medio de soporte, el resultado se reportó en g de biomasa/mL de soporte.

2.5.5 Composición de biogás

Para medir el contenido de metano, se determinó la composición de biogás en un cromatógrafo de gases Buck 310 compuesto por una columna capilar de All Tech CRTI, de 6 in de longitud y ¼ in de diámetro, la cual detecta CH₄, CO₂, O₂ y N₂. La dosis de inyección directa fue de 2 mL y las condiciones de operación fueron: la utilización de helio a 70 psi como gas de acarreo, la temperatura de la columna a 36 °C y la temperatura del detector a 121 °C.

2.6 Estudio comparativo de las tres configuraciones evaluadas

Realizar un estudio comparativo de los resultados obtenidos de las pruebas hidrodinámicas para evaluar el mejoramiento de la fluidización entre el reactor actual y el reactor empleando las tres configuraciones diseñadas para la retención de soporte colonizado en la sección inferior del RLFI.

CAPÍTULO 3.
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diseño y construcción del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)

Se montó el Reactor Anaerobio Híbrido (RAH) con cada sección como se muestra en la Figura 3.1. La parte superior estuvo conformado por un Lecho Fijo (LF), con un volumen total de 1.05 L de los cuales el 75 % fue ocupado por los anillos de material polimérico para que sirviera de medio de soporte bacteriano y realizar las funciones de distribuidor de flujo. El LF consta de dos tubos de acrílico concéntricos para que la parte interior del tubo central contuviera el medio de soporte como se observa en la Figura 3.2 (a) mientras que por la corona exterior del mismo tubo sirviera como medio de circulación del biogás generado durante el proceso de digestión anaerobia (Figura 3.2 (b))



Figura 3.1 Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)



(a)



(b)

Figura 3.2 (a) Tubos concéntricos conformando el LF (b) LF y accesorios.

En la Tabla 3.1 se muestran las longitudes y volúmenes que conforman el LF.

Tabla 3.1 Dimensiones del Reactor de Lecho fijo (LF)

Longitud (cm)	23
Diámetro (in)	3
Diámetro (cm)	7.62
Volumen total (L)	1.05
Volumen útil (L)	0.26
Volumen ocupado (L)	0.79

El de Reactor Lecho Fluidizado Inverso (RLFI) que ocupó la parte inferior del RAH como se muestra en la Figura 3.3, tiene un volumen total de 4.96 L, de los cuales el 20 % fue para la cámara de biogás, el 30 % fue para el lecho (soporte colonizado) y 50 % para el volumen útil como se describe a detalle en las Tablas 3.2 y 3.3.



Figura 3.3 Sección de Lecho Fluidizado Inverso (LFI).

Tabla 3.2 Dimensiones del RLFI.

Longitud (cm)	80
Diámetro (in)	3.5
Diámetro (cm)	8.89
Volumen total (L)	4.3
Longitud lecho (cm)	20
Volumen de líquido (L)	2.4
Volumen lecho (L)	1.05
Soporte limpio (L)	1.2
Soporte colonizado (L)	0.3

Tabla 3.3 Distribución porcentual del RLFI.

	Cámara de Biogas	Lecho	Volumen de Líquido	Total
Longitud (cm)	15	20	45	80
Volumen (L)	0.8	1.06	2.4	4.3
%	20	25	55	100

3.2 Diseño y construcción de las tres configuraciones de la sección inferior del RAH

Se diseñaron tres configuraciones de placas para ser colocadas en la sección inferior de RAH las cuales fueron: a) Cono invertido, b) Cono invertido con placa y c) Placa perforada con orificios, para retener el soporte sin colonizar y colonizado dentro del mismo, cuando éste se encuentra fluidizado, dichas configuraciones fueron diseñadas, considerando el diámetro interno del reactor (8.2 cm), y la ranura para la sujeción de las mismas a la pared del reactor, implementando la paquetería de diseño SolidWorks 2017.

3.2.1 Primera configuración. Cono invertido

Se nombró como invertido a este diseño al colocar el cono dentro del reactor con la boquilla en la parte superior, con el propósito de retener los sólidos en las paredes del cono, para ello la boquilla del cono tuvo un diámetro interno de 1.2 cm considerando como base para su diseño, la placa con orificios de 0.6 cm de diámetro implementada por Emilio-Domínguez (2016) para formar un lecho semifluidizado en un Reactor de Lecho Fluidizado Inverso utilizado para el tratamiento de residuos citrícolas para la producción de biogás, con ello el diámetro permite la correcta circulación del flujo sin que exista taponamiento.

La base del cono tuvo un diámetro de 7.9 cm, mientras que su altura fue de 1.3 cm, en medio de la base se encuentra una ranura de 0.3 cm en la cual se colocó el oring de nitrilo con un diámetro de 0.6 cm, el cual permitió la sujeción de la pieza del cono a las paredes del reactor, dándole estabilidad dentro del mismo sin que resbalara. La pieza del cono tuvo una altura de 6.3 cm tal y como se muestra en los diagramas de la Figura 3.4 especificando los diámetros y medidas del cono, siendo situada dentro del reactor a una distancia del 85 % del volumen de trabajo.



Figura 3.4 Diagrama de la configuración del cono invertido.

3.2.2 Segunda configuración. Cono invertido con placa

La siguiente configuración tiene similitud a la primera, es decir se implementó para su diseño, las mismas características del cono, teniendo la base del cono un diámetro de 7.9 cm y una altura de 1.3 cm, en medio del contorno de la base del cono se encuentra una ranura de 0.3 cm en la cual se colocó el oring de nitrilo con un diámetro de 0.6 cm, el cual permitió la sujeción de la pieza del cono a las paredes del reactor, dándole estabilidad dentro del mismo. Mientras que boquilla del cono tuvo un diámetro interno de 1.2 cm considerando como base para su diseño, la placa con orificios de 0.6 cm implementada por Emilio-Domínguez (2016).

Para la sujeción de la placa fueron empleados 4 soportes con una altura de 7 cm y un diámetro de 0.6 cm, suficiente grosor para evitar que estos se quebraran al manipular la pieza. Para poder colocar los soportes, fueron marcados 4 orificios tanto en la placa como en las paredes del cono con diámetros de 0.8 cm para que empotraran los soportes. La placa tuvo un diámetro de 5.8 cm y una altura de 0.8 cm, su diámetro fue menor al del cono, esto para que el flujo del líquido circulara hacia los costados y cayera por las paredes del cono. El propósito de agregar la placa al diseño fue retener soporte y partículas sólidas dentro del reactor y éstas se incorporarán nuevamente al lecho. Las piezas fueron impresas por separado, para evitar pérdidas de material, y mayor estabilidad de las mismas. En la Figura 3.5 se muestran los diagramas de del diseño de cono invertido con placa con sus respectivas medidas.



Figura 3.5 Diagrama de la configuración del cono invertido con placa.

3.2.3 Tercera configuración. Placa perforada con orificios

El diseño de placa perforada con orificios está compuesta de dos partes, unidas mediante 4 soportes. En la parte superior del diseño se encuentra una placa perforada con orificios, la cual fue diseñada con base a la placa con orificios de 0.6 cm de diámetro implementada por Emilio-Domínguez (2016) en un RLF. Para ello los 5 orificios con los que consta la placa tuvieron un diámetro de 1.2 cm para tener una correcta circulación del fluido sin ningún tipo de taponamiento. El fluido al encontrarse primeramente con ésta placa, fue de utilidad, ya que la placa cumplió con su función al retener parte de la biomasa que se desprendió del lecho, así como el soporte no colonizado y colonizado que pudiera haber abandonada el reactor.

Seguidamente la parte inferior del diseño se refiere a una placa circular con un diámetro de 8.2 cm de base, y 1.1 cm de altura, en medio del contorno de la base de la placa, se encuentra una ranura de 0.3 cm, donde se colocó el oring de nitrilo que tuvo un diámetro de 0.6 cm, el cual permitió la sujeción de la pieza del cono a las paredes del reactor, dándole estabilidad dentro del mismo. De igual forma que en la placa superior, el fluido circuló sin taponamientos al atravesar un orificio de 1.2 cm de diámetro situado en el centro de la placa, además de que ésta placa retuvo la biomasa y soporte que no logró retener la primera placa.

La altura de los soportes implementados para la unión de las dos partes del diseño, fue de 6.9 cm, con un grosor de 0.6 cm, lo suficientemente resistentes para soportar el peso de ambos diseños. Para poder colocar los soportes, fueron marcados 4 orificios de 0.8 cm de diámetro, tanto en la placa inferior como en la superior para que empotraran los soportes. En la Figura 3.6 se muestran los diagramas que conforman el diseño de placa perforada con orificios así como sus respectivas medidas.

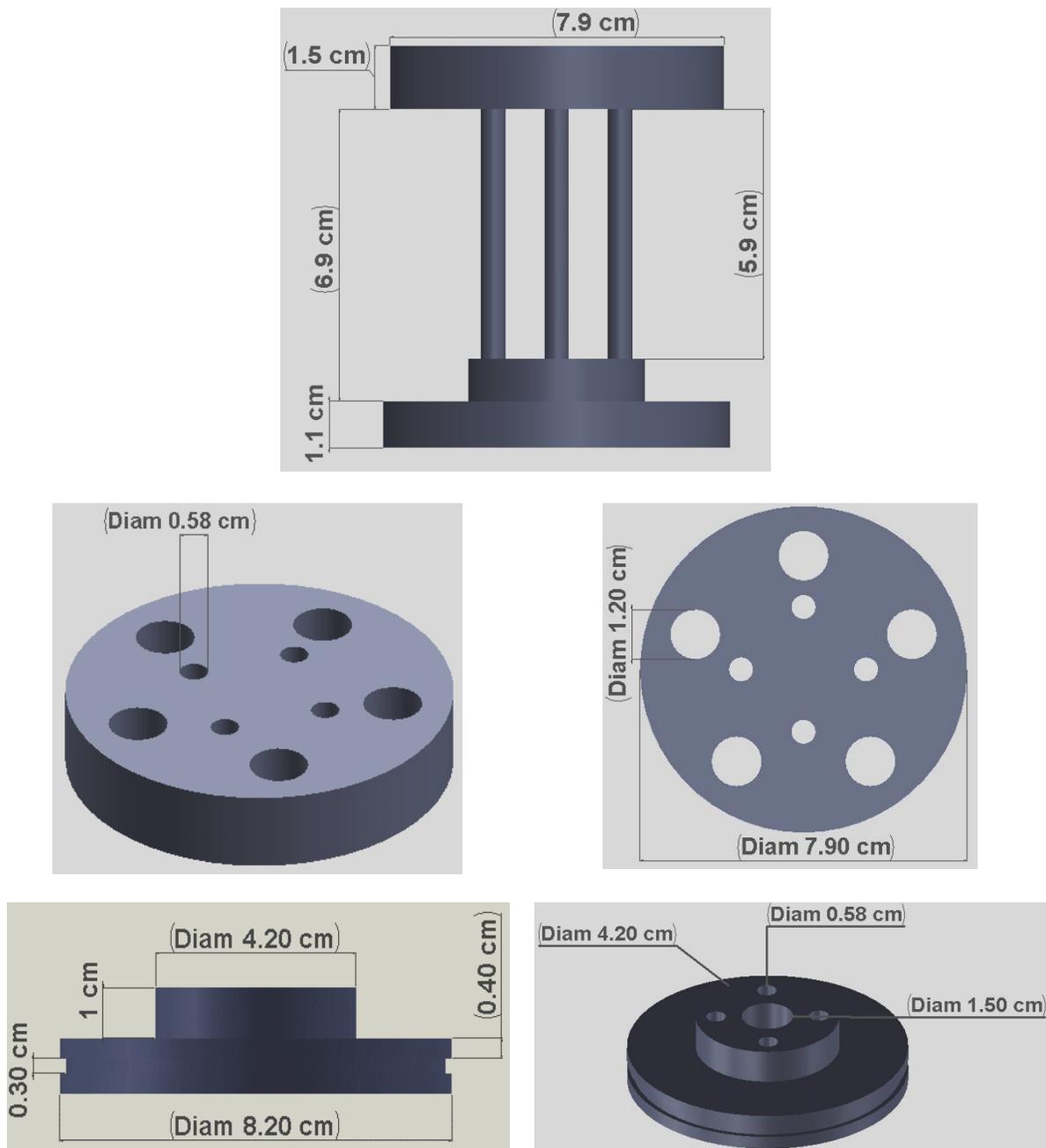


Figura 3.6 Diagrama de la configuración de placa perforada con orificios

Posterior al diseño de cada una de las configuraciones propuestas, éstas fueron exportadas al programa Z-SUIT el cual permitió convertir los diseños a modelos de impresión 3D, permitiendo realizar ajustes de impresión, además de conocer los tiempos requeridos de impresión.

Finalmente, fueron fabricadas en la impresora 3D Modelo Zortrax M200®, utilizando Z-ULTRAT como material de construcción, observando que las piezas fueron resistentes a impactos debido a la dureza y calidad del material. Los diseños impresos se observan en la Figura 3.7.

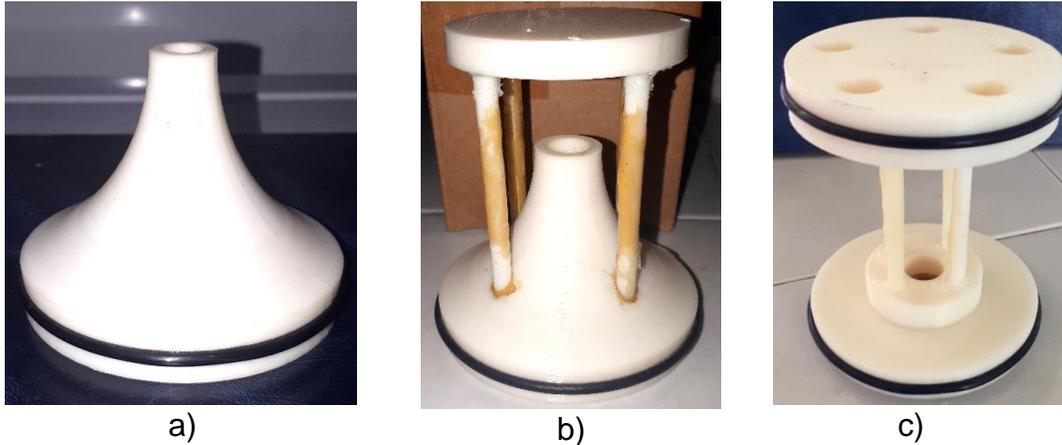


Figura 3.7 Diagrama de las piezas impresas a) como invertido, b) como invertido con placa, c) placa perforada con orificios.

3.3 Evaluación de las tres configuraciones empleando CDF (Dinámica de fluidos computacionales)

3.3.1 Definición de geometrías del dominio computacional para el RAHS

El modelado del reactor se realizó usando el software comercial de simulación CFD ANSYS Fluent. Para ello la geometría del Reactor Anaerobio Híbrido Semifluidizado (RAHS) se simplificó, seleccionando como dominio de análisis la región de la columna comprendida entre el distribuidor de flujo de la alimentación en el reactor de lecho fluidizado inverso (RLFI) y la trampa para la retención de soporte.

Ésta sección cilíndrica correspondiente al volumen útil de trabajo (4.3 L) consta de una altura de 80 cm y un diámetro de 4.445 cm, la cual es analizada con modelos bidimensionales (2D) en el caso del diseño de cono invertido y cono invertido con placa y tridimensionales (3D) para el diseño de placa con orificios, empleando dichas

dimensiones. Las mallas computacionales de estos dominios se realizaron en ANSYS-Meshing, las mallas se observan en la Figura 3.8.

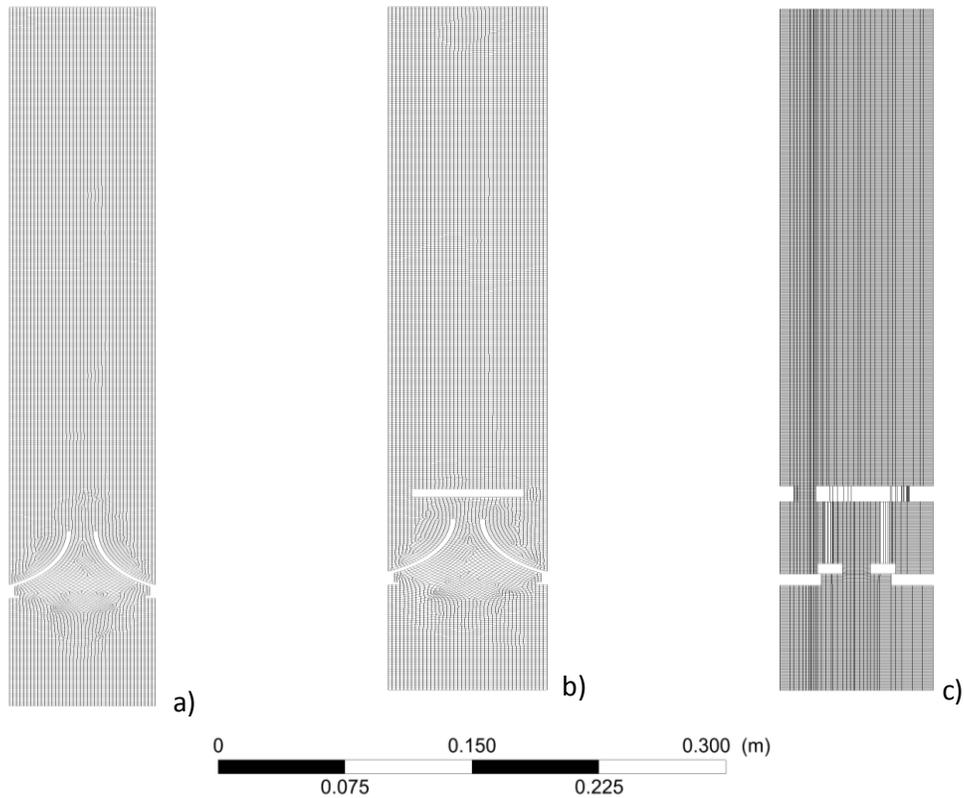


Figura 3.8 Mallas de los Diagrama de las piezas: a) Cono invertido, b) Cono invertido con placa, c) Placa perforada con orificios.

En la Tabla 3.4 se muestran el número de elementos que corresponde a las mallas de cada uno de los diseños utilizados.

Tabla 3.4 Configuración de las mallas

Malla	Diseño	N° de elementos
1	Cono Invertido	13373
2	Cono Invertido con placa	13235
3	Placa Perforada con orificios	137017

3.3.2 Modelado del flujo de un Reactor Anaerobio Híbrido Semifludizado

El modelado matemático y las simulaciones con (CFD) del flujo en un RLFÍ sólido-líquido proporcionan información detallada sobre la velocidad de fase local, las distribuciones espaciales, los patrones de flujo de fase líquida y la traza de movimiento de partículas. Esto es especialmente importante en las regiones donde las mediciones son difíciles o imposibles de obtener. Dicha información es útil para comprender el movimiento de líquidos y partículas en RLFÍ. Este análisis se realizó siguiendo lo marcado en la sección de metodología empleando el modelo de arrastre de Syamlal y O'Brien (1989) para una altura de lecho de 20 cm y una velocidad de líquido de 3 m/h.

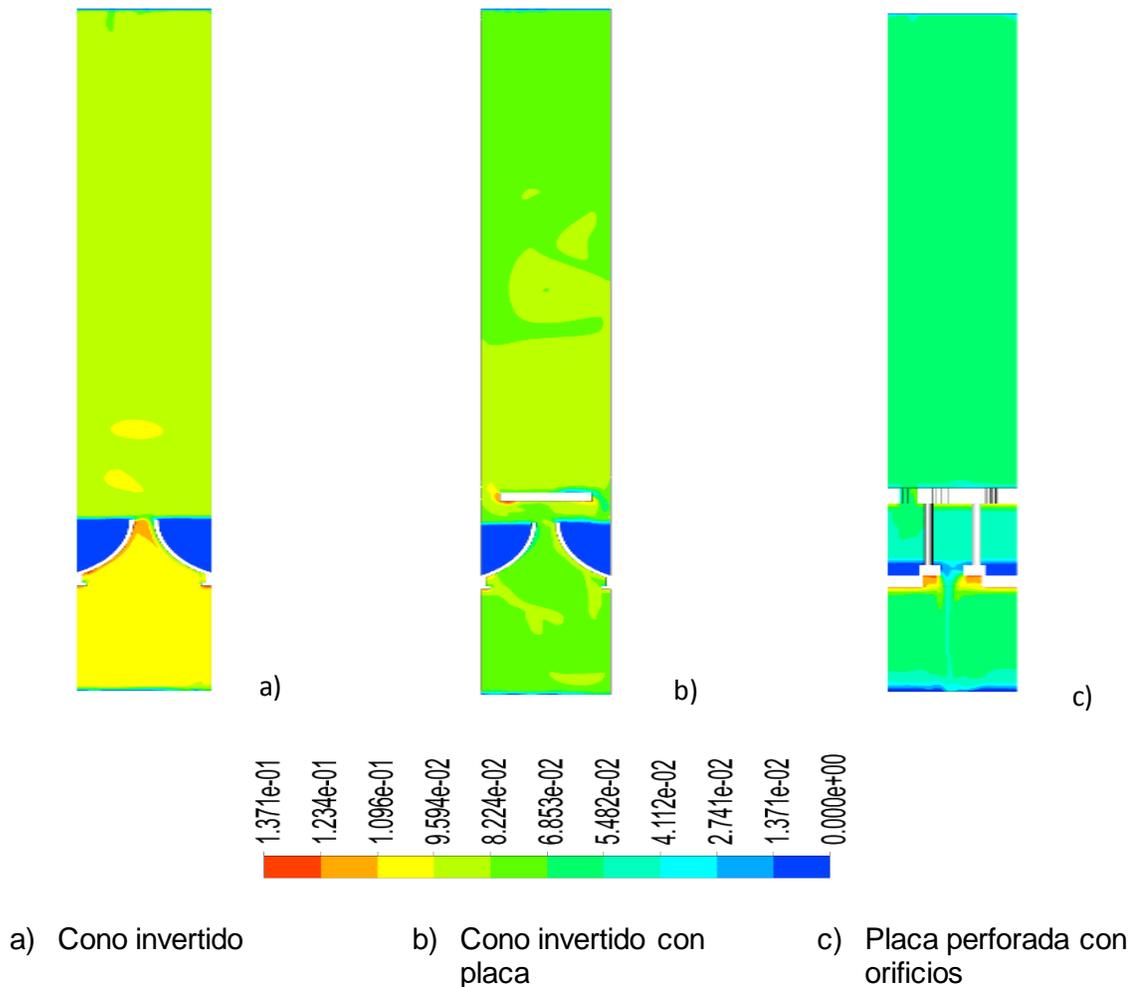


Figura 3.9 Contornos de fracción volumen de sólidos en las trampas de soporte analizadas. a) Cono invertido, b) Cono invertido con placa y c) Placa perforada con orificios.

En la Figura 3.9 se muestra los contornos de fracción volumen de partículas en el reactor a todas las configuraciones analizadas. Empleando soporte Extendsphere notándose que el lecho de partículas se distribuye uniformemente, con una porosidad prácticamente constante, sin presencia de burbujeos o zonas huecas, lo cual favorece la homogeneidad del soporte en el reactor.

Por otro lado en la Figura 3.10 se presentan las líneas de corriente de los tres sistemas analizados, en los casos del cono invertido y cono invertido con placa se puede distinguir que las velocidades máximas se encuentran la región del inicio de la expansión del lecho, dentro de los primeros 30 cm.

Por otro lado, es notorio que el uso de las placas con distintos diseños tiene un impacto importante en el patrón de flujo, por ejemplo, el uso de sistemas trampa tipo cono genera zonas de recirculación de gran tamaño y mediana velocidad, mientras que las zonas de recirculación de la placa perforada con orificios son significativamente de menor tamaño. Estas numerosas recirculaciones pueden mejorar el mezclado en el sistema, reduciendo la presencia de canalizaciones o zonas muertas en el lecho de sólidos.

Además las recirculaciones de esta región pueden provocar desprendimientos de biopelícula en las partículas de esta región; esto se puede atribuir a la fuerza de flotación y el empuje del fluido tienen una interacción más fuerte que en esta región.

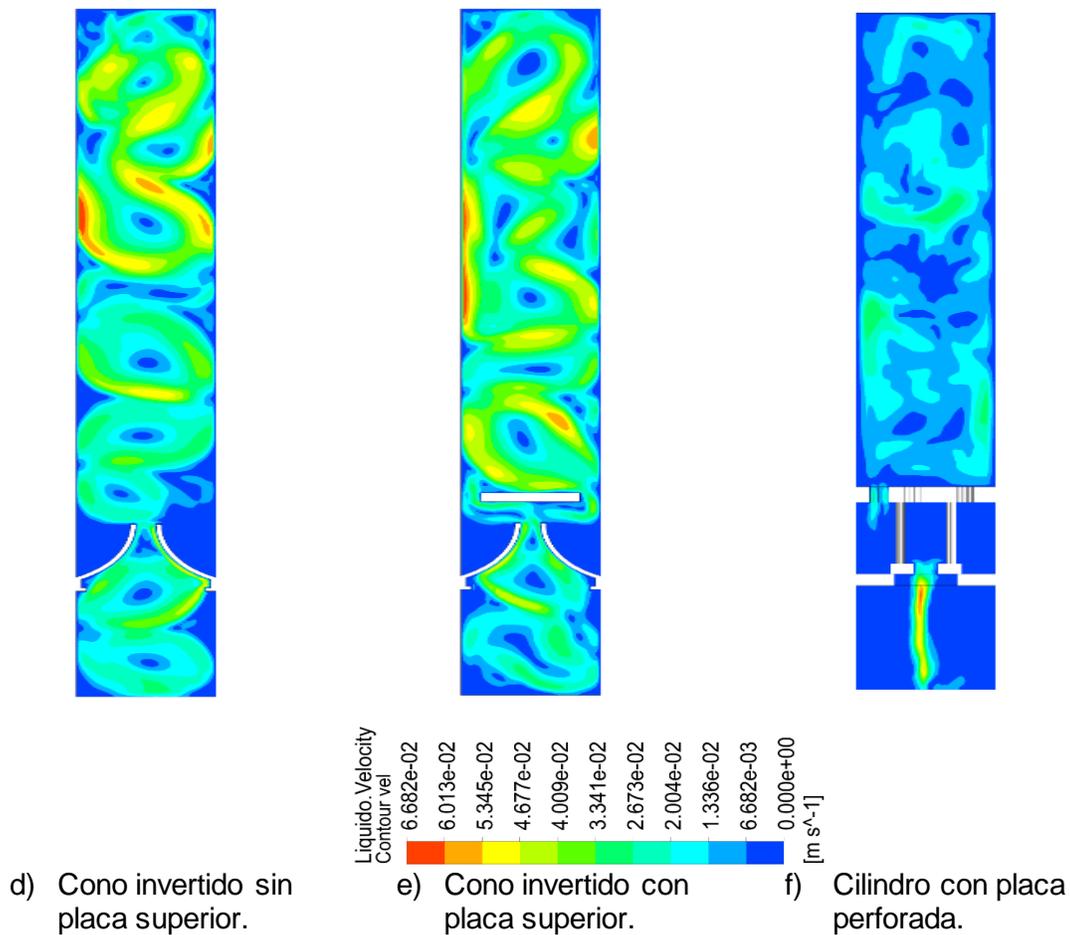


Figura 3.10 Líneas de corriente en las trampas de soporte analizadas.

La densidad de partículas es un parámetro físico principal que afecta en el comportamiento hidrodinámico de un RLF. Según la ecuación de la fuerza de arrastre, el diámetro de las partículas impacta en la fuerza de arrastre, mientras que la densidad de las partículas no está relacionada con la fuerza de arrastre, mientras que la flotabilidad se basa en el principio de Arquímedes. Por lo tanto, el impacto de la gravedad aumenta gradualmente, a medida que incrementa la densidad de partículas (soporte Extendsphere™), y la gravedad de las partículas domina la hidrodinámica de las partículas teniendo que el incremento de la densidad de partículas mejora el estado de fluidización al hacer que la distribución de partículas sea más uniforme.

La altura de expansión del lecho aumenta a medida que acrecenta la densidad de partículas siendo que la densidad de partículas afecta fuertemente la velocidad de las partículas.

3.4 Monitoreo y seguimiento del Reactor Anaerobio Híbrido (RAH)

El RAH se inoculó con 1056 mL de soporte colonizado, este contuvo 0.0148 gSV/mL soporte. Se inició la alimentación del reactor a una Cva de 5 gDQO/L usando como sustrato el efluente del Reactor Hidrolítico ubicado en Planta Piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba, dicho reactor se alimentó a partir de RSOM provenientes del mercado municipal durante un periodo de 20 días antes de emplear el soporte en las pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado, con el propósito de facilitar el rápido desarrollo de la comunidad bacteriana, en dicho periodo de monitoreo se alcanzaron porcentajes de remoción 44 % de ST y 47 % de STV

Posteriormente fue operado el RAHS, convirtiéndose en semifluidizado al emplear el diseño de placa perforada con orificios y restringir la expansión completa del lecho, en modo continuo durante un periodo de 35 días, dado que fue el diseño que mayor retención de soporte tiene al ser colocado en la sección inferior del reactor. La carga orgánica del sustrato fue ajustada a una concentración de 5 gDQO/L. empleando como sustrato el efluente del Reactor Hidrolítico.

De acuerdo con Boe *et al.*, (2010) el monitoreo y control pueden ser las principales estrategias para la estabilización del proceso y por tanto la eficiente conversión del sustrato en la digestión anaerobia. En la Tabla 3.5 se observan las condiciones de operación a detalle utilizadas para el monitoreo del RAHS.

Tabla 3.5 Parámetros de Alimentación del RAH

Sustrato	Fracción hidrolizada de RSOM
Temperatura	35°C
pH	6.8- 7.2
Cva	5 gDQO/Ld
TRH	24 h
Volumen de alimentación	3 L
Velocidad de alimentación	42 mL/min

En la Figura 3.11 se muestra el RAH con soporte colonizado, en el cual se aprecia que contiene 30 % de soporte compactado.



Figura 3.11 Reactor Anaerobio Híbrido con soporte colonizado

3.4.1 Monitoreo del pH

El pH es uno de los factores físicos más importantes a considerar para el buen desempeño de un reactor anaerobio, esto debido a que las bacterias anaerobias necesitan diferentes intervalos de pH para su crecimiento, un rango de pH entre 6.5-7.5 es favorable para el crecimiento de bacterias metanogénicas (Mata-Álvarez *et al.*, 2014).

El efluente proveniente del reactor hidrolítico tenía un pH ácido de 3.5 que al ser diluido para la alimentación del reactor aumentaba a 4.5, para proporcionar una mejor capacidad amortiguadora (alcalinidad), fue necesario añadir bicarbonato de sodio hasta ajustar el pH a un valor cercano al alcalino.

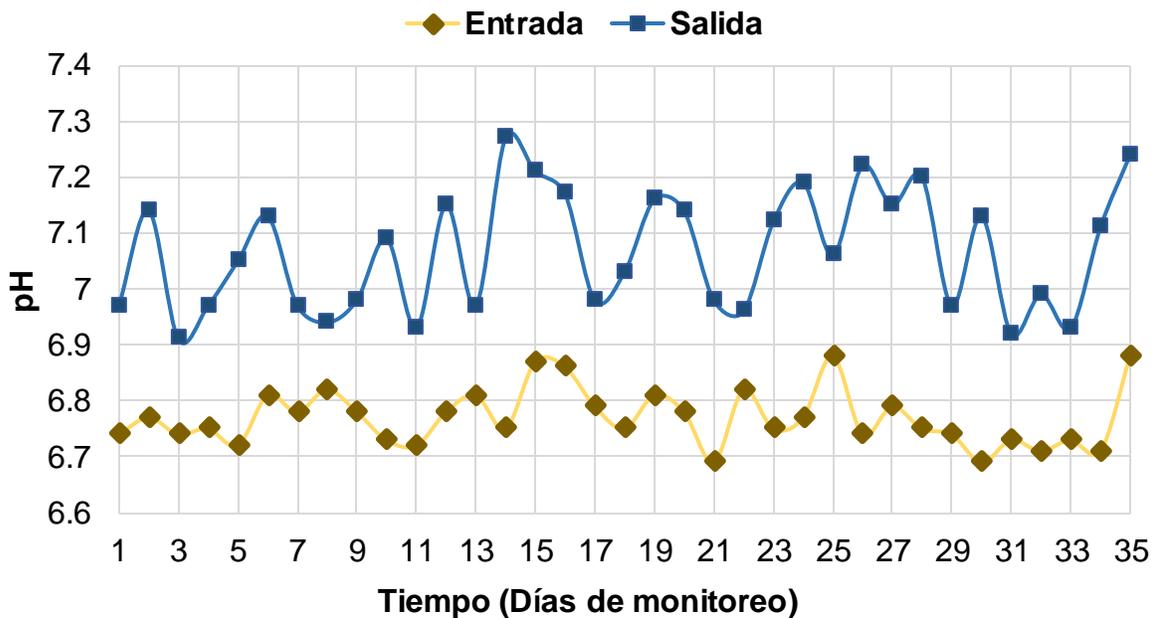


Figura 3.12 Monitoreo de pH de entrada y salida del RAH

Como se observa en la Figura 3.12 se mantuvo un pH de alimentación entre 6.7 - 7 observando que desde el primer día el pH de salida mostró valores más altos que oscilaron entre 6.9 - 7.3; dado que el reactor mostró porcentajes de remoción de ST,

STV y producción de biogás, el monitoreo fue importante para evitar que el pH no disminuyera porque los niveles bajos de pH pudieran causar inhibición bacteriana.

3.4.2 Monitoreo de ST y STV

En este estudio se observó que el sustrato alimentado al RAH tuvo una concentración de ST promedio de 6300 mg/L mientras que la del efluente fue de hasta 3865 mg/L como se presenta en la Figura 3.13

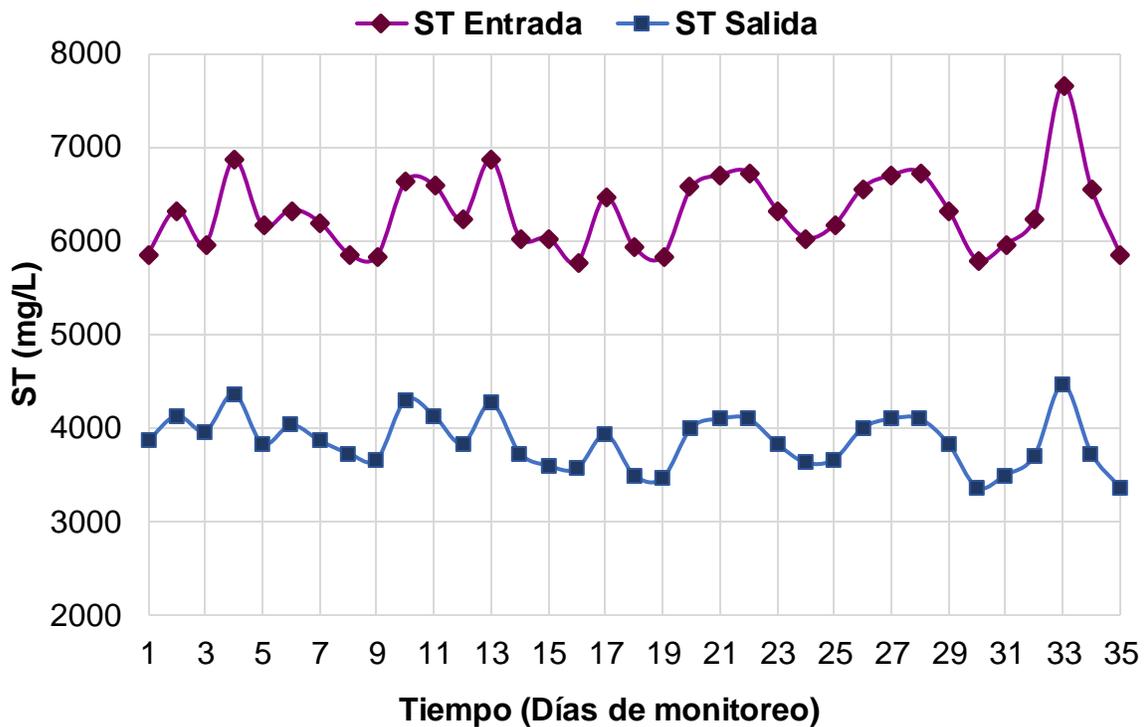


Figura 3.13 Monitoreo de ST en la entrada y salida del RAH

Durante el periodo de monitoreo se obtuvieron valores de 2700 mg/L a 4700 mg/L en la entrada del reactor y en la salida de 1400 m/L a 2900 mg/L como se muestra en la Figura 3.14

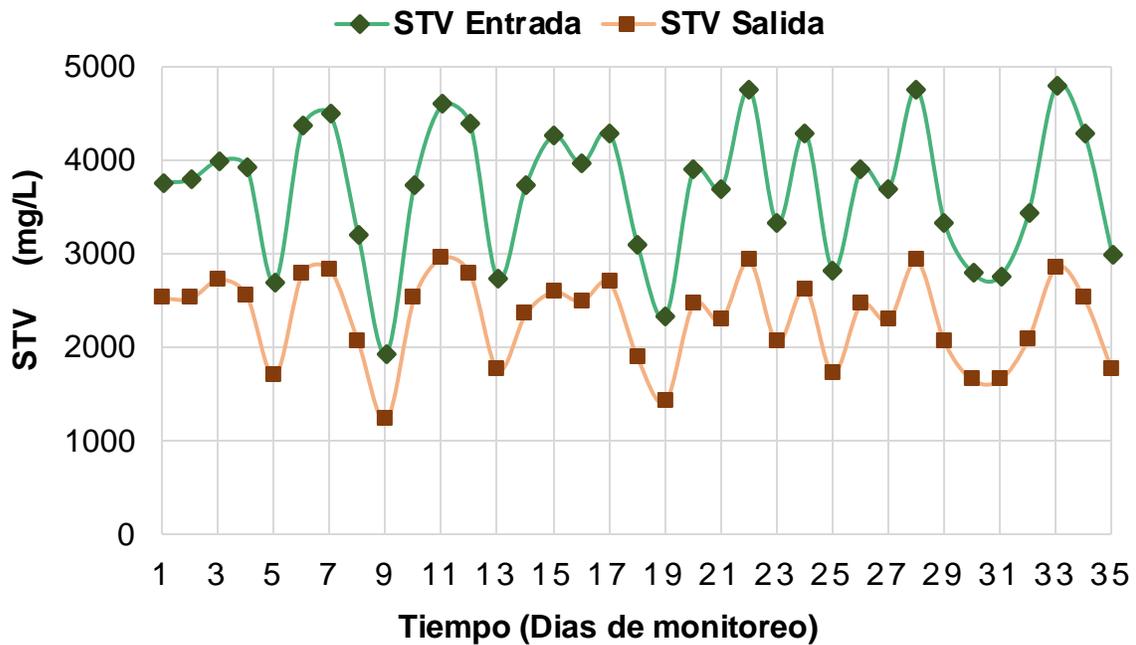


Figura 3.14 Monitoreo de STV en la entrada y salida del RAH.

La remoción que presentó el RAHS en los primeros 10 días de operación en cuanto a ST y STV fue de 48 a 60 %, a partir del día 12 hubo un incremento de remoción con valores mayores al 60 % de remoción para ST y no fue hasta a partir del día 16 que hubo un incremento notable de remoción con valores mayores al 60 % de remoción para STV, se puede observar una diminuta diferencia entre ambas curvas como se aprecia en la Figura 3.15.

Del día 20 al 30 la remoción de ambos parámetros se mantuvo en un rango de 60- 68 %, posterior a estos días se observa que los porcentajes de remoción tanto de ST como STV mejoraron alcanzando valores mayores a 70 % reduciendo la diferencia entre ambas curvas, esto demuestra que el Lecho Fijo tiene la capacidad de retener sólidos.

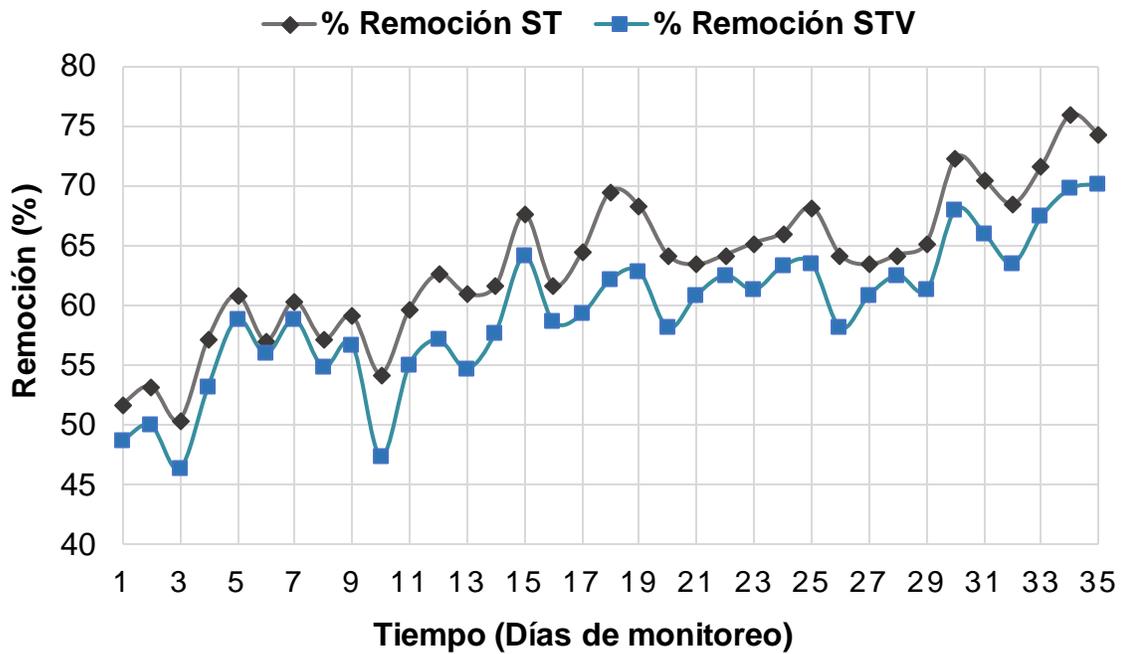


Figura 3.15 Monitoreo del % de Remoción de ST y STV.

Appels *et al.*, (2008) describen que para obtener la eliminación del 65.5 % de SV son necesarios 30 días, en el presente trabajo se observa que se mejoró el porcentaje de remoción a partir del día 31; esto con lleva a mejorar la producción de biogás, ya que los sólidos son convertidos en biogás.

3.4.3 Monitoreo de la DQO_T Y DQO_s

Los RLF_I tienen la característica primordial de poder tratar efluentes con alta carga orgánica como lo menciona Buffière *et al.*, (2000), se debe primordialmente al consorcio bacteriano adherido al material de soporte (Sowmeyan y Swaminathan, 2008) esto les confiere una gran ventaja operacional comparado con otro tipo de reactores biológicos.

Durante el monitoreo de 35 días del reactor se presentaron en promedio concentraciones de entrada de DQO Total entre 9500 mg/L y 11000 mg/L mientras que en la salida los valores oscilaron entre 2500 mg/L y 5000 mg/L como se muestra en la Figura 3.16

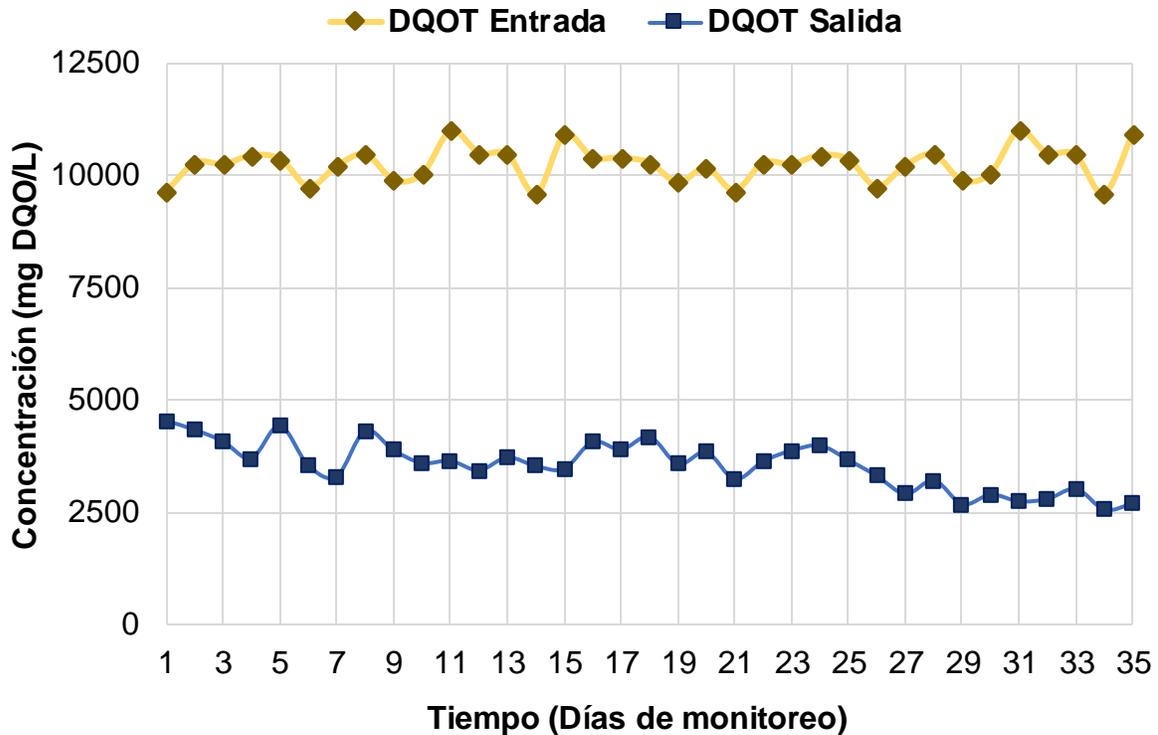


Figura 3.16 Concentración de DQO Total de entrada y salida del RAH

En el caso de la DQO Soluble se presentaron en promedio concentraciones de entrada de entre 6000 mg/L y 7500 mg/L mientras que en la salida los valores oscilaron entre 1800 mg/L y 3500 mg/L como se muestra en la Figura 3.17

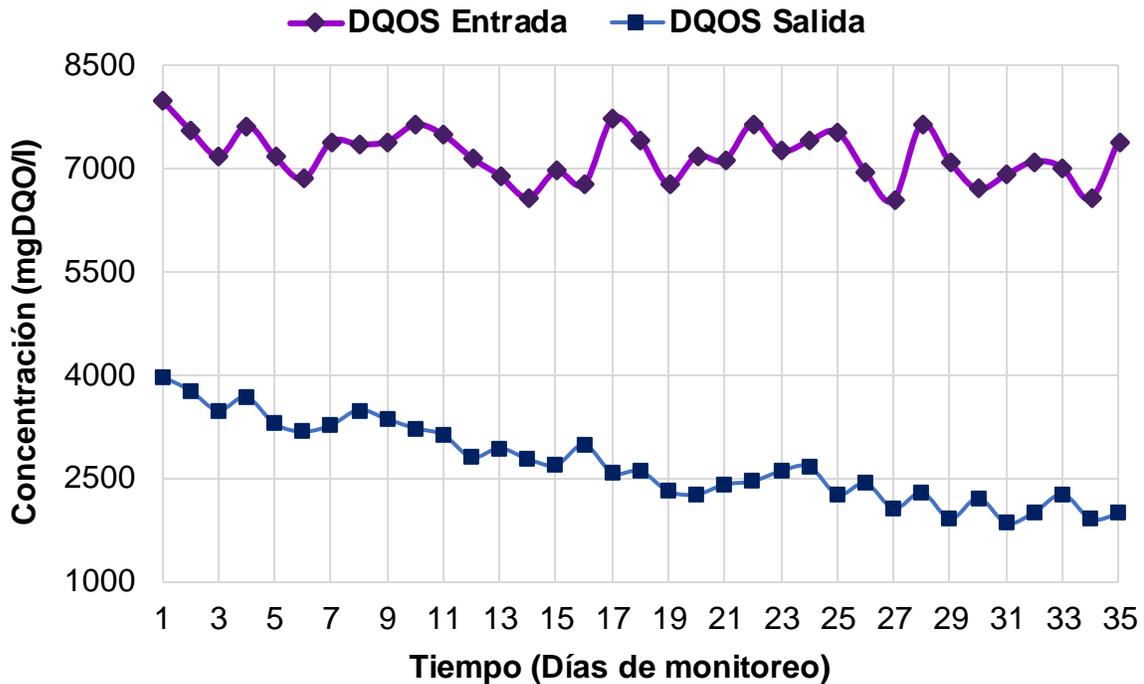


Figura 3.17 Concentración de DQO Soluble de entrada y salida del RAH

Como se observa en la Figura 3.18 al inicio del monitoreo de los 35 días empleando el diseño de la placa con orificios en la sección inferior del RAH se alcanzaron remociones mayores al 50 %, esto se debe a que se inició la operación del RAH con un inóculo activo y colonizado, también influyó determinadamente el continuar usando el mismo sustrato con la misma Cva de 5 gDQO/Ld. a la que el consorcio bacteriano estaba habituado.

Es evidente la tendencia del comportamiento de los porcentajes de remoción de la DQO total que se muestran, ya que durante los primeros 5 días estas remociones oscilaron entre valores del 50 y 64 % incrementándose de manera significativa hasta alcanzar valores entre el 60 y 67 % durante los primeros 15 días de operación. Al llegar al día 26 del monitoreo del reactor se alcanzó una remoción del 71.55 %, a partir de ese día las remociones fueron en aumento llegando al día 35 a una remoción del 75 %.

El obtener éstos porcentajes de remoción, nos permite evaluar el buen funcionamiento de emplear el diseño de la placa con orificios en la sección inferior del reactor, pues logra retener el soporte dentro del reactor, pese a que éste incrementa su densidad y grado de colonización.

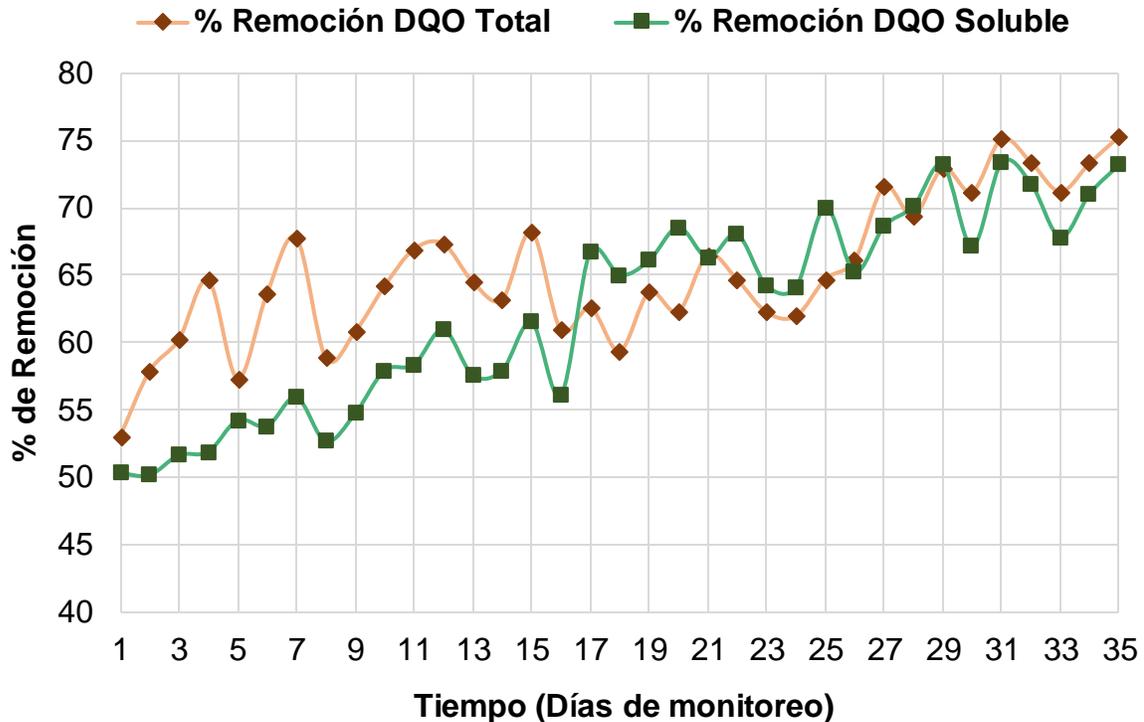


Figura 3.18 Monitoreo del % de Remoción de DQO Total y DQO Soluble

Hablando sobre los valores de remoción de DQO soluble se observa que en los primeros 10 días alcanzó apenas valores de 58 % de remoción, no fue hasta el día 12 que alcanzó 60 %. Las remociones se mantuvieron oscilando entre dichos valores durante los primeros 25 días y a partir de éste las remociones fueron aumentando hasta alcanzar un valor de 73 % en el día 35 del monitoreo, son valores aceptables, para las condiciones de operación empleadas.

Ying *et al.* (2014) aclimataron el lodo anaerobio de un reactor tipo UASB que fue operado durante 120 días, alcanzando eficiencias de remoción de DQO del 85 % con una carga de 8.64 gDQO/Ld, esto hace pensar que para un RAH los valores esperados en la eficiencia de remoción de DQO pueden ser superiores al 90 % si se opera durante un periodo mayor a 30 días pero menor a 120, ya que Alvarado-Lassman *et al.* (2008), observaron que para dos tipos de soportes utilizados en RLFÍ en el tratamiento de aguas residuales de cervecería, se pueden alcanzar remociones de DQO superiores al 90 %.

3.1 Pruebas hidrodinámicas con soporte Extendsphere™ del RAH

Se llevaron a cabo pruebas hidrodinámicas de expansión del lecho fluidizado empleando cada una de las tres configuraciones diseñadas para la sección inferior del reactor, a su vez con soporte limpio y colonizado, en presencia y ausencia de biogás. Esto para poder seleccionar la mejor configuración en el mejoramiento de la fluidización y retención de soporte dentro del reactor.

3.1.1 Pruebas hidrodinámicas con soporte no colonizado

Como se mencionó previamente fue utilizado Extendsphere™ como medio de soporte. Teniendo en cuenta la velocidad descensional y la expansión del lecho, una cantidad de soporte igual al 30 % del volumen de trabajo del RLFÍ, parece ser el adecuado para obtener el mejor contacto entre los microorganismos y el sustrato, como lo sugieren Alvarado Lassman *et al.*, (2008) luego de que realizaron diversas pruebas hidrodinámicas usando como material de soporte Extendsphere™ y polietileno, y utilizaron un 25% del volumen útil del reactor para soporte y velocidades menores a 6 m/h para fluidizarlo, demostrando que el Extendsphere da buenos resultados debido a su tamaño y propiedades físicas.

Los flujos utilizados en las pruebas, fueron convertidos a velocidades empleando el área transversal del reactor, para poder expresar gráficamente el porcentaje de expansión que alcanza el soporte con cada uno de los diseños empleando diferentes velocidades, como se aprecia en la Figura 3.19. El diseño de las piezas para la retención de soporte empleadas y el diseño del reactor en la parte del LF, hizo necesario tener que abrir el reactor completamente en la sección del LF, para vaciar el reactor, y así colocar y retirar cada una de las piezas empleadas.

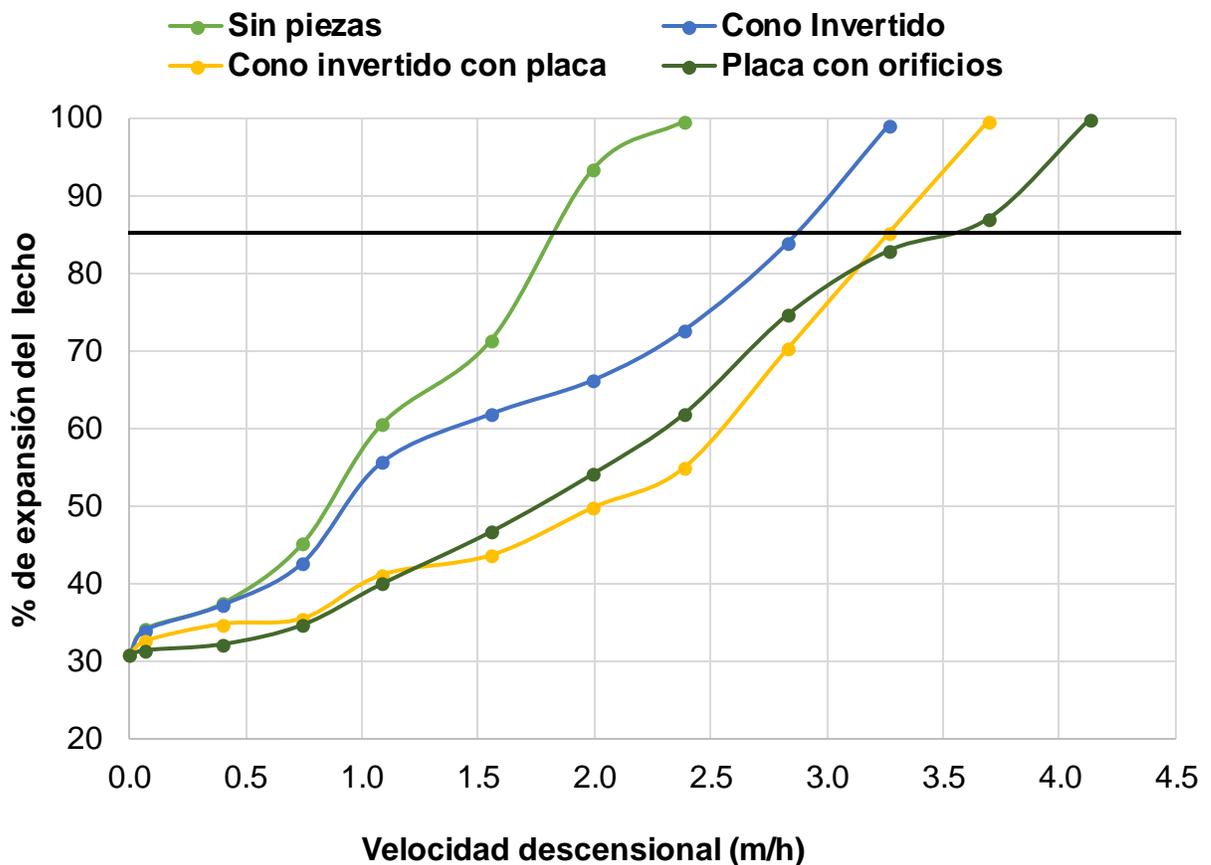


Figura 3.19 Resultados de pruebas de fluidización con soporte limpio

Al realizar la expansión del lecho sin ninguna de las configuraciones diseñadas, se observó que a una velocidad de 2 m/h de líquido, el soporte alcanza una expansión cercana al 90 %, esto resulta lógico dado que no existe ninguna barrera física que restrinja el flujo dentro del reactor.

Al incorporar las diferentes configuraciones propuestas, propician un comportamiento de lecho semifluidizado a una altura de 55 cm (85 % de expansión). El diseño de la placa con orificios fue la configuración que retuvo el soporte dentro de la zona del lecho fluidizado, aun cuando la misma forma del diseño reguló la recirculación del flujo permitiendo aumentar la velocidad descendencial hasta 4 m/h. Esto resultó favorable ya que se formó un lecho semifluidizado y el flujo dentro del reactor permaneció constante sin taponamientos debido al diámetro de 1.2 cm que tenía la base del diseño. Las tres configuraciones lograron disminuir la expansión del lecho restringiendo el flujo parcialmente, de igual forma retuvieron parte del soporte, teniendo que la configuración del cono invertido sin placa no logró retenerlo del todo, por lo que éste empezó a abandonar el RLSFI.

La expansión del soporte limpio según cada diseño implementado puede observarse en la Figura 3.20, donde se aprecia que el soporte si es retenido por los diseños de cono invertido con placa y el de placa con orificios.



a)

b)

c)

Figura 3.20 Retención de soporte limpio con los diseños a) cono invertido, b) cono invertido con placa, c) placa perforada con orificios.

En esta investigación empleando velocidades de líquido mayores a 3 m/h el soporte aún es retenido dentro del reactor salvo al usar el diseño de cono invertido sin placa, lo cual comprueba la importancia de la velocidad descensional del flujo para controlar la expansión del soporte dentro del reactor.

3.1.2 Pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado

Una desventaja de los RLFI es la falta de un control activo de la formación de la biopelícula. El crecimiento en exceso de la biomasa adherida en el medio de soporte, puede provocar aglutinación y modificar la densidad de las partículas, ya que el proceso de crecimiento puede no ser idéntico para todas las partículas dentro del reactor, induciendo la estratificación del lecho (Tavares *et al.*, 1995; Buffiere *et al.*, 1998). Esto implica un ajuste progresivo de las condiciones hidrodinámicas aplicadas al reactor para mantener la fluidización de todas las partículas y evitar el lavado de las partículas más colonizadas.

Para ello se repitieron las pruebas hidrodinámicas de expansión del lecho ahora empleando soporte Extendsphere™ colonizado, de igual forma que con el soporte no colonizado, cada uno de los diseños propuestos, fueron colocados hasta un 85 % del lecho fluidizado, esto con el fin de utilizar el máximo espacio posible en la fluidización.

Las pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado fueron realizadas por triplicado empleando cada una de las tres configuraciones propuestas (cono invertido, cono invertido con placa y placa con orificios) y los flujos presentados en la Tabla 2.2, una cantidad de soporte igual al 30 % del volumen de trabajo del reactor presenta buena estabilidad.

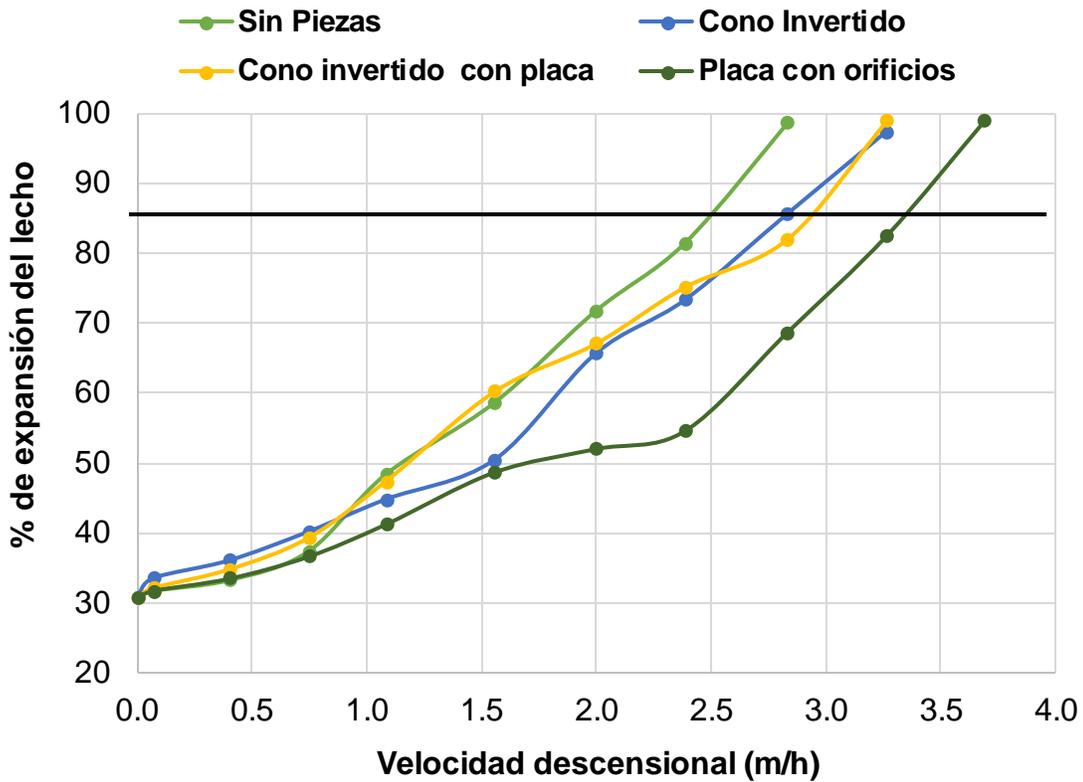


Figura 3.21 Resultados de pruebas de fluidización con soporte colonizado y las tres configuraciones

Tal y como se observa en la Figura 3.21 , en la cual se graficó la expansión que alcanzó el lecho a las diferentes velocidades utilizadas en cada prueba, según el diseño colocado en la sección inferior del reactor, el soporte colonizado alcanza el 100 % de la expansión del lecho a velocidades menores en comparación con el soporte limpio, debido al proceso natural de acumulación de biomasa sobre el medio de soporte, lo que provocó un aumento en el diámetro del mismo, incrementando también su densidad. Habiendo así un incremento de la expansión del lecho a la misma velocidad de fluidización. Este fenómeno fue evaluado con el fin de controlar la expansión del lecho, obteniendo que los diseños de cono invertido con placa y placa con orificios son capaces de retener el soporte dentro de la zona del lecho fluidizado por encima de velocidades descendenciales mayores a 2.5 m/h, cumpliendo su función de lograr un

lecho semifluidizado y a su vez evitar la salida del soporte del reactor en su operación cotidiana.

Mientras que el diseño de cono sin placa, no retiene de forma eficiente el soporte, pues este es arrastrado a la salida del reactor con velocidad de 2.6 m/h, debido a que la misma velocidad descendencial impulsa mayormente el soporte hacia el centro del cono, propiciado así el arrastre del mismo hacia fuera del reactor. En la Figura 3.22 se observa el comportamiento de la expansión de los lechos sin pérdidas de soporte empleando el diseño de cono invertido con placa y el de placa con orificios.

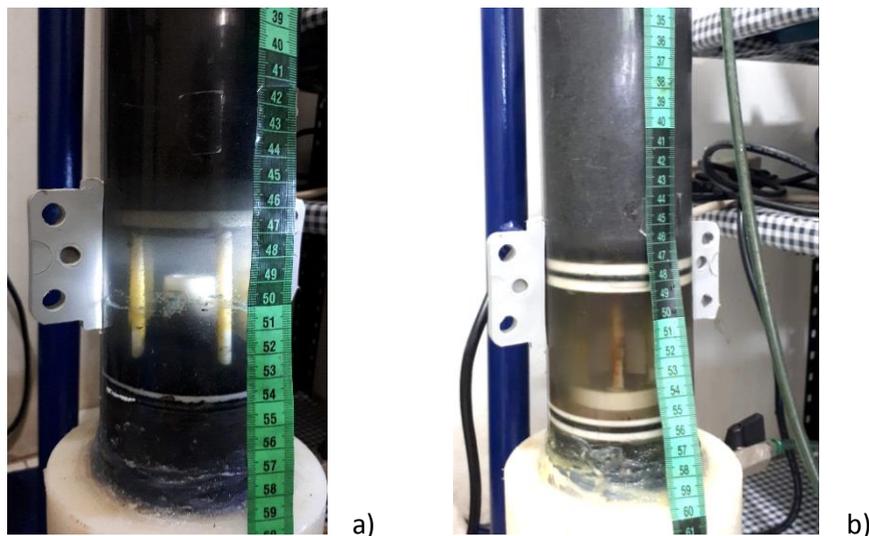


Figura 3.22 Retención de soporte colonizado con los diseños a) cono invertido con placa, b) placa perforada con orificios.

El diseño de placa perforada con orificios, nuevamente tuvo el mejor comportamiento en la expansión del lecho, pues su configuración de los 5 orificios de la placa superior del diseño, permitió regular el flujo de la recirculación hasta velocidades de 3.5 m/h sin pérdida de soporte, siendo mejor, en comparación con lo reportado por Emilio-Domínguez (2016), quien empleó una placa con orificios de 0.6 cm, que aun cuando no fue capaz de retener el soporte dentro de la zona del lecho fluidizado por encima de velocidades descendenciales mayores a 2.3 m/h, si mostró una disminución de la

expansión cuando el soporte colonizado atraviesa la misma, cumpliendo su función de lograr un lecho semifluidizado y a su vez evitar o al menos ralentizar la salida del soporte del reactor en su operación cotidiana

Con las pruebas realizadas se verifica, que la velocidad de líquido es un factor preponderante en la expansión de los lechos fluidizados aun por encima del porcentaje empleado de soporte dentro del reactor.

Como se puede ver, al utilizar velocidades de líquido mayores a 2.5 m/h el soporte tiende a abandonar el reactor salvo al usar las tres configuraciones propuestas para su retención, lo cual comprueba la importancia de la velocidad descensional del flujo para controlar la expansión del soporte dentro del reactor mediante el empleo de configuraciones en la sección inferior del mismo.

3.1.3 Efecto de la fluidización del biogás sobre la fluidización del soporte

Para poder observar cómo influyó la producción de biogás diaria en la expansión del soporte, se empleó en la sección inferior del RLF1, el diseño de placa perforada con orificios, al ser el diseño que presentó mayor retención de soporte dentro del reactor en las pruebas hidrodinámicas de expansión.

Dentro de los primeros 20 días de operación del RAHS, hubo una producción promedio de biogás diaria de 3.1 a 3.9 L como se muestra en la Figura 3.23. A partir del día 21 se alcanzó una producción de 4.2 L, continuando luego de ese día incrementando gradualmente la producción de biogás, llegando al día 30 a una producción de 5.1 L, hasta un volumen obtenido diario de 5.5 L al día 35 de monitoreo.

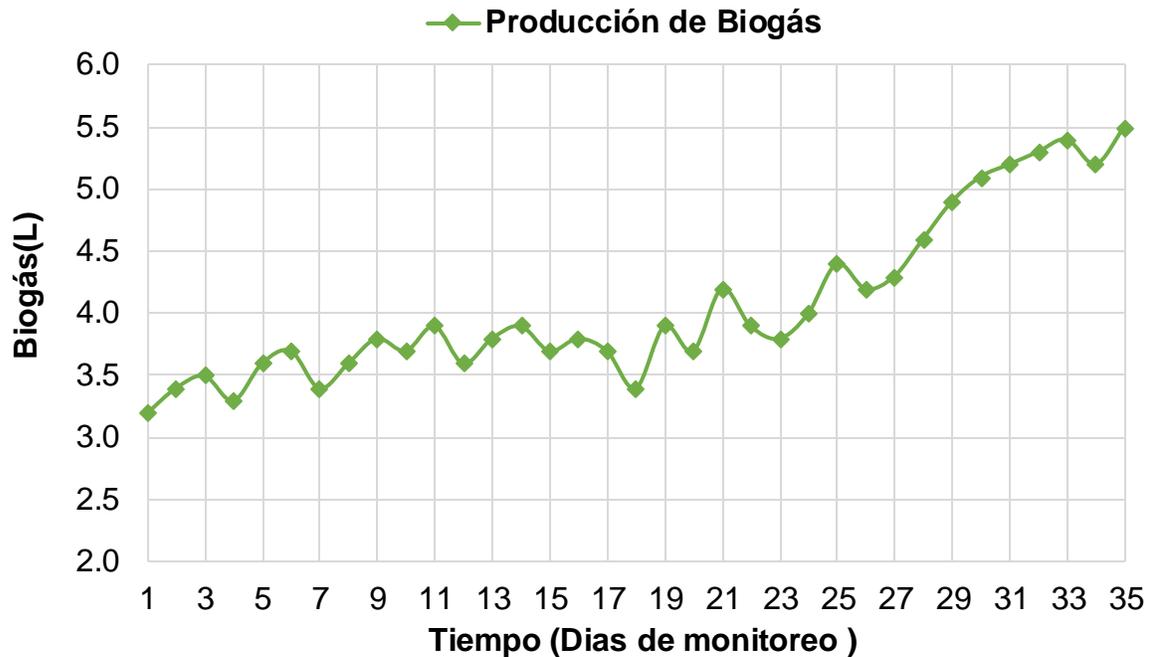


Figura 3.23 Producción de biogás (L).

La producción de biogás estuvo estrechamente ligada a la expansión del soporte, pues se comprobó que al aumentar la velocidad de biogás, disminuyó considerablemente la velocidad descensional del líquido necesaria para mantener el soporte fluidizado dentro del RAHS, debido a que el biogás, al desplazarse hacia la parte superior del reactor, fluidiza por sí mismo el soporte, propiciando sea menor la velocidad del líquido necesaria, lo anterior se observa en la Figura 3.24, donde se presentan en un gráfico como comienza a aumentar la velocidad de biogás y así mismo a disminuir la del líquido, conforme transcurrieron los días del monitoreo.

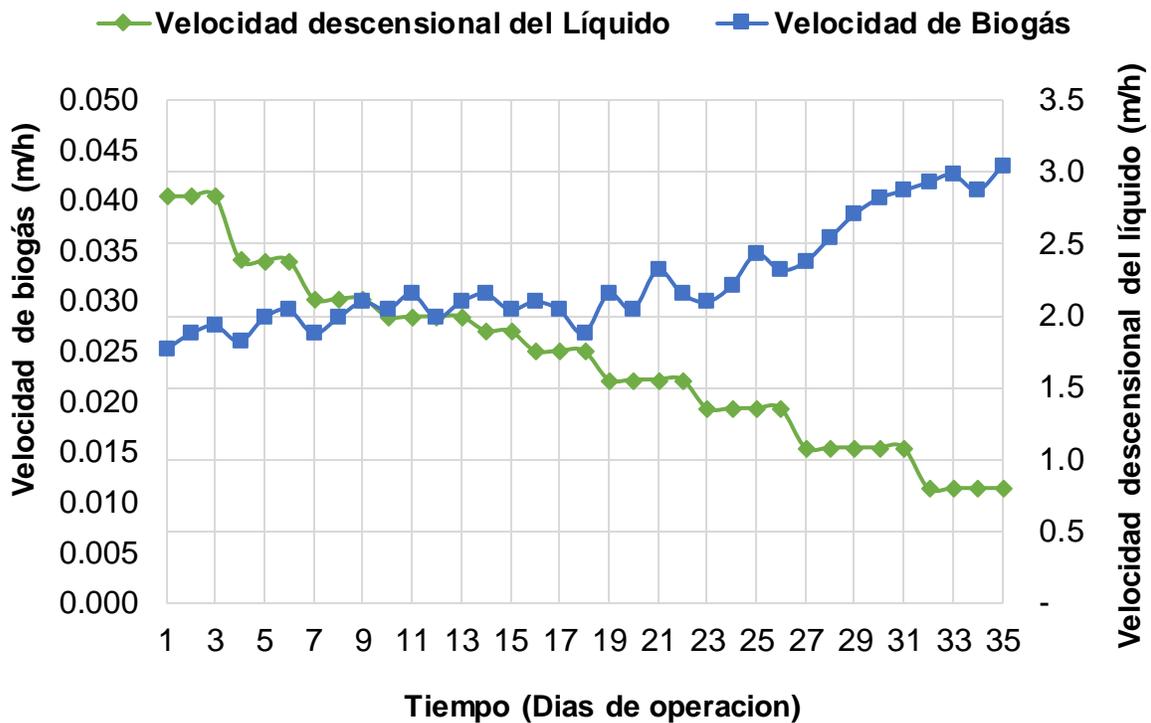


Figura 3.24 Relación entre la producción diaria de biogás y la velocidad descendional.

En los últimos 5 días de monitoreo se logró fluidizar el soporte en un 100 % con un 300 % menos de velocidad descendional de líquido, pues de 2.83 m/h en los que operó los primeros tres días el reactor se redujo hasta 0.8 m/h, presentando un comportamiento hidrodinámico estable, sin pérdida de soporte lo que se transforma en un gran ahorro energético.

La velocidad del biogás varió proporcionalmente en función de la producción de biogás diaria. En los primeros 25 días de monitoreo las velocidades de biogás oscilaron entre 0.0253 a 0.0332 m/h, teniendo que a partir del día 26 la velocidad de biogás aumentó a 0.0403 m/h. Claramente puede observarse que al aumentar la velocidad de biogás disminuyó la velocidad descendional de líquido necesaria para expandir el lecho.

Se puede ver que el biogás como subproducto del tratamiento de las aguas residuales que se tratan dentro de estos reactores, facilita enormemente la fluidización del soporte, tal como se demostró en las pruebas hidrodinámicas de expansión. La expansión inicial del soporte colonizado sin operar la bomba de recirculación aumento en un 30 % tan solo por el efecto del biogás, ya que este al desplazarse hacia la parte superior del RAHS fluidiza por sí mismo el soporte y lo descompacta promoviendo su movimiento. El hecho de poder disminuir su dependencia o incluso prescindir de ellas es un factor preponderante al momento de pensar en escalar el proceso a nivel industrial.

3.2 Estudio Comparativo de la fluidización del reactor sin piezas y con las piezas propuestas en la sección inferior del RLF1

En la Tabla 3.6 se muestran los valores de las velocidades, a las cuales se alcanza el 100 % de expansión del lecho, cuando no se utiliza ninguna pieza y empleando los tres diseños propuestos, así como, si la pieza propuesta retiene o no el soporte.

Tabla 3.6 Comparación de las velocidades de expansión de cada diseño utilizado.

Configuración	Soporte no colonizado	Soporte colonizado	Presenta retención de soporte
	Velocidad a la que alcanza el 100 % de expansión el lecho (m/h)	Velocidad a la que alcanza el 100 % de expansión el lecho (m/h)	
Sin piezas	2.3859	2.8327	X
Cono invertido	3.2664	3.2664	X
Cono invertido con placa	3.6925	3.2664	√
Placa perforada con orificios	4.1299	3.6925	√

Como lo muestra la gráfica, el diseño de “placa perforada con orificios”, fue la que requirió mayor velocidad para lograr la expansión total del lecho, así como la que presentó, mejor retención del soporte dentro del reactor, debido a la geometría de su diseño. Motivo por el cual, se eligió éste diseño, para evaluar, el efecto de la producción de biogás diaria en la expansión del lecho.

Luego del seguimiento de operación del RAHS con el diseño de placa perforada con orificios, se obtuvieron porcentajes de remoción de los parámetros químicos DQO_T Y DQO_s, así como de los parámetros físicos ST y STV, éstos valores fueron comparados con los obtenidos por Rosas-Mendoza (2018), quien arrancó, inoculó, y acondicionó un RAH, en un periodo de 78 días, empleando como sustrato la fracción líquida hidrolizada de residuos de frutas y verduras, con una Cva de 5 gDQO/Ld, tal y como la utilizada en el presente trabajo. La Tabla 3.7 muestra la comparación de los valores obtenidos por el trabajo de Rosas-Mendoza (2018) y el presente trabajo.

Tabla 3.7 Comparación del RAHS con un RAH.

Parámetro Autor/Año	Días de monitoreo	Cva aplicada	% de Remoción			
			DQO _s	DQO _T	ST	STV
Rosas- Mendoza (2018)	78	5 gDQO/Ld	80	80	80-90	80-90
Presente trabajo	35	5 gDQO/Ld	73	75	75	70

El hecho de tratar RSOM en reactores biológicos de 3° generación como los RLFI y sus posteriores evoluciones: los reactores híbridos (Rosas-Mendoza., 2018) y el RLSFI (Emilio-Domínguez., 2016) han permitido alcanzar diversas ventajas tanto biológicas como operativas en dichos reactores.

El RAHS utilizado en el presente trabajo, permitió obtener valores significativos en porcentajes de remoción de los parámetros DQO_s , DQO_T , ST y STV, comparados con los obtenidos por (Rosas-Mendoza., 2018), teniendo condiciones similares de operación, esto se justifica por la adecuación de las configuraciones de placas para la retención de soporte en la sección del RLFI, las cuales tuvieron un gran efecto sobre la estabilidad del soporte y por ende sobre el buen desarrollo del consorcio bacteriano, el cual finalmente es el encargado de degradar la materia orgánica, que se representa con los porcentajes de remoción de los parámetros físicos y químicos, lo cual también indica que de continuar el monitoreo del RAHS por un periodo más largo, podría alcanzar los valores de remoción de (Rosas-Mendoza., 2018) aun cuando se incrementara la Cva aplicada.

De igual forma, la generación de biogás dentro del RAHS pareció verse potenciada por el efecto del semifluidizado, al incorporar el diseño de placa perforada con orificios en la sección inferior del RLFI, ya que estas permitieron mantener un control sobre el soporte, pese a que aumentó su grado de colonización, evitando que este abandonara el reactor debido a la fluidización causada por el biogás.

Dentro de la bibliografía científica, el único trabajo precedente que existe reportado con régimen semifluidizado en reactores biológicos es el trabajo de Emilio-Domínguez (2016), quien implementó una placa con orificios de 0.6 cm, en un RLFI, para tratar residuos cítricos. Lo que permite al presente trabajo, ser de utilidad para mejorar la fluidización de un RAHS, para el tratamiento de RSOM, mejorando sus condiciones hidrodinámicas y de operación.

CONCLUSIONES

El modelo Euleriano-Euleriano, ofrece la posibilidad de representar adecuadamente la física de un RLSFI, sin la necesidad de modelar individualmente las partículas del lecho. Siendo de gran utilidad para el análisis de los diseños propuestos: como invertido, como invertido con placa y placa perforada con orificios, permitiendo una mejor comprensión de su hidrodinámica y el efecto de diversas condiciones de operación sobre su desempeño. Se observó que los patrones de flujo en la columna presentan numerosas recirculaciones en las zonas de los sólidos, y después de ésta, el flujo tiene a ser parabólico. El modelo 2D y 3D predicen de manera parecida los valores de la altura de la cama de sólidos en expansión y su porosidad, sin embargo presentan diferencia en el valor promedio de la velocidad en ambas fases.

Las pruebas hidrodinámicas que se realizaron con las tres diferentes configuraciones y 30 % de volumen de trabajo para el soporte (sin colonizar y colonizado), fueron de gran utilidad para la evaluación de aspectos hidrodinámicos como la velocidad descendencial y expansión del lecho. Durante su desarrollo se observó que para tener una fluidización de buena calidad, el lecho debe estar libre de irregularidades y de canalizaciones, esto se logra con una adecuada distribución del flujo que se alimenta (función del Lecho Fijo).

De acuerdo a los resultados obtenidos del RAH; la inoculación previa del soporte a emplear en las pruebas hidrodinámicas con soporte colonizado facilita el rápido desarrollo de la comunidad bacteriana. Por ello fue necesario adecuarlo 20 días antes de su arranque en condiciones de temperatura y pH recomendados por bibliografía y alimentado con concentraciones de sustrato de forma constante; ya que al combinarse con soporte limpio disminuye la eficiencia del soporte colonizado,

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los Reactores de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI) ofrecen grandes ventajas en el tratamiento de aguas residuales pero a su vez exigen un control estricto de la expansión del soporte empleado, ya que existe el riesgo de que este sea arrastrado a la salida del reactor perdiendo material bacteriano y disminuyendo su eficiencia. Emplear las tres configuraciones como invertido, como invertido con placa y placa perforada con orificios en la sección inferior del mismo propicia tener un lecho semifluidizado, así como ayudar a detener el soporte dentro del reactor aun cuando el flujo se eleve. El soporte a medida que aumenta su colonización bacteriana modifica su tamaño y densidad, cambiando sus características hidrodinámicas lo que vuelve un proceso dinámico y cambiante la fluidización en los RLFI. Se debe analizar bien la configuración a emplear para que sea capaz de retener efectivamente el soporte. De los tres diseños analizados el diseño de placa con orificios es una buena opción, ya que es capaz de retener el soporte dentro del lecho fluidizado y mejorar la fluidización a una velocidad mayor que los demás diseños.

El diseño de placa perforada con orificios fue el empleado para evaluar, el efecto de la producción de biogás diaria en la expansión del lecho. Para ello se monitoreó el RAHS en un periodo de 35 días empleando una Cva de 5 gDQO/Ld, obteniendo porcentajes de remoción al día último del monitoreo de 75.26 % DQO_T, 73.15 % DQO_s, 74.3 % ST y 70 % STV.

En los últimos 5 días de monitoreo, la producción de biogás estuvo estrechamente ligada a la expansión del soporte, ya que como se comprobó que al aumentar la producción de biogás disminuyó drásticamente la velocidad descensional necesaria para mantener el soporte fluidizado dentro del RAHS. Se logró fluidizar el soporte en un 100 % con un 300 % menos de velocidad descensional de líquido, lo que se transforma en un gran ahorro energético.

RECOMENDACIONES

Tomando como base la investigación desarrollada y la visualización de la misma se recomienda extender el periodo de monitoreo con el diseño de placa perforada con orificios, pues al observar su comportamiento es claro, que podrán alcanzarse porcentajes de remoción mayores.

De igual forma podría evaluarse el incremento de la Cva de forma gradual, para observar el rendimiento de la generación de biogás.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdurahman, N., Rosli, Y. M., & Azhari, N. (2013). The Performance Evaluation of Anaerobic Methods for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment: A Review. *International Perspectives on Water Quality Management and Pollutant Control* (pp. 87-106). INTECH.
- Adekunle, K., & Okolie, J. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, **6**, 205-212.
- Ahuja, G., & Patwardhan, A. (2008). CFD and experimental studies of solids hold-up distribution and circulation patterns in gas–solid fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, **143**(1-3), 147–160.
- Ali Shah, F., Mahmood, Q., Shah, M. M., Pervez, A., & Asad, S. A. (2014). Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. *The Scientific World Journal*, 1-21.
- Alvarado- Lassman, A., Sandoval-Ramos, A., Flores-Altamirano, M. G., Vallejo-Cantú, N. A., & Méndez-Contreras, J. M. (2010). Strategies for the Startup of Methanogenic Inverse Fluidized-Bed Reactors Using Colonized Particles. *Water Environment Research*, **82**, 1-5.
- Alvarado-Lassman , A., Rustrián, E., García-Alvarado, M., Rodríguez-Jiménez, G., & Houbroun, E. (2008). Brewery wastewater treatment using anaerobic inverse fluidized bed reactor. *Bioresource Technology*, 3009-3015.
- Andalib, M., Elbeshbishy, E., Mustafa, N., Hafez, H., Nakhla, G., & Zhu, J. (2014). Performance of an anaerobic fluidized bed bioreactor (AnFBR) for digestion of primary municipal wastewater treatment biosolids and bioethanol thin stillage. *Renewable Energy*, **71**, 276-285.

- Appels , L., Baeyens, J., Degre`ve , J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 755-781.
- Arnaiz, C., Buffiere , P., Elmaleh, S., Lebrato, J., & Moletta, R. (2003). Anaerobic Digestion of Dairy Wastewater by Inverse Fluidization: The Inverse Fluidized Bed and the Inverse Turbulent Bed Reactors. *Environmental Technology*, **24**(11), 1431–1443.
- Arnaiz, C., Elmaleh, S., Lebrato, J., & Moletta, R. (2005). Start- up of an anaerobic inverse turbulent bed reactor fed with wine distillery wastewater using pre-colonised bioparticles. *Water Science and Technology*, **5**(1), 153–158.
- Bello, M. M., Abdul Roman, A., & Porusothaman, M. (2017). Applications of fluidized bed reactors in wastewater treatment – A review of the major design and operational parameters. *Journal of Cleaner Production*, **141**, 1492-1514.
- Buffiere , P., Steyer , J., Fonade , C., & Moletta , R. (1998). Modelling and Experiments on the Influence of Biofilm Size and Mass Transfer in a Fluidized Bed Reactor for Anaerobic Digestion. *Water Research*, **32**, 657-668.
- Campos-Díaz, K., Bandala-González, E., & Limas-Ballesteros, R. (2012). Fluid bed porosity mathematical model for an inverse fluidized bed bioreactor with particles growing biofilm. *Journal of Environmental Management*, **104**, 62-66.
- Chen, C., & Chen, S. (2000). Biofilm characteristics in biological denitrification biofilm reactors. *Water Science and Technology*., **41**(4), 147-154.
- Cheng, Y., & Zhu, J. (2005). CFD Modelling and Simulation of Hydrodynamics in Liquid-Solid Circulating Fluidized Beds. *The canadian journal of chemical engineering*, **83**(2), 177-185.
- Cresson Romain, Renaud Escudié, Jean-Philippe Steyer, Jean-Philippe Delgene`s, & Nicolas Bernet. (2008). Competition between planktonic and fixed

- microorganisms during the start-up of methanogenic biofilm reactors. *Water Research*, **42**(3), 792-800.
- Das, B., Ganguly, U., Bar, N., & Das, S. (2015). Holdup prediction in inverse fluidization using non-Newtonian pseudoplastic liquids: Empirical correlation y ANN modeling. *Power Technology*, 83-90.
- Davarnejad, R., Eshghipour, R., Abdi, J., & Dehkord, F. (2014). CFD Modeling of a Binary Liquid-Solid Fluidized Bed. *Middle-East Journal of Scientific Research*, **19**(10), 1272-1279.
- Deen, N., Van Sint Annaland, M., Van der Hoef, M., & Kuipers, J. (2007). Review of discrete particle modeling of fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, **62**(1-2), 28-44.
- Diez Blanco, V., Encina, P., & Fdz-Polanco, F. (1995). Effects of biofilm growth, gas and liquid velocities on the expansion of an anaerobic fluidized bed reactor (AFBR). *Water Research*, **29**(7), 1649–1654.
- Domínguez-Hernández, E. (2016). Diseño e implementación de un reactor de lecho semifluidizado inverso para el tratamiento anaerobio de un efluente de la industria citrícola. Tesis de maestría. Orizaba, Veracruz: Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Esposito, G., Frunzo, L., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes. *Environmental Technology*, **33**(24), 2733-2740.
- Fan, L., Muroyama, K., & Chern, S. (1982). Hydrodynamic characteristics of inverse fluidization in liquid-solid y gas-liquid-solid systems. *The Chemical Engineering Journal*, **24**(2), 143-150.
- Femin Bendict, R., Kumaresan, G., & Velan, M. (1998). Bed expansion and pressure drop studies in a liquid-solid inverse fluidised bed reactor. *Bioprocess Engineering*, **19**(2), 137–142.

- Fernández, N., Montalvo, S., Borja, R., Guerrero, L., Sánchez, E., Cortés, I., . . . Raposo, F. (2008). Performance evaluation of an anaerobic fluidized bed reactor with natural zeolite as support material when treating high-strength distillery wastewater. *Renewable Energy*, **33**(11), 2458-2466.
- García Calderón , D., Buffiere, P., Elmaleh, S., & Moletta, R. (1998). Anaerobic digestion of wine distillery wastewater in down-flow fluidized bed. *Water Research*, **32**(12), 3593-3600.
- García Calderón, D., Buffiere, P., Moletta, R., & Elmaleh, S. (1998a). Influence of Biomass Accumulation on Bed Expansion Characteristics of a Down-Flow Anaerobic Fluidized-Bed Reactor. *Biotechnology and Bioengineering.*, **57**(2), 136-144.
- Houbron, E., Alvarado-Lassman, A., Zepeda, A., & Rustrian, E. (2012). Methane yield and microscopic observation as monitoring biofilm behavior parameters, during start up phase of anaerobic inverse fluidized bed reactor. *African Journal of Biotechnology*, **11**(78), 14392-14398.
- Huilin, L., Yurong , H., Wentie, L., Ding, J., Gidaspowc, D., & Bouillard, J. (2004). Computer simulations of gas–solid flow in spouted beds using kinetic–frictional stress model of granular flow. *Chemical Engineering Science*, **59**(4), 865-878.
- Karamanev, D., & Nikolov, L. (1996). Application of Inverse Fluidization in Wastewater Treatment: From Laboratory to Full-Scale Bioreactors. *Environmental Progress*, **15**(3), 194-196.
- Khan, M., Hussain, M., Mansourpour, Z., Mostoufi, N., Ghasem, N., & Abdullah, E. (2014). CFD simulation of fluidized bed reactors for polyolefin production –A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **20**, 3919–3946.
- Khan, M., Mitra, S., Karim, I., Ghatage, S., Peng, Z., Doroodchi, E., . . . Evans, G. (2015). Bed Expansion Behaviour in a Binary Solid-Liquid Fluidised Bed With

- Different Initial Solid Loading-CFD Simulation and Validation. *Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, 1-6.
- Kothari, R., Pandey, A., Kumar, S., Tyagi, V., & Tyagi, S. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **39**, 174-195.
- Kuipers, J., & Van Swaij, W. (1998). Computational Fluid Dynamics Applied To Chemical Reaction Engineering. *Advances in Chemical Engineering*, 227-328.
- Laín, S. (2008). Evaluation of the Eulerian and Lagrangian approaches to model the dispersed phase in non-uniform turbulent particle-laden flows. *Ingeniería y Competitividad*, **10**(1), 9-20.
- Levin, M., & Gealt, M. (1997). Biotratamiento de residuos tóxicos y peligrosos :selección, estimación, modificación de microorganismos y aplicaciones. España: McGraw-Hill.
- Lim, J. W., & Wang, J. Y. (2013). Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste. *Waste Management*, **33**(4), 813-819.
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **45**, 540-555.
- Michaud , S., Bernet , N., Buffiere, P., & Delgenes , J. (2005). Use of the methane yield to indicate the metabolic behaviour of methanogenic biofilms. *Process Biochemistry*, **40**(8), 2751-2755.
- Moraes, B. S., Zaiat, M., & Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **44**, 888-903.

- Nikov, I., & Karamanev, D. (1991). Liquid-Solid Mass Transfer in Inverse Fluidized Reactor. *AIChE Journal*, **37**(5), 781-784.
- Pan, H., Chen, X.-Z., Liang, X.-F., Zhu, L.-T., & Luo, Z.-H. (2016). CFD simulations of gas–liquid–solid flow in fluidized bed reactors- A review. *Powder Technology*, **299**, 235-258.
- Pöschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, **87**, 3305-3321.
- Rajeshwari, K., Balakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K., & Kishore, V. (2000). State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **4**(2000), 135-156.
- Ramamurthy, K., & Subbaraju, K. (1973). Bed Expansion Characteristics of Annular Liquid-Fluidized Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design y Development*, **12**(2), 184-189.
- Ramírez-Muñoz, J. (2007). Interacción hidrodinámica de un cuerpo esférico con la estela laminar de otro en un fluido newtoniano con flujo uniforme. Tesis de Doctorado. CDMX, México: Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- Ranade, V. (2001). Computational flow modeling for chemical reactor engineering. Academic Press. Academic Press.
- Renganathan, T., & Krishnaiah, K. (2005). Voidage characteristics and prediction of bed expansion in liquid–solid inverse fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, **60**(10), 2545–2555.
- Riba, J., & Couderc, J. (1977). Expansion de couches fluidisées par des liquides. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **55**(2), 118-121.
- Richardson, J., & Zaki, W. (1954). The sedimentation of a suspension of uniform spheres under conditions of viscous flow. *Chemical Engineering Science*, **3**(2), 65-73.

- Rosas-Mendoza, E. (2018). Digestión anaerobia de efluentes de la industria citrícola. Tesis de Doctorado. Orizaba: Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Rosas-Mendoza, E. S., Méndez-Contreras, J. M., Martínez-Sibaja, A., Vallejo-Cantú, N. A., & Lassman-Alvarado, A. (2017). Anaerobic digestion of citrus industry effluents using an Anaerobic Hibrid Reactor. *Clean Technologies and Environmental Policy*. doi:10.1007/s10098-017-1483-1
- Roy, S., Dhotre, M., & Joshi, J. (2006). CFD Simulation of Flow and Axial Dispersion in External Loop Airlift Reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, **84**(8), 677-690.
- Sentürk, E., Engin, G. O., & İnce, M. (2012). The effect of transient loading on the performance of a mesophilic anaerobic contact reactor at constant feed strength. *Journal of Biotechnology*, **164**, 232– 237.
- Sivasubramanian, V. (2010). Gas-liquid mass transfer in three-phase inverse fluidized bed reactor with Newtonian and non Newtonian fluids. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, **5**(2), 361-368.
- Sokół , W., & Woldeyes, B. (2011). Evaluation of the Inverse Fluidized Bed Biological Reactor for Treating High-Strength Industrial Wastewaters. *Advances in Chemical Engineering and Science*, **1**, 239-244.
- Sowmeyan , R., & Swaminathan, G. (2008). Performance of inverse anaerobic fluidized bed reactor for treating high strength organic wastewater during start-up phase. *Bioresource Technology*, 6280-6284.
- Syamlal , M., & O'Brien, T. (1989). Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed. *AIChE Symposium Series*, 22-31.
- Tavares , C., Sant'Anna Jr., G., & Capdeville, B. (1995). The effect of air superficial velocity on biofilm accumulation in a three-phase fluidized-bed reactor. *Water Research*, **29**(10), 2293-2298.

- Thaiyalnayaki, D., & Sowmeyan, R. (2012). Effect of Carrier Materials in Inverse Anaerobic Fluidized Bed Reactor for Treating High Strength Organic Waste Water. *Environment Analytic Toxicol.*
- Trinet, F., Heim, R., Amar, D., & Chang, H. (1991). Study of biofilm and fluidization of bioparticles in a three-phase liquid fluidized-bed reactor. *Water Science and Technology*, **23**, 1347-1354.
- Ulaganathan, N., & Krishnaiah, K. (1996). Hydrodynamic characteristics of two-phase inverse fluidized bed. *Bioprocess Engineering*, **15**(3), 159-164.
- Van der Hoef, M., Van Sint Annaland, M., Deen, N., & Kuipers, J. (2008). Numerical Simulation of Dense Gas-Solid Fluidized Beds: A Multiscale Modeling Strategy. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **40**(1), 47–70.
- Van Lier, J., Mahmoud , N., & Zeema, G. (2008). Anaerobic Wastewater Treatment. *Biological Wastewater Treatment* (pp. 401-442). Cambridge: Cambridge University Press.
- Vijaya Lakshmi, A., Balamurugan, M., Sivakumar, M., Newton Samue, T., & Velan, M. (2000). Minimum fluidization velocity y friction factor in a liquid-solid inverse fluidized bed reactor. *Bioprocess Engineering*, **22**(5), 461±466.
- Wang, S., Sun, J., Yang, Q., Zhao, Y., Gao , J., & Liu, Y. (2014). Numerical simulation of flow behavior of particles in an inverse liquid–solid fluidized bed. *Power Technology*, **261**, 14-21.
- Wang, S., Wang, X., Wang, X., Shao, B., Ma, Y., Zhao, J., & Sun, Q. (2018). Numerical simulation of flow behavior of particles in an inverse liquid–solid fluidized bed with a jet using CFD-DEM. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **82**, 214-225.
- Wen, C., & Yu, Y. (1966). Mechanics of Fluidization. *The Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 110-111.

- Ying , Z., Yang , L., Miao , H., & Zhao, J. (2014). Acclimation of the trichloroethylene-degrading anaerobic granular sludge and the degradation characteristics in an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Water Science & Technology*, **69**, 120-127.
- Zamora Pina, M. (2016). *Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio. Tesis de Licenciatura*. Cartagena.
- Zhang, K., Wu, G., Brandani, S., Chen, H., & Yang, Y. (2012). CFD simulation of dynamic characteristics in liquid–solid fluidized beds. *Powder Technology*, **227**, 104-110.