

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



Evaluación del Tiempo de Retención Hidráulica en un Sistema  
Bioelectroquímico con Ánodo a Base de un Compósito de  
Poliuretano/Grafito/Polipirrol en el Tratamiento de Agua Residual  
Municipal

Presentado por:

**LUIS GERARDO GONZÁLEZ CHANDOMI**

**TESIS**

Presentada como Requisito Parcial

Para obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Buenavista, saltillo, Coahuila, México

Noviembre 2016

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación del Tiempo de Retención Hidráulica en un Sistema  
Bioelectroquímico con Ánodo a Base de un Compósito de  
Poliuretano/Grafito/Polipirrol en el Tratamiento de Agua Residual  
Municipal

TESIS

Presentada Por:

**LUIS GERARDO GONZALEZ CHANDOMI**

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador, como requisito para  
obtener el Título de:

**INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL**

Aprobado por el Comité de Asesoría:



Dra. Silvia Yudith Martinez Amador.  
Asesor principal.



M.C. Pedro Pérez Rodríguez  
Coasesor



M.C. Juan M. Cepeda Dovala  
Coasesor  
Universidad Agraria Antonio Narro  
ANTONIO NARRO



Dr. Luis Samaniego Morales  
Coordinador de la División de Ingeniería  
Coordinación de Ingeniería  
Buenavista, Saltillo Coahuila, México, febrero 2016.



UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación del Tiempo de Retención Hidráulica en un Sistema  
Bioelectroquímico con Ánodo a Base de un Compósito de  
Poliuretano/Grafito/Polipirrol en el Tratamiento de Agua Residual  
Municipal

Por:

LUIS GERARDO GONZALEZ CHANDOMI

TESIS

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador:

  
M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala  
Presidente del jurado.

  
M.C. Pedro Pérez Rodríguez  
Sinodal

  
Dr. José A. Rodríguez de la Garza  
Universidad Agraria  
"ANTONIO NARRO"

  
Dr. Luis Samaniego Mosen  
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México. Noviembre 2016.

## DEDICATORIA.

A mis padres Sr. Fernando González Ocaña y Sra. Orfilia Chandomi García, por su constante, arduo apoyo incondicional brindado y por sus palabras de aliento cada vez que las necesite. El logro hoy alcanzado no solamente es mío si no les pertenece a ustedes.

A mis hermanos Esther, Gabriel González Chandomi y sus respectivas familias: les agradezco sus muestras de afecto y de cariño y sobre todo por darme el apoyo moral cada vez que lo necesite y por qué siempre creyendo en mi capacidad para lograr mi objetivo.

A la M.C. Alejandra Rosario Sánchez Escobar, por el apoyo incondicional y disposición para ayudar en cada uno de los momentos que así lo requerí. Por la motivación a seguir de frente y nunca darme por vencido.

Al M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala, que más que un excelente catedrático es un muy buen amigo, quien siempre se dio el tiempo para brindarme sus consejos y sugerencias por exhortarme a nunca quedarme en una zona de confort y buscar siempre cosas nuevas benéficas para mi preparación.

A mis amigas que de una bonita amistad pasaron a ser más que eso; para mí son mi segunda familia mi hermanas, estoy inmensamente agradecido con Dulce María Bautista Redondo por su sinceridad impecable , Diana Rosales Barranco por su paciencia y serenidad para hacerte reflexionar y ver las cosas, gracias por permitirme formar parte de sus vidas en estos cinco años maravillosos de nuestra carrera aunque muchas veces hubieron momentos de enojos, tristezas y felicidad, ni un solo instante lo cambiaría, pues es lo que nos ayudó a consolidar nuestra bella amistad.

Por su apoyo incondicional a mi pequeñita linda Liliana Martínez Cortez quien siempre ha estado a mi lado en momentos bueno y malos y me ayudado a mantenerme firme en esta travesía de la vida universitaria.

A mis abuelos Atalía García y Fernando González Zarate, que aun que ya no se encuentren físicamente a mi lado, siempre estarán en mi corazón, por haber creído en mi hasta sus últimos momentos y por cada uno de sus maravillosos consejos. “he aquí el sueño se logró realizar “ya soy ingeniero”.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente hasta el día de hoy, estoy agradecido con mi padre dios por haberme permitido realizar este logro, por haberme guiado a lo largo de mi vida por un camino de paz y brindarme la serenidad mantener firme en mis pensamientos y el objetivo hoy alcanzado. Por darme la fortaleza en mis momentos de debilidad y permitirme salir adelante ante la adversidad.

A mi Alma mater la “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro”, por brindarme la oportunidad de pertenecer a ella y darme todas las oportunidades para lograr mi sueño mí meta el ser ingeniero, un buitre de la “Narro”.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador y al M.C. Pedro Pérez Rodríguez, primero que nada por haberme brindado la oportunidad y la confianza para realizar un desempeño dentro de sus trabajo de investigación y su laboratorio, por aportar no únicamente el capital económico sino por su aportación invaluable de su conocimiento técnico y científico para la realización de la investigación.

Gracias a cada uno de mis compañeros de la carrera que me permitieron formar parte de sus vidas y aprender cosas nuevas de cada uno de ellos, vivimos momentos inolvidables.

A mis compañeros y amigos tesistas Limber N. de león Samayoa, Andrea Yakelin Pérez Moreno y Liliana Martínez Cortez, por su compañía y apoyo en nuestras emocionantes horas de laboratorio.

Gracias a los ingenieros Ramón y Pedro Bautista Redondo porque sin conocerme me brindaron su amistad y apoyo en el momento que más lo necesite.

A la planta académica del programa docente Ingeniero Agrícola y Ambiental por cada una de sus aportaciones a mi formación profesional.

Le estaré siempre muy agradecido a mi sobrino el Ingeniero Alberto Roque Enríquez, quien me motivo a dar el paso y retomar los estudios, gracias a su insistencia y por brindarme la confianza de compartir varios años de nuestra vida universitaria el mismo techo.

## INDICE GENERAL

ABREVIATURAS .....	x
RESUMEN .....	xi
CAPITULO I INTRODUCCIÓN .....	12
1.1. Uso del agua.....	12
1.2. Justificación. ....	14
OBJETIVOS.....	15
HIPÓTESIS.....	16
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Tratamiento del agua.....	17
2.1.2. Tratamientos convencionales. ....	18
2.1.3. Tratamientos específicos.....	18
2.1.4. Tratamiento biológico. ....	19
2.1.5. Reactores. ....	23
2.2. Biopelículas. ....	24
2.2.1. Etapas de formación de las biopelículas .....	24
2.2.2. Ventajas de las biopelículas. ....	27
2.2.3. Desventajas de la formación de biopelículas.....	30
2.2.4. Métodos de control microbiano.....	31
2.3. Celdas de combustible microbiana. ....	31
2.3.1. Tipos de celdas de combustible microbianas con membranas de intercambio protónico. ....	33
2.3.2. Membranas de intercambio protónico.....	34
2.3.3. Polímeros conductores.....	35
CAPITULO III METODOLOGÍA.....	39
3.1. Localización del área experimental.....	39
3.2 Estrategia experimental. ....	39
3.3. Diseño del reactor.....	40
3.4. Preparación de los electrodos. ....	40
3.4.1. Recubrimiento de los electrodos con grafito.....	41

3.4.2. Polimerización química.....	42
3.4.2.1. Calculo de la cantidad de moles de Pirrol utilizados.....	42
3.4.2.2 Calculo de cloruro férrico empleado en la polimerización.....	43
3.4.2.3. Volumen de electrodos.....	43
3.4.2.4. Volumen total del boirreactor.....	44
3.5. Acondicionamiento de la membrana.....	44
3.6. Construcción del reactor tipo H.....	44
3.7. Procedimiento para la determinación de la Demanda Química de oxígeno. ...	46
3.9. Determinación de solidos totales.....	48
3.9.1. Determinación de DBO <sub>5</sub> .....	49
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	50
4.1. Adhesión de materiales.....	50
4.2 Caracterización eléctrica de la Celda de Combustible Microbiana (CCM), “reactor de flujo ascendente tipo H”.....	51
4.3. Eficiencia de remoción de materia orgánica (DQO).....	52
4.4 Demanda bioquímica de oxigeno (DBO <sub>5</sub> ).....	53
4.5 Eficiencia de remoción de solidos totales (ST).....	54
4.6 Efecto del pH en el proceso de tratamiento de agua en la CCM.....	55
4.7 Remoción de huevos de helmintos.....	55
CONCLUSIÓN .....	58
LITERATURA CITADA.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Etapas del proceso biológico de la digestión anaerobia (Pérez <i>et al.</i> , 2004).....	22
<b>Figura 2.2.</b> Fases de formación de las biopelículas (Dirckx y Davies, 2003).....	26
<b>Figura 2.3.</b> Procesos de descontaminación que tienen lugar en barreras permeables reactivas (Díaz <i>et al.</i> , 1999). .....	29
<b>Figura 2.4.</b> Funcionamiento de una celda de combustible microbiana. (Castro, 2014). .....	33
<b>Figura 2.5.</b> Polímeros conductores más comunes (Corona <i>et al.</i> , 2010).....	36
<b>Figura 3.1.</b> Ubicación del laboratorio de Biotecnología UAAAN, (INEGI 2015). .....	39
<b>Figura 3.2.</b> Reactor ensamblado y en funcionamiento para evaluar el experimento. .....	45
<b>Figura 4.1.</b> Huevos de helmintos presentes en agua residual.....	56

## INDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 3.1.</b> Porcentaje de adhesión de grafito.....	38
<b>Ecuación 3.2.</b> Porcentaje de adhesión de polipirrol. ....	39
<b>Ecuación 3.3.</b> Moles a utilizar de pirrol. ....	43
<b>Ecuación 3.4.</b> Determinación de la masa del cloruro férrico a utilizar.....	43
<b>Ecuación 3.5.</b> Calculo del volumen total ocupado por los electrodos. ....	43
<b>Ecuación 3.6.</b> Porcentaje de remoción biológica. ....	46
<b>Ecuación 3.7.</b> Huevos de helmintos contenidos en el agua residual y tratada. ....	48
<b>Ecuación 3.8.</b> Determinación de sólidos totales contenida en el agua residual.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Descripción técnica de la membrana CMI-7000 (Membranes International Inc.) .....	35
<b>Tabla 3.1.</b> Volumen del biorreactor con respecto a sus componentes. ....	44
<b>Tabla 4.1.</b> Porcentaje de Adhesión de Materiales en los electrodos sintetizados. ....	50
<b>Tabla 4.2.</b> Caracterización electroquímica del reactor de flujo ascendente tipo H en tres TRH.....	51
<b>Tabla 4.3.</b> Promedios de la eficiencia de materia orgánica en diferentes TRH .....	52
<b>Tabla 4.4.</b> Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ) en diferentes TRH.....	53
<b>Tabla 4.5.</b> Eficiencia de Remoción de sólidos totales.....	54
<b>Tabla 4.6.</b> Efecto del pH en el proceso del tratamiento de agua residual en la CCM a distintos TRH.....	55
<b>Tabla 4.7.</b> Porcentaje de remoción de huevos de helminto .....	56
<b>Tabla 4.8.</b> Comparación de resultados obtenidos en otras investigaciones en reactores tipo AUSB con diferentes TRH.....	57

## ABREVIATURAS

<b>CCM</b>	Celda de Combustión microbiana
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>DBO<sub>5</sub></b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días
<b>MEMS</b>	Sistemas micro electromecánicos
<b>mL</b>	mililitros
<b>Nm</b>	Nanómetros
<b>PEM</b>	Membranas de intercambio protónico
<b>PM</b>	Peso molecular
<b>PPy</b>	Polipirrol
<b>PU</b>	Poliuretano
<b>PH</b>	Potencial hidrogeno
<b>RBC</b>	Contactores biológicos rotatorios
<b>SBR</b>	Sequencing Batch Reactors
<b>ST</b>	Sólidos totales
<b>TRH</b>	Tiempo de retención hidráulica
<b>UASB</b>	Upflow Anaerobic Sludge Blanquet

## RESUMEN

La presente investigación fue realizada en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizada en Saltillo Coahuila, México. Con el principal objetivo de evaluar en función del tiempo de retención hidráulica (TRH) la degradación de materia orgánica, la concentración de huevos de helmintos y la generación de voltaje que se pueden obtener en la implementación de un sistema bioelectroquímico como lo fue un reactor tipo H de flujo ascendente a escala piloto, para el tratamiento de agua residual municipal. El experimento se llevó a cabo a temperatura ambiente. Fueron evaluados tres TRH los cuales fueron de 12, 24 y 36 horas. Los mejores resultados se obtuvieron en el TRH de 36 horas, donde fue detectada una eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (ERDQO) de 91.75%, una eliminación de huevos de helminto del 95.9%, una generación de voltaje 93.29 mV, una remoción de sólidos totales (ST) de 27.8% y un pH final de 8.1. Por lo cual se deduce que a mayor TRH la eficiencia en los parámetros determinados fue más alta. Se sugiere más estudios a TRH más altos y a temperaturas constante y mayor a los 15°C.

**Palabras claves:** aguas residual, tratamiento, remoción, reactor tipo H, tiempos de retención hidráulica, sólidos totales, huevos de helmintos.

Correo electrónico; Luis Gerardo González Chandomi, [luisg.gonzalez@outlook.com](mailto:luisg.gonzalez@outlook.com).

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Uso del agua.

El agua es empleada de diversas formas en todas las actividades humanas, tales como son la agricultura, abastecimiento público, industria autoabastecida, en hidroeléctricas para la generación de energía eléctrica, son empleadas ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. Debido a la gran cantidad de aguas residuales generadas por las distintas actividades que se realizan en el país y el alto nivel de contaminantes que estas tienen, la descarga directa de estas puede producir daños al medio ambiente, especialmente en el acuático, es por esto que se hace necesario tratar las aguas residuales

El agua residual es un producto inevitable de las actividades humanas, se recolecta y transporta por medio de sistemas de alcantarillado hacia un sitio de descarga final, los cuales más tarde son descargados en cuerpos de aguas naturales o a una planta de tratamiento.

Los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales ofrecen excelentes eficiencias de remoción, sin embargo no reúnen los criterios necesarios para lograr la sustentabilidad de las inversiones en México y países en vías de desarrollo donde el recurso capital y mano de obra calificada son limitados.

Por ello surge la necesidad de adoptar nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas, capaces remover los principales contaminantes, tales como son la remoción de la materia orgánica, organismo biológicos dañinos

presenten en el agua a tratar, mediante la utilización de materiales de un costo bajo; como lo fue en nuestro caso la espuma de poliuretano, la utilización del grafito en aerosol, y el polímero conductor polipirrol y la membrana de intercambio protónico la CMI-7000, tanto para la construcción del reactor y su mantenimiento haciendo de este una tecnología económicamente factible, además de permitir evitar riesgos sanitarios en el uso de sus efluentes. Todo esto se demuestra mediante el experimento realizado a escala piloto nivel laboratorio de un reactor de flujo ascendente tipo H, en el cual se trabajó mediante todo el experimento con diversos tiempos de retención hidráulica, durante diversos ciclos establecidos para la evaluación del reactor. Donde se evaluaron las siguientes determinaciones, la demanda química de oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), sólidos totales, eliminación de huevos de helminto.

## **1.2. Justificación.**

De acuerdo a CONAGUA y SEMARNAT (2010), la mayor parte del agua que se extrae en el país se destina a las actividades agropecuarias: en 2010 cerca del 77% se utilizó para el riego de 6.5 millones de hectáreas, así como para las actividades pecuarias y acuícolas. Le siguió el uso para abastecimiento público, con 14% del volumen total de agua extraída y el industrial y la generación de energía eléctrica con 9%. Si se analiza el origen del agua concesionada para extracción en el país en 2009, 63% del volumen provino de las fuentes superficiales, mientras que el restante 37%, de las subterráneas. La extracción de fuentes superficiales se ha incrementado poco más de 15% entre el año 2000 y 2009, mientras que la extracción de agua subterránea se mantuvo prácticamente sin cambios.

Es por esto el mayor motivo por el cual recurrir al tratamiento de las aguas residuales ya que es una excelente opción para evitar el desabasto del recurso hídrico en el país.

# OBJETIVOS

## Objetivo general

Evaluar el efecto de tres tiempos de retención hidráulica en una celda de combustible microbiana a escala planta piloto con ánodo a base de un compuesto de poliuretano/grafito/polipirrol en el tratamiento de agua residual municipal.

## Objetivos específicos

1. Evaluar la construcción y funcionamiento de la celda de combustible microbiana a escala planta piloto según parámetros previamente establecidos.
2. Evaluar el desempeño del sistema bioelectroquímico a un tiempo de retención hidráulica de 36 horas.
3. Evaluar el desempeño del sistema bioelectroquímico a un tiempo de retención hidráulica de 24 horas.
4. Evaluar el desempeño del sistema bioelectroquímico a un tiempo de retención hidráulica de 12 horas.

## **HIPÓTESIS**

En la aplicación de un sistema bioelectroquímico, reactor tipo H a escala piloto para el tratamiento de aguas residual municipal, se obtendrá una mayor eficiencia de remoción de materia orgánica y de huevos de helmintos a un tiempo de retención hidráulica de 36 horas.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Tratamiento del agua.**

Debido a la gran cantidad de aguas residuales generadas por las distintas actividades que se realizan en el país y el alto nivel de contaminantes que estas tiene, la descarga directa de estas pueden producir daños al medio ambiente, especialmente en el acuático, es por esto que se hace necesario tratar las aguas residuales o aguas servidas antes de descargarlas, de manera de reducir sus niveles de contaminación y producir el menor daño posible.

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, en tanto que las segundas son aquellas descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida (CONAGUA, 2013).

En el año 2012, las 2,342 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en operación en el país trataron 99.8 m<sup>3</sup>/s, es decir el 47.5% de los 210.2 m<sup>3</sup>/s recolectados en los sistemas de alcantarillado.

La industria trató 60.5 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, en 2530 PTAR en operación a nivel nacional. (CONAGUA, 2013).

Las aguas residuales se deben considerar como una materia prima que contienen una serie de productos útiles, como el agua, la materia orgánica y algunas sales y otros productos perjudiciales.

Seoáñez (2005), menciona que es frecuente que el agua residual contenga cierta energía acumulada en forma de energía potencial, al haber sido empleada previamente para usos urbanos como agua potable, para irse cargando después con los productos vertidos a lo largo de su utilización. Es necesario analizar todas las técnicas existentes de tratamiento de las aguas residuales, entre los más comunes se pueden encontrar las siguientes.

### **2.1.2. Tratamientos convencionales.**

Incluyen las operaciones encuadradas en los pretratamientos y en los niveles primario y secundario, tales como el desbaste, la sedimentación, la flotación, la coagulación-floculación y los tratamientos biológicos.

### **2.1.3. Tratamientos específicos.**

Son procedimientos que permiten la eliminación de contaminantes que no pueden ser eliminados mediante los tratamientos convencionales. Pueden clasificarse en dos grandes grupos, en función del principio en el que se basan:

Químicos: por medio de reacciones químicas, fundamentalmente de oxidación, se cambia la naturaleza química del contaminante para transformarlo en una sustancia inocua o que pueda ser fácilmente eliminada mediante tratamientos convencionales.

Físicos: no se modifica la estructura química del contaminante, sino que se elimina éste mediante técnicas como filtración (fundamentalmente con membranas), la adsorción o el intercambio iónico, que lo retienen y separan del agua. (García, 2010).

#### **2.1.4. Tratamiento biológico.**

Constituye una serie de importantes procesos de tratamientos que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que se destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes.

En el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental el elemento aceptor de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas.

Atendiendo a cuál es dicho aceptor de electrones distinguimos tres casos:

Sistemas aerobios: la presencia de  $O_2$  hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias.

Sistemas anaerobios: en este caso el aceptor de electrones puede ser el  $CO_2$  o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido,  $CH_4$ .

Sistemas anóxicos: se denominan así a los sistemas en los que la ausencia de  $O_2$  y la presencia de  $NO_3$  hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en  $N_2$ , elemento completamente inerte.

#### **2.1.4.1. Procesos biológicos aerobios.**

Son muchas las posibilidades de tratamiento:

Cultivos en suspensión: proceso de fangos activados (lodos activados), y modificaciones en la forma de operar; aireación prolongada, contacto-estabilización, reactor discontinuo secuencial (SBR).

Cultivos fijos: los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocido como lechos bacterianos o filtros biológicos).

##### **2.1.4.1.1 Fangos activados: proceso básico.**

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes.

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento, un parámetro muy importante es el de la aireación, intensidad de carga, también la denominada edad celular.

Reactores discontinuos secuenciales (SBR): Es una opción muy válida para situaciones en las que se dispone de poco espacio. Son versátiles en cuanto a las

condiciones de operaciones y habitualmente se utilizan columnas de burbujeo como reactores.

Filtros percoladores: Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie.

Contactores Biológicos Rotatorios (RBC): biodiscos: consiste en una serie de placas o discos, soportados en un eje y parcialmente sumergido (40%) en una balsa que contiene el agua residual (Rodríguez *et al.*, 2006).

#### **2.1.4.2. Procesos biológicos anaerobios.**

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Realmente, es un proceso complejo en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono.

Hidrolisis: es la ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas. En este proceso no se produce metano.

Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis): los productos finales de la hidrolisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrogeno y dióxido de carbono.

Metanogénesis: es la etapa crítica en el proceso de la degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso (Rodríguez *et al.*, 2006).

A continuación se ilustra una visión generalizada del proceso anaerobio.

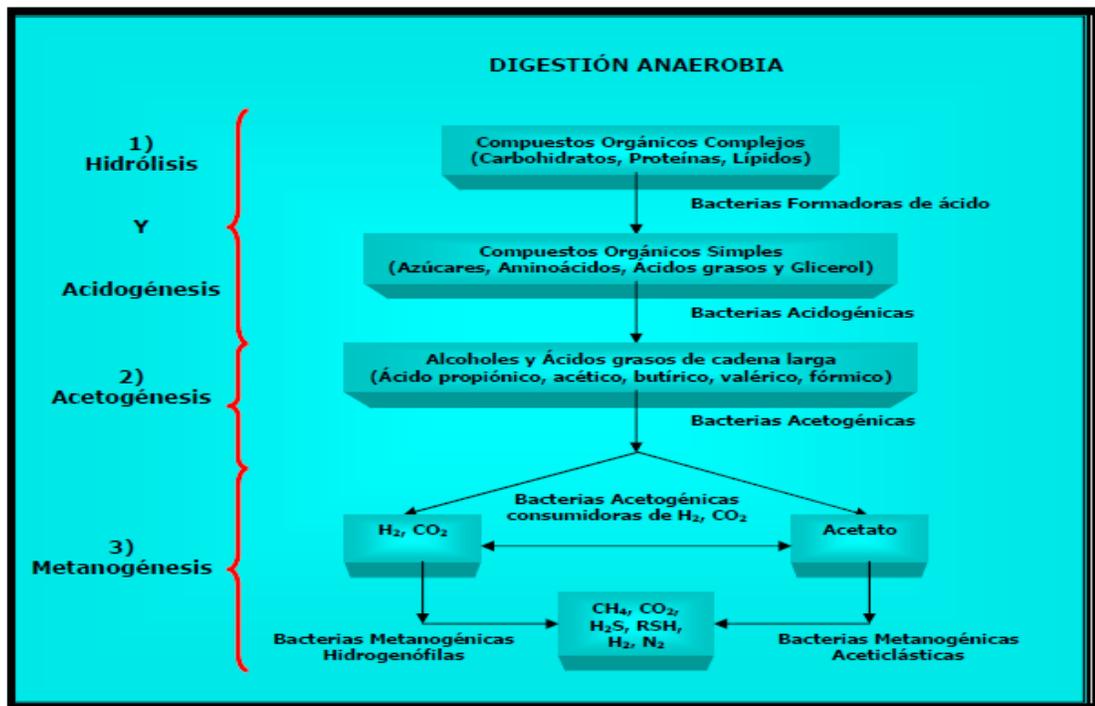


Figura 2.1 Etapas del proceso biológico de la digestión anaerobia (Pérez *et al.*, 2004).

Dentro de los procesos biológicos anaerobios se mencionan los siguientes reactores:

### **2.1.5. Reactores.**

El desarrollo del tratamiento anaerobio ha sido paralelo al desarrollo del tipo de reactor donde llevar a cabo el proceso. A continuación se mencionan los más utilizados.

Reactor de contacto (mezcla completa con recirculación de biomasa): Consiste un tanque cerrado con un agitador donde tiene una entrada para el agua residual a tratar y dos salidas, una para el biogás generado y otra para la salida del efluente.

Reactor de manto de lodos y flujo ascendente (UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket): estos reactores solucionan el problema de recirculación de lodos al aumentar la concentración de biomasa en el reactor manteniéndola en su interior.

Filtro anaerobio: en este caso los microorganismos anaeróbicos se desarrollan sobre la superficie de un sólido formando una biopelícula de espesor variable.

Reactor anaerobio de lechos fluidizado: son columnas en cuyo interior se introduce partículas de un sólido poroso (arena, piedras pómez, biolita, etc.) de un tamaño variable (1-5 mm) con el objetivo de lograr desarrollar sobre la superficie una biopelícula bacteriana que lleve a cabo la degradación anaerobia.

El tratamiento anaerobio, constituye una forma eficaz de tratar aguas y residuos de alta carga orgánica, siendo una tecnología madura y contribuyendo no solo a la eliminación de la materia orgánica, sino a su aprovechamiento energético derivado de la utilización del metano producido (Rodríguez *et al.*, 2006).

## **2.2. Biopelículas.**

Hace referencia al agregado o ensamble de microorganismo y productos extracelulares asociados a un sustrato. Siendo este el resultado de la colonización, crecimiento y metabolismo celular microbiano organizado sobre superficies tejidos (por ejemplo el caso de la placa dental) (Betancourt *et al.*, 2004).

### **2.2.1. Etapas de formación de las biopelículas**

La formación de las biopelículas está determinada por la adsorción de moléculas del huésped y bacterias a la superficie. Durante la primera fase, el sustrato tiene que ser adecuado para la adsorción reversible y, finalmente, la adhesión irreversible de la bacteria a la superficie (Nazar, 2007).

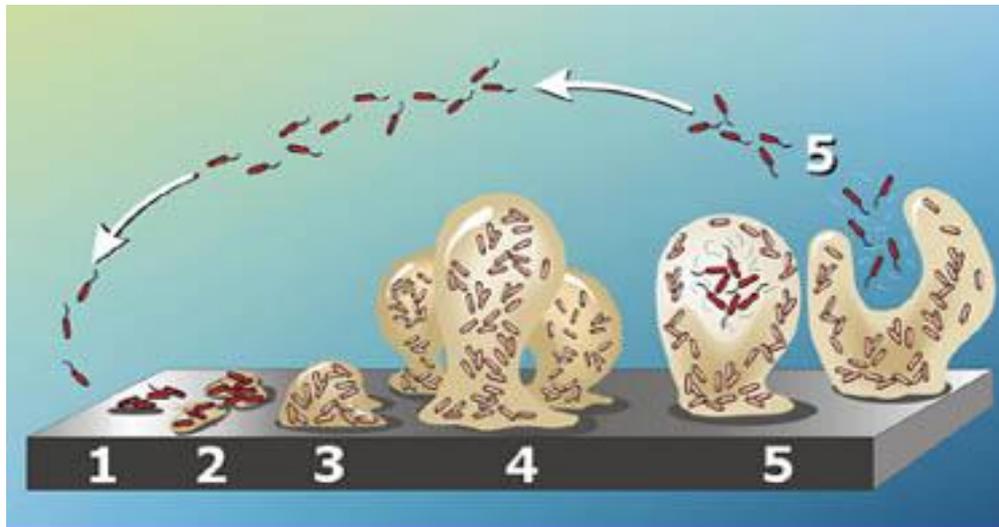
Adhesión bacteriana primaria. En esta etapa se presenta la adherencia de bacterias llamadas pioneras. Las bacterias de la biopelícula excretan sustancias poliméricas extracelulares o polímeros pegajosos (limo), las cuales atrapan y cementan las nuevas bacterias (Ochoa *et al.*, 2007).

Adhesión bacteriana secundaria. La unión entre ambas superficies se consolida por la producción de exopolisacáridos por parte de la bacteria, que se acoplan con los materiales de la superficie, por ligados específicos de receptores localizados en los pilis sexuales, fimbrias y fibrillas de la bacteria, o la unión de ambos procesos a la vez. Esta unión es irreversible y la bacteria queda firmemente unida a la superficie inerte. Durante esta fase, las bacterias planctónicas se pueden unir también unas a otras (Co-agregación), y a diferentes especies que estén ya unidas al material (Co-adhesión), formando las llamadas micro colonias de sustrato.

Maduración de la biopelícula. Una vez que la bacteria se ha unido a la superficie de forma irreversible, comienza el proceso de maduración de la biopelícula. La densidad y la complejidad de la biopelícula aumenta cuando las bacterias que lo forman comienzan a dividirse activamente (o a morir) y los compuestos extracelulares originados por las bacterias unidas interactúan con las moléculas orgánicas e inorgánicas del medio y crean el glicocálix. El crecimiento de cualquier biopelícula está limitado por la disponibilidad de nutrientes, la difusión de nutrientes hasta las células y la eliminación de los productos de desechos.

Desprendimiento activo. El equilibrio dinámico de una biopelícula se alcanza cuando las capas más externas de ésta comienzan a generar células planctónicas metabólicamente activas y capaces de dividirse, las cuales pueden colonizar nuevas superficies. Esta liberación de bacterias se puede dar por dos mecanismos: (1) Erosión (pérdida de células individuales) y (2) Migración (pérdida de agregados mayores).

En la siguiente imagen se presentan las ilustraciones de cada una de las fases de formación de una biopelícula. (fig.1.2).



**Figura 2.2.** Fases de formación de las biopelículas (Dirckx y Davies, 2003).

Cuando una bacteria se encuentra dentro de una biopelícula desarrolla diferentes interacciones metabólicas; dentro de las cuales tenemos:

**Modificación del microambiente:** son capaces de modificar el pH, según sus necesidades metabólicas. Además originan microambientes propicios para el crecimiento de organismos anaeróbicos, a pesar de la presencia de oxígeno en solución dentro del medio líquido.

**Sinergismo:** la tendencia de las bacterias a colonizar superficies es ventajosa, pues induce las relaciones Simbióticas, por ejemplo un aumento en el acceso a los nutrientes. Cuando un nutriente es requerido por un microorganismo, otro no lo puede usar, pero sí puede existir intercambio de nutrientes permitiendo la supervivencia de los microorganismos dentro del biopelícula.

**Competencia:** por adhesión, nutrientes, factores de crecimiento y espacio. Los mecanismos de acción o competencia entre estos microorganismos son diversos, incluyendo producción de antibióticos, bacteriocitas, sideróforos, lisosomas, incluso la alteración de pH a través de la producción de ácidos orgánicos, como el ácido butírico y propiónico.

Antagonismo: la colonización de una especie microbiana en presencia de otras que produzcan sustancias antagonistas para su supervivencia supone un desafío (Zambrano *et al.*, 2006).

### **2.2.2. Ventajas de las biopelículas.**

Las biopelícula pueden ser empleadas en diferentes técnicas de remediación de aguas y suelos contaminados con diferentes contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Entre las principales aplicaciones de las biopelícula se encuentran las siguientes:

#### **2.2.2.1. Biorremediación de aguas residuales.**

Las aguas residuales domésticas e industriales son ricas en materiales orgánicos y deben ser tratadas en alguna forma antes de devolverlos al ambiente. Los procesos para el tratamiento de las aguas residuales son prácticamente sistemas de cultivos microbianos a gran escala que utilizan biopelícula en los cuales las sustancias orgánicas de los desechos se degradan a dióxido de carbono, gas metano y otros nutrientes (Betancourt *et al.*, 2004).

#### **2.2.2.2. Biorremediación de suelos y aguas subterráneas.**

Cuando lo suelos o las aguas se contaminan con hidrocarburos como el petróleo, las biopelículas cumplen un papel fundamental en su biorremediación. Las bacterias oxidantes de los hidrocarburos son capaces de adherirse a las gotas insolubles de petróleo y de lograr la dispersión de la capa. Estas biopelículas están conformadas básicamente por especies de *pseudomonas*, corinebacterias, micobacterias y algunas levaduras. Sin embargo, para el buen desempeño de la

biopelícula se requieren condiciones especiales de oxígeno, temperatura, pH, nutrientes, sin las cuales la biorremediación no se produce.

De igual manera se busca resolver con la utilización de biopelículas, la contaminación de las aguas subterráneas con sustancias como alcanos y alquenos clorados usados como disolventes de limpieza. Para esto se han desarrollado las biobarreras que consisten en acumulo de biopelículas que forman una barrera impermeable para el flujo del agua contaminada a otros sistemas. El desempeño de las biopelículas dependerá de las mismas condiciones que se mencionaron antes. (Betancourth *et al.*, 2004).

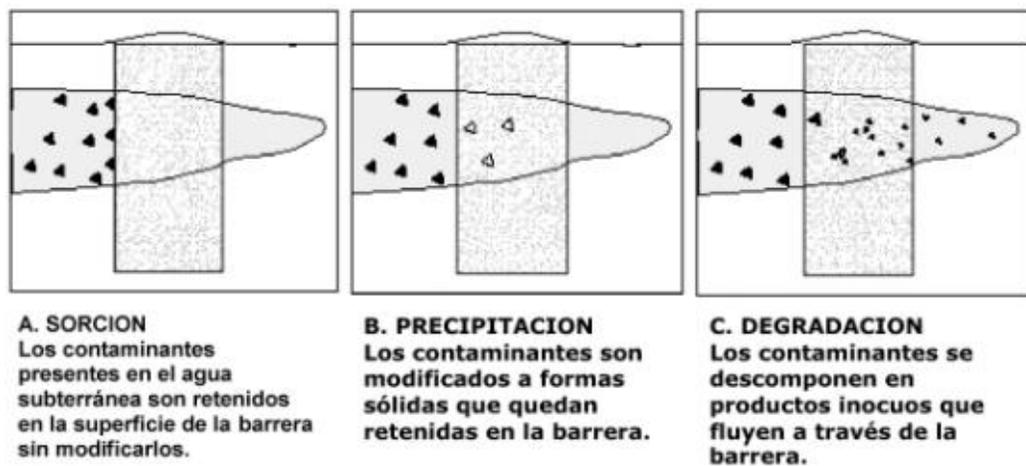
### **2.2.2.3. Biobarreras.**

Las biobarreras o barreras biológicas in situ constituyen una de las tecnologías de descontaminación del agua subterránea, agrupadas bajo la denominación de muros o barreras de tratamiento/permeables/reactivas orientada al aislamiento y a la recuperación de emplazamientos contaminados.

Una barrera biológica activa in situ es una zona local en un medio poroso natural que presenta una mayor actividad para la biodegradación de compuestos orgánicos peligrosos al tiempo que una alta capacidad de inmovilización y retención de los contaminantes. Por tanto, los contaminantes son eliminados del agua subterránea a medida que esta fluye a través de la pantalla (remediación), bajo la influencia del gradiente hidráulico natural. De esta forma, los suelos, acuíferos y otros posibles receptores a favor de gradientes están protegidos de los contaminantes. Las barreras biológicas se basan en procesos completamente biológicos o en una combinación de procesos biológicos y físico-químicos.

En el proceso de formación de una barrera biológica se inyectan en el material portador células y una solución nutritiva gracias a la cual crecen, se reproducen y

forman una biopelícula que es la responsable de los procesos biológicos y físico-químicos producidos en la biobarrera. Las biobarreras pueden ser utilizadas simplemente como sistemas de contención en acuíferos porosos para reducir el flujo de agua contaminada a través de dichos materiales, o para inmovilizar compuestos tóxicos y peligrosos (metales, compuestos orgánicos) al interactuar estos con la biopelícula (Díaz *et al.*, 1999).



**Figura 2.3.** Procesos de descontaminación que tienen lugar en barreras permeables reactivas (Díaz *et al.*, 1999).

#### 2.2.2.4. Producción de proteína terapéutica.

La biotecnología de proteínas está implicado en el aislamiento, producción y mejoramiento de las propiedades biológicas de proteínas específicas a partir de diversas fuentes naturales tales como plantas, animales o bien microorganismos, para su subsiguiente empleo en diversas aplicaciones, las tecnologías del DNA recombinante ha jugado un papel muy importante en el desarrollo de la biotecnología de proteínas, muchas de las cuales se encuentran en concentraciones muy bajas en su ambiente natural. se considera una proteína recombinante o proteína heteróloga

aquella proteína cuya síntesis se realiza en un organismo distinto al organismo nativo (Guerrero *et al.*, 2004).

### **2.2.3. Desventajas de la formación de biopelículas.**

La formación de biopelícula en diferentes ámbitos como el industrial y el área de medicina logran generar problemas debido a los daños económicos y a la salud que pueden ocasionar, entre ellos se encuentran los siguientes.

#### **2.2.3.1 Infecciones.**

Uno de los motivos más importantes para el estudio de los microorganismos es conocer las enfermedades que provocan y el modo de controlarlas. Aunque los microorganismos rara vez provocan una enfermedad bien definida (Murray, 2009).

#### **2.2.3.2. Purificación del agua y producción alimentaria.**

Las enfermedades provocadas por los alimentos y el agua pueden ser causadas por toxinas producidas por bacterias en crecimiento, por especies nocivas de algas o por la contaminación del agua y/o alimentos con ciertas bacterias, virus o parásitos. Muchos casos de intoxicación por alimentos suceden por que una persona ingiere alimentos que contienen bacterias nocivas. Las bacterias o las toxinas bacterianas pueden enfermar a la persona. Las bacterias también pueden infiltrarse en el agua corriente y transmitir enfermedades. (Centró de ILLINOIS contra intoxicaciones, 2005).

#### **2.2.4. Métodos de control microbiano.**

El objetivo principal del control microbiano es el de inhibir los microorganismos cuyas actividades que son nocivas para el hombre.

A continuación se hace mención de los cambios físicos o químicos del ambiente, y el uso de sustancias antimicrobianas, que constituyen la base de la mayoría de los principales métodos de control de microorganismos las se mencionan a continuación.(García Vera. Segunda Edición).

1. La asepsia (higiene).
2. La remoción de los microorganismos
3. Las temperaturas altas
4. Las temperaturas bajas
5. La desecación
6. La irradiación
7. Los agentes químicos

#### **2.3. Celdas de combustible microbiana.**

Las celdas de combustible microbiana (CCM) son dispositivos que se encargan de convertir la energía bioquímica en energía eléctrica mediante microorganismos. Las bacterias obtienen la energía transfiriendo electrones desde un donador de electrones, como el acetato o el agua residual (materia orgánica), hacia un aceptor de electrones, como el oxígeno. Cuanto mayor sea la diferencia de potencial entre el donador y el aceptor, mayor será la ganancia energética para la bacteria y, generalmente, mayor será su tasa de reproducción y, por lo tanto, de eliminación de la materia orgánica. (Buitrón *et al.*, 2011).

Las celdas de combustible microbianas (CCM) se están estudiando como un nuevo enfoque del tratamiento de aguas residuales por su capacidad de eliminar materia orgánica así como la generación de energía eléctrica (Hays *et al.*, 2011).

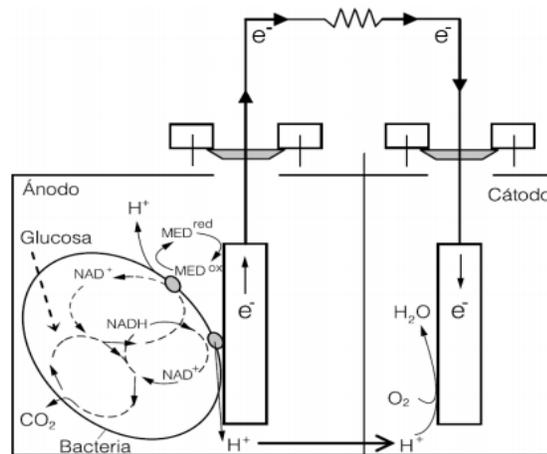
El diseño básico de una CCM consiste en un ánodo, un cátodo, una membrana de intercambio de protones (PEM) y un circuito eléctrico. En una CCM; la comunidad bacteriana presente en el compartimento del ánodo utiliza sustratos orgánicos como combustibles para producir electrones y protones a través de procesos biológicos (Sengodon *et al.*, 2012).

El concepto de microorganismos usados como catalizadores en celdas de combustibles microbianas (CCM) fue explorado desde los años 70 y 80. La CCM utilizada para tratar agua residual doméstica fue introducida por Habermann y pommer (1991).

Una CCM convierte un sustrato biodegradable directamente a electricidad. Esto se consigue cuando las bacterias a través de su metabolismo, transfieren electrones desde un donador, tal como la glucosa, a un aceptor de electrones. En una CCM las bacterias no transfieren directamente los electrones producidos a su aceptor terminal, sino que estos son desviados hacia el ánodo. Esta transferencia puede ocurrir de varias formas, bien sea a través de la membrana celular o a partir de un mediador soluble, y los electrones fluyen a través de un circuito externo (Álzate *et al.*, 2008).

La celda de combustible es un dispositivo electroquímico capaz de convertir directamente en electricidad la energía contenida en un combustible.

Esta obtención de electricidad, en forma de corriente continua, se lleva a cabo sin la necesidad de ningún proceso de combustión, ya que la oxidación del combustible y la reducción del combustible se producen en lugares físicos diferentes. La conversión electroquímica asegura un elevado rendimiento en el proceso de transformación energética, mayor del que se obtendría de las maquinas térmicas, ya que éstas presentan la limitación impuesta por el ciclo de Carnot (Castro, 2014).



**Figura 2.4.** Funcionamiento de una celda de combustible microbiana. (Castro, 2014).

### 2.3.1. Tipos de celdas de combustible microbianas con membranas de intercambio protónico.

- CCM de doble compartimento: Este es el diseño más utilizado consiste en dos cámaras con los compartimentos de ánodo y cátodo separados por una membrana de intercambio de iones. Este diseño se utiliza generalmente en la investigación básica y la literatura nos dice que el poder de salida de estos sistemas son generalmente bajos debido a su diseño complejo, de alta resistencia interna.

- CCM Cámara Individual: Este diseño tiene un solo compartimiento que contiene tanto el ánodo y el cátodo. El ánodo está bien colocado lejos o cerca del cátodo separado por PEM. Informaron de que si el ánodo está más cerca del cátodo,

se reduce resistencia óhmica interna, evitando el uso de catolito como resultado de la combinación de dos cámaras y por lo tanto aumenta la densidad de potencia. En comparación con las CCM de dos cámaras, se ofrece un diseño simple, rentable y produce la energía de una manera más eficiente. Sin embargo, en la configuración de la membrana menos, la contaminación microbiana y la difusión posterior de oxígeno del cátodo al ánodo sin PEM son los principales inconvenientes (Sengodon *et al.*, 2012).

### **2.3.2. Membranas de intercambio protónico.**

La mayoría de los diseños de las CCM requieren la separación de los compartimentos del ánodo y el cátodo por una membrana de intercambio protónico (PEM). El uso más común en PEM es el Nafion® 115 o 117 (Dupont Co, USA), que está a disposición de numerosos proveedores (por ejemplo, Aldrich e Ion Power, Inc.). Una alternativa al Nafion® es la membrana Ultrex CMI - 7000 (Membranas Internacional Incorp., Glen Rock, NJ, USA) que tiene una mejor relación coste-eficiencia que el Nafion®. Cuando una PEM se utiliza en una CCM es importante tener en cuenta que puede ser permeable a los productos químicos utilizados, tales como oxígeno, iones, o de la materia orgánica utilizada como sustrato. (Lozano-Blanco, *et al.*, N.D).

**Tabla 2.1.** Descripción técnica de la membrana CMI-7000 (Membranes International Inc.)

CMI-7000 MEMBRANAS DE INTERCAMBIO CATIONES (ESPECIFICACIONES TECNICAS).	
ESPECIFICACIONES TECNICAS	CMI-7000S UNA HOJA
FUNCIONALIDAD	STROM DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO DE CATIONES DE ACIDO
ESTRUCTURA POLYMER	CRUZ GEL POLIESTER NO LIGADO CON DIVINILBENCENO
GRUPO FUNCIONAL	ACIDO SULFONICO
FORMA IONICA COMO ENVIADO	SODIO
COLOR	MARRON
TAMAÑO ESTANDAR: ESTADOS UNIDOS, METRICAS	48" X 120° 1.22MX 3.05M
ESPEJOR (MILESIMAS ESTANDAR DE PULGADA)(MM)	18+-1 0.45+- 0.025
RESISTENCIA ELECTRICA (OHM.CM2) 0.5 MOL/L NaCl	<30
LA MAXIMA DENSIDAD DE CORRIENTE (AMPERIOS/M2)	<500
PERMSELECTIVIDAD (%) 0.1 MOL DE KCl/Kg/0.5 MOL DE KCl/Kg	94
CAMBIO DE CAPACIDAD TOTAL (MEQ/G)	1,6+-0,1
PERMEABILIDAD AL AGUA (MI/h/pie2) @5psi	<3
PRUEBA DE RESISTENCIA A LA ROTURA MULLEN (psi)	>80
ESTABILIDAD TERMICA(°C)	90
RANGO DE ESTABILIDAD QUIMICOS (Ph)	1 A 10
PROCEDIMIENTO PREACONDICIONAMIENTO	SUMERGIR LA MEMBRANA, YA SEA EN LA SOLUCION DE APLICACIÓN O UNA SOLUCION DE NaCl AL 5% DURANTE 12 HORAS PARA PERMITIR LA HIDRATACION DE LA MEMBRANA Y DE EXPANSION.
ALMACENAMIENTO	ALMACENAR A TEMPERATURA AMBIENTE Y LA HUMEDAD BAJA EN EL RECIPIENTE HERMETICO SELLADO. PERIODO DE ALMACENAMIENTO QUE NO EXCEDA DE UN AÑO.

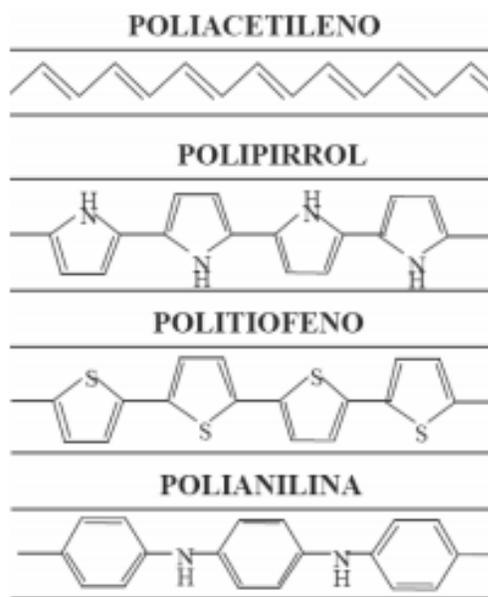
### 2.3.3. Polímeros conductores.

Un polímero es una molécula, natural o sintética, que consiste esencialmente en unidades estructurales idénticas repetidas.

Los polímeros conductores son materiales formados por largas cadenas hidrocarbonadas con dobles enlaces alternos, o conjugados. Cuando extraemos un electrón de uno de estos dobles enlaces se genera un radical catión, también llamado polarón, y al seguir oxidando se puede arrancar un segundo electrón para formar un dicatión, o bipolarón, que es muy estable. Esta carga positiva puede desplazarse por la cadena pasando de un doble enlace a otro conduciendo de este modo la electricidad. La extracción de electrones, u oxidación, puede ser continuada formándose más de un catión por cadena. Las familias más comunes de polímeros

conductores son derivados de: poliacetileno, polianilina, polipirrol y politiofeno, cuyas estructuras se muestran en la Figura 2.4 (Corona *et al.*, 2010).

Entre los polímeros más investigados desde 1980, se presentan el polipirrol, politiofeno y polianilina. En 1979, A. Díaz mediante la oxidación electroquímica del pirrol en acetonitrilo obtiene películas de polipirrol sobre la superficie del electrodo, con propiedades mecánicas favorables, relativamente densas y conductoras (3,4). Este método electroquímico permite controlar el potencial de oxidación de la polimerización, y por tanto, la optimización de la calidad del polímero. Actualmente constituyen una de las técnicas más ampliamente utilizada para la síntesis de polímeros conductores (Choy, 2008).



**Figura 2.5.** Polímeros conductores más comunes (Corona *et al.*, 2010).

### **2.3.3.1. Polipirrol.**

Electrodos modificados mediante polímeros electro activos constituyen membranas de múltiples y variadas aplicaciones. Debido a sus propiedades de dilatación o contracción las películas de polipirrol (PPy) se aplican en sistemas micro electromecánicos (MEMS), micro impulsores o músculos artificiales, suministro electro controlado de drogas, electroanálisis y purificación de agua. También estas películas permiten la dosificación de neurotransmisores en presencia de ácido ascórbico. Las películas de PPy, resultan ser selectivas y de gran sensibilidad para la detección de dopamina. La difusión de los aniones hacia el electrodo se encuentra impedida debido a la inclusión de especies negativas fijas en la película (Zerbino *et al.*, 2010).

### **2.3.3.2. Grafito.**

Es una forma cristalina del carbono con una estructura en capas con planos u hojas basales de átomos de carbono de empaque compacto .en consecuencia el grafito es débil al corte a lo largo de las capas. Esta característica, a su vez, le da al grafito propiedades de baja fricción como lubricante sólido. Sin embargo, sus propiedades a la fricción son bajas únicamente en un entorno de aire u humedad; en vacío, el grafito es abrasivo y es un mal lubricante. A diferencia con otros materiales, la resistencia y la rigidez en el grafito se incrementan con la temperatura. El grafito amorfo se conoce como negro de humo (hollín negro) y es usado como un pigmento.

Aunque es frágil, el grafito tiene una elevada conductividad eléctrica y térmica así como una buena resistencia al choque térmico y a las altas temperaturas (a pesar que se empieza a oxidar a partir de los 500°C (900°F)). Es por tanto, un material importante para las aplicaciones como electrodos, elementos calefactores, escobillas

para motores, dispositivos y partes de horno de alta temperatura, materiales para moldes (como crisoles para la función y colado de metales), y en sellos.

Una característica del grafito es su resistencia a los productos químicos; por ello, se usa en filtros para fluidos corrosivos. También su sección transversal de baja absorción y su sección transversal de alta dispersión para los neutrones térmicos hacen del grafito adecuado para las aplicaciones nucleares. La punta de un lápiz ordinario es una mezcla de grafito y arcilla. (Serope, 2002).

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Localización del área experimental.

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de biotecnología del Departamento de Botánica, situado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, localizada en las coordenadas UTM 2805636 N y 295631 E, zona 14; cuya dirección corresponde a Calzada Antonio Narro, 1923, Buenavista saltillo Coahuila.



Figura 3.1. Ubicación del laboratorio de Biotecnología UAAAN, (INEGI 2015).

#### 3.2 Estrategia experimental.

Durante la ejecución del experimento se emplearon dos tratamientos, en el tratamiento uno se implementó compósitos de espuma de poliuretano, grafito y polipirrol como material anódico, en el tratamiento dos se utilizó espuma de poliuretano y grafito como material catódico empleados como biocatódos, en el

reactor de flujo ascendente, en el cual se evaluaron tres tiempos de retención hidráulica 12, 24 y 36 horas, a los cuales son llamados ciclos. Para la evaluación de la calidad del agua obtenida se analizaron los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), pH, procesos electroquímicos, huevos de helmintos y la demanda química de oxígeno en cinco días (DBO<sub>5</sub>).

La realización del experimento se efectuó mediante tres etapas que a continuación se describen.

### **3.3. Diseño del reactor.**

El reactor tipo H para el tratamiento de aguas residuales domésticas, es un sistema de dos cámaras denominadas compartimento anódico y compartimento catódico los cuales están separados por una membrana de intercambio de protones, el flujo de agua del compartimento anódico al catódico se da mediante una manguera que los enlaza. Ambos compartimentos tienen en su interior un tornillo sin fin de acero inoxidable; en el cual están sujetos 8 electrodos que permitirán la formación y crecimiento de biopelícula, ambos tornillos están conectados mediante un alambre de cobre, los cuales se unen en el exterior por medio de una resistencia. Cabe mencionar que el compartimento anódico contenía electrodos recubiertos con grafito y polipirrol y el catódico, electrodos con grafito únicamente. Esto se decidió realizar para poder realizar comparaciones en los parámetros obtenidos mediante la implementación de diferentes compósitos en las cámaras del biorreactor.

### **3.4. Preparación de los electrodos.**

Se recortó la espuma de poliuretano en forma circular con un diámetro de 11 cm, posteriormente se colocaron 300 ml de agua destilada en un vaso de precipitado de un litro, se sumergieron y enjuagaron uno a uno los electrodos recortados, en

seguida se adicionó 200 mL de acetona en un vaso de precipitado de un litro, en el cual se sumergieron y enjuagaron uno a uno los electrodos; una vez realizado lo anterior se exprimieron muy bien, los electrodos se llevaron a la estufa de secado a una temperatura constante de 80°C, por una hora. Después de cumplir con el tiempo en la estufa se llevaron los electrodos a un desecador durante 15 minutos para su enfriamiento, y fueron pesados en la balanza analítica.

#### **3.4.1. Recubrimiento de los electrodos con grafito.**

Los electrodos fueron recubiertos con grafito en aerosol de manera uniforme, una vez recubiertos se llevaron a la estufa para secarlos a una temperatura de 60 °C, durante 30 minutos.

Cumplido con los pasos anteriores se colocaron los electrodos en el desecador durante 15 minutos para su enfriamiento, se realizó el pesaje de cada uno de los electrodos en la balanza analítica. Y por último se determinó el porcentaje de grafito adherido a la espuma de poliuretano, mediante la siguiente formula:

**Ecuación 3.1.** Porcentaje de adhesión de grafito.

$$\% Ad_{graf} = \frac{W_{graf} - W_o}{W_{Graf}} * 100$$

Dónde:

$W_{graf}$ = peso de la espuma de poliuretano y grafito.

$W_o$ = peso de la espuma de poliuretano.

$\% Ad_{graf}$ = porcentaje de adhesión de grafito.

### 3.4.2. Polimerización química.

En un recipiente de 1.5 L se agregaron 1056 mL de agua destilada y 2.6613 g de pirrol (monómero), se agito durante 5 minutos, se agregó la espuma de poliuretano (electrodo), y se agito durante 1 hora, se agregó el agente oxidante cloruro férrico 21.14 g, (la misma cantidad de moles que se agregan de pirrol); el agente oxidante se disuelve primero en 52.79 g de agua destilada. La reacción se realizó por 2 horas, el electrodo fue retirado, enjuagado con agua destilada, secado a 80 °C por una 1 hora y pesado. Por último se determinó el % de polipirrol adherido.

**Ecuación 3.2.** Porcentaje de adhesión de polipirrol.

$$\% Ad_{PPy} = \frac{W_{PPy} - W_{Graf}}{W_{PPy}} * 100$$

Dónde:

$W_{graf}$  = peso de la espuma de poliuretano + grafito.

$W_{PPy}$  = peso de la espuma de poliuretano + grafito + polipirrol

$\% Ad_{PPy}$  = porcentaje de adhesión del polipirrol.

#### 3.4.2.1. Calculo de la cantidad de moles de Pirrol utilizados.

Para calcular la cantidad de moles de pirrol utilizados en la polimerización química se utilizó la ecuación 3.3.

**Ecuación 3.3.** Moles a utilizar de pirrol.

$$n = \frac{m}{pm}$$

$$n = \frac{2.6613g}{67.7g} = 0.03931 \text{ moles}$$

**3.4.2.2 Calculo de cloruro férrico empleado en la polimerización.**

**Ecuación 3.4.** Determinación de la masa del cloruro férrico a utilizar.

$$m = Pm * n$$

Pm= 162.2g

Moles de pirrol= 0.03931

$$m = 162.2g * 0.03931 = 6.3760 \text{ g}$$

**3.4.2.3. Volumen de electrodos.**

**Ecuación 3.5.** Calculo del volumen total ocupado por los electrodos.

$$V = \pi r^2 h * n$$

$$V = 3.1416 * 5.5^2 \text{ cm} * 0.8 \text{ cm} = 76.02 \text{ cm}^3 * 16 = 1216.32 \text{ cm}^3$$

Dónde:

V= volumen de los electrodos.

$\pi$ = constante 3.1416.

$r^2$ = radio del electrodo elevado a la potencia 2.

$h$  = altura del electrodo.

$n$ = número total de electrodos utilizados.

#### 3.4.2.4. Volumen total del biorreactor.

El volumen total del biorreactor se calculó sumando el volumen de los electrodos en cada compartimento y el volumen ocupado por agua en ambas cámaras.

**Tabla 3.1.** Volumen del biorreactor con respecto a sus componentes.

Componentes del biorreactor.	Volumen en cm <sup>3</sup>
Cámara Anódica	5662.97
Cámara Catódica	5662.97
Electrodos	1286.31
Volumen total	12612.25

#### 3.5. Acondicionamiento de la membrana.

El acondicionamiento de la membrana CMI-7000 se realizó en una solución de cloruro de sodio al 5% a temperatura ambiente por 24 horas y posteriormente se sumergió en un vaso de precipitado de 1000mL. el cual contenía agua destilada y ahí se conservó hasta su utilización.

#### 3.6. Construcción del reactor tipo H.

Se cortaron 4 piezas de tubos de PVC cédula 40 de 20 cm de largo; las cuales fueron ensambladas a las uniones T que se tenían, unidas con pagamento para PVC y 2 piezas de 13 cm de largo las cuales fueron ensambladas de un extremo a la tuerca de unión y el otro extremo se ensamblo a las uniones T. En los extremos inferiores se le colocaron tapones de PVC cedula 40, adheridas con pegamento para PVC. Uno de los tapones inferiores fue perforado para lograr pasar la manguera; en el cual se colocó un dispersor con la cual se suministraría aire que es suministrado por una bomba de pecera. Cuando se tuvieron ambas partes de reactor

ensambladas se procedió a colocarle dos empaques en el interior de la tuerca de unión y en la membrana de intercambio de protones, después se unieron ambas partes. Se colocaron mangueras tanto en los costados de los compartimentos donde posteriormente con ayuda de un taladro y un machuelo se perforaron y colocándose un conector para permitir el ingreso del agua a los compartimentos. El agua fue introducida mediante la ayuda de una bomba Simon Varistaltic Pump modelo 72-310-000 la cual permitió ajustar los diferentes tiempos de retención hidráulica. En el interior de cada uno de los compartimentos tanto anódico como catódico del rector fueron colocados un total de ocho electrodos, los cuales fueron ensamblados por un tornillo sin fin de acero inoxidable de 60 cm de largo. Cada electrodo fue colocado a una distancia de 6 cm, en el extremo superior de la barrilla se implementó un alambre de cobre que se recubrió con silicón frío, cuyos cables fueron sacados por la perforación que se les realizó a los tapones superiores. Se instalaron los tapones superiores y la celda fue sellada perfectamente con silicón.



**Figura 3.2.** Reactor ensamblado y en funcionamiento para evaluar el experimento.

### 3.7. Procedimiento para la determinación de la Demanda Química de oxígeno.

Procedimiento según la (NMX-AA-030-SCFI-2001), se Pre calentó a una temperatura de 150 °C el digestor de DQO, se colocaron en los tubos HACH 3 mL de la muestra por cada tubo a utilizar, se centrifugaron las muestras por tres minutos a 3000 RPM, posteriormente se agregaron 2,5 mL de agua en un tubo para la determinación del blanco de reactivos, en cada uno de los tubos se depositaron 2.5 mL de la muestra previamente homogeneizada y, añadió 1.5 mL de la digestión dicromato de potasio y 2.5. mL de ácido de plata en cada uno de los tubos de reacción, se cerraron herméticamente los tubos e invirtieron varias veces, colocando todos los tubos en el digestor previamente calentado a 150 °C por dos horas, se retiraron los tubos del digestor y dejaron enfriar a temperatura ambiente, medir la absorbancia en el espectrofotómetro previamente calibrado a una longitud de onda de 600 nm.

La remoción de la materia orgánica en el agua residual se calculó mediante el porcentaje de eliminación de materia orgánica en dicha agua, con la ecuación 3.6.

**Ecuación 3.6.** Porcentaje de remoción biológica.

$$\% \text{ de remoción} = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} * 100$$

Dónde:

DQO<sub>i</sub>= demanda química de oxígeno del agua residual sin tratar.

DQO<sub>f</sub>= demanda química de oxígeno del agua residual tratada.

### 3.8. Procedimiento para la determinación de Helmintos.

De acuerdo a la (NMX-AA-113-SCFI-2012), Se tomaron en un recipiente un litro de agua residual ,se centrifugo a 400 G por tres minutos, se procedió a decantar hasta obtener únicamente el sólido sedimentado, el sedimento se filtró en un tamiz

de 150  $\mu\text{m}$ , y se lavó con 5 litros de agua destilada, se llevó el filtrado y el agua de enjuague a los recipientes de centrifugado, posteriormente se centrifugo la muestra a 400 G por tres minutos, se ladeo cuidadosamente el sobrenadante y se desechó, se depositó el sedimento en recipientes para centrifugar, se enjuago perfectamente el recipiente tres veces con agua destilada y se colocó en recipientes para centrifugar a 400 G de tres minutos, se predio a ponderar el sobrenadante quedando únicamente el sedimento, re suspendiéndolo en 150 mL de la disolución de sulfato de zinc, se homogeneizo con un agitador de tubos, se centrifugo a 1000 G por tres minutos y se vertió el sobrenadante en un recipiente de plástico, diluyendo en 1000 mL de agua destilada y centrifugar a 400 G por tres minutos, después se vertió todo el sobrenadante y se re suspendió el sedimento utilizando suficiente agua destilada, se vertió la suspensión resultante en un tubo de centrifuga incluyendo el agua de enjuague y centrifugando a 400 G durante tres minutos, se eliminó el sobrenadante y re suspendió el sedimento en 15 mL de la disolución de alcohol-acido por medio de un agitador de tubos y se agregaron 10 mL de acetato de etilo, se agito suavemente y destapando debes en cuando cuidadosamente los tubos para dejar escapar el gas que se desprende, se centrifugo a 660 G durante tres minutos, se aspiró el sobrenadante dejando menos de 1 mL del mismo, homogeneizando el paquete y proceder a la cuantificación.

Cuantificación de los huevos de helmintos.se Colocaron alícuotas de 1.0 mL de las muestras a analizar en una cámara de conteo DONCASTER o cámara de NEUBAUER, analizando toda la muestra obtenida. Y Visualmente se identificó una a una las estructuras, anotando los géneros encontrados. Se empleó la técnica más adecuada para realizar el conteo de huevos de helmintos.

Expresado el resultado en números de huevos por litros según la siguiente formula:

**Ecuación 3.7.** Huevos de helmintos contenidos en el agua residual y tratada.

$$HL = \frac{H}{5}$$

Dónde:

H=número de huevos contados en la muestra.

HL= número de huevos por litro

5= volumen de la muestra.

### **3.9. Determinación de solidos totales.**

De acuerdo a la norma (NMX-AA-034-SCFI-2015), se colocaron los crisoles en el horno a una temperatura de 105 °C por 20 minutos. Después de este tiempo se llevaron los crisoles al desecador y dejar enfriar por 20 minutos ,Posteriormente se pesaron los crisoles y se replicó el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia  $\leq 0,0005$  g en dos pesadas consecutivas, el resultado obtenido se registró como  $m_1$ , se introdujo el soporte de secado con la muestra liquida al horno a 105 °C durante 20 min, después de este tiempo se transfirió al desecador y se dejó enfriar por 20 minutos, se pesó el soporte de secado y se repitió el ciclo horno-desecador hasta obtener una diferencia  $\leq 0,0005$  g en dos pesadas consecutivas, y se registró como  $m_2$ , se tomó el volumen de muestra de tal manera que el residuo seco sobre la cápsula se encontrara en un intervalo de masa de 2,5 mg a 200 mg, y se llevó la muestra al crisol previamente puesto a masa constante, colocándola en el horno de secado a 105 °C para evaporarla, se introdujo el crisol en el desecador , dejándolo enfriar por 20 minutos, el crisol fue llevado a masa constante repitiendo el ciclo horno-desecador hasta obtener una,  $\leq$  diferencia de 0,0005 g en dos pesadas consecutivas, y se registró como  $m_3$ .

Se calculó el contenido de sólidos totales de las muestras con la siguiente formula:

**Ecuación 3.8.** Determinación de solidos totales contenida en el agua residual.

$$ST = \frac{(m_3 - m_1)}{V} 1\ 000\ 000$$

Dónde:

ST= Son los sólidos totales, en mg/L;

m3= es la masa de la cápsula con el residuo, después de la evaporación, en g;

m1= es la masa de la cápsula vacía a masa constante, en g, y

V= es el volumen de muestra, en mL.

### **3.9.1. Determinación de DBO<sub>5</sub>.**

La determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, se realizó mediante la implementación de la Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-200. Esta norma mexicana establece el método de análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se analizaron los datos obtenidos en tres diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH) en una celda de combustible microbiana ( tipo H), conocida como reactor de flujo ascendente tipo H, a escala planta piloto utilizando como sustrato agua residual municipal extraída de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Gran Bosque Urbano del Ejército Mexicano, de Saltillo Coahuila.

#### 4.1. Adhesión de materiales.

De acuerdo a la metodología antes mencionada, los ánodos fueron constituidos por espuma de poliuretano, grafito en aerosol, polipirrol a partir de cloruro férrico, mientras en el compartimento catódico se emplearon electrodos de espuma de poliuretano recubiertos con grafito en aerosol. En la tabla 4.1 se presenta el porcentaje promedio de la adhesión de los materiales empleados en la síntesis química a los electrodos, obteniendo una adhesión de grafito y polipirrol del 26.2% y 57.03%, respectivamente.

**Tabla 4.1.** Porcentaje de Adhesión de Materiales en los electrodos sintetizados.

TRATAMIENTO	% Ad <sub>Grafito</sub>	% Ad <sub>PPy</sub>
ÁNODO	26.2	57.03

El grafito es un compuesto orgánico que se caracteriza por tener una alta conductividad eléctrica, lo que favoreció el proceso de adhesión del polipirrol electropositivo. El polipirrol se caracteriza por presentar largas cadenas de bajo peso

molecular que provocar su inserción en el interior de las membranas de la célula bacteriana. Lo cual permitió que existiera una mayor fijación de bacterias eléctricamente activas para la generación de energía.

#### 4.2 Caracterización eléctrica de la Celda de Combustible Microbiana (CCM), “reactor de flujo ascendente tipo H”.

Se efectuó la caracterización electroquímica del reactor de flujo ascendente tipo H durante los tres TRH (Tabla 4.2), donde los tiempos de retención hidráulica de 36 y 12 horas obtuvieron un voltaje 0.09 V siendo el valor máximo alcanzado, mientras el TRH de 24 h solo logro alcanzar 0.07 V.

Sin embargo el TRH de 12 h logró obtener un 0.04 % de eficiencia coulombica siendo la más alta entre sus contrapartes.

**Tabla 4.2.** Caracterización electroquímica del reactor de flujo ascendente tipo H en tres TRH.

PARÁMETROS	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (h)		
	12 h	24 h	36 h
VOLTAJE (V)	0.09	0.07	0.09
DENSIDAD DE POTENCIA (mW.m <sup>3</sup> )	0.33	0.15	0.24
EFICIENCIA COULÓMBICA (%)	0.04	0.014	0.007

El valor obtenido en la caracterización del biorreactor es bajo aunque cabe mencionar que por ser una de celda de combustible microbiana (CCM) cuyo objetivo principal es el tratamiento del agua residual domestica si se realizan en un futuro los ajustes pertinentes en los tiempos de retención hidráulica y diseño de los componentes se podría obtener una mayor producción eléctrica.

### 4.3. Eficiencia de remoción de materia orgánica (DQO).

La remoción de la materia orgánica en el tratamiento de aguas residuales es medida en DQO (mg/L) la cual permite determinar la cantidad de materia orgánica que puede oxidarse en un medio ácido. Presenta una relación directa con la DBO<sub>5</sub>, ya que esta representa la cantidad de oxígeno que las bacterias requieren para degradar la materia orgánica contenida en el agua residual.

En la Tabla 4.3 se muestran los promedios de remoción de la DQO, durante los tres TRH, alcanzando remover el 91.75 % de la materia orgánica contenida en el agua residual en el TRH de 36 h.

**Tabla 4.3.** Promedios de la eficiencia de materia orgánica en diferentes TRH

MUESTRA	TRH 12 HORAS		TRH 24 HORAS		TRH 36 HORAS	
	DQO (mg/L)	ERDQO (%)	DQO (mg/L)	ERDQO (%)	DQO (mg/L)	ERDQO (%)
H <sub>2</sub> O CRUDA	764.96	-	782.37	-	828.66	-
ANAEROBIO	672	12.15	576.81	26.27	444.96	46.30
AEROBIO	-	46.18	-	50.60	-	45.45
SECUENCIAL	318.66	58.34	180.88	76.87	68.29	91.75

Soroa *et al.* (2015), Realizaron investigaciones con reactores de flujo ascendente, "Upflow anaerobic sludge blanket" por sus siglas en inglés (UASB), donde lograron una remoción del 95 % a un TRH de 23 horas.

Caicedo (2006) obtuvo un valor de remoción de materia orgánica del 80% en 8 días. Tomando en consideración lo descrito por los anteriores autores se puede inferir que el nivel de remoción de materia orgánica es aceptable, sin embargo es necesario el realizar a futuro algunos ajustes en el tiempo de retención hidráulica o incrementar el número de electrodos en cada uno de los compartimentos tanto

anódico como catódico, para lograr un mayor porcentaje de remoción de la materia orgánica presente en el agua residual.

#### 4.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

En la tabla 4.4 se muestra la remoción de DBO<sub>5</sub> en la CCM utilizando agua residual municipal como sustrato en diferentes TRH. En el TRH de 36 h se consigo obtener valores de 34.44 (mg/L) puesto que al inicio del tratamiento se encontraba en 364.74 (mg/L) de DBO<sub>5</sub> removiendo el 90.5%, seguido por el TRH de 24 h se obtuvo un valor inicial de 344.4 (mg/L) y finalizo con 85.10 (mg/L) DBO<sub>5</sub>, el TRH de 12 h fue el que menor removió ya que su concentración inicial fue de 385 (mg/L) y termino con 135(mg/L) DBO<sub>5</sub>.

**Tabla 4.4.** Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) en diferentes TRH

MUESTRA	TRH 12 HORAS	TRH 24 HORAS	TRH 36 HORAS
	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
H2O DE DILUCION	0.20	0.20	0.20
GLUCOSA-ÁCIDO GLUTÁMICO	192.50	202.63	182.37
H <sub>2</sub> O CRUDA	385.00	344.47	364.74
H <sub>2</sub> O SECUENCIAL	135.08	85.10	34.44

Tomando en consideración los resultados obtenidos por otros autores que han desarrollado investigaciones similares en el tratamiento de aguas residuales; empleando un reactor UASB, empleando como sustrato lodos activados se deduce que los resultados conseguidos en este experimento son moderadamente bajos en comparación a los obtenidos por ellos. Torres (2014) consiguió obtener una remoción de DBO<sub>5</sub> de 80% en un TRH de 10 horas, mientras Caicedo M. F. (2006) alcanzaron un 92% de remoción de DBO<sub>5</sub> en 8 días. Cabe mencionar que en nuestro experimento se utilizó agua residual sin que haya recibido tratamiento previo alguno como es el caso de los autores antes mencionados.

#### 4.5 Eficiencia de remoción de sólidos totales (ST).

Durante el experimento se realizó la determinación de sólidos totales logrando reducir un 27.8 % en el TRH de 36 h, seguido por el TRH de 12 h con una remoción de 26.54%, mientras que el TRH de 24 h solo alcanzo remover un 23.8% (Tabla 4.5).

**Tabla. 4.5.** Eficiencia de Remoción de sólidos totales.

MUESTRA	TRH 12 HORAS		TRH 24 HORAS		TRH 36 HORAS	
	ST (mg/L)	ERST (%)	ST (mg/L)	ERST (%)	ST (mg/L)	ERST (%)
H <sub>2</sub> O CRUDA	1172.22	-	1233.33	-	1238.88	-
ANAEROBIO	944.44	19.43	988.88	19.81	1005.55	18.83
AEROBIO	-	7.1	-	4.05	-	8.96
H <sub>2</sub> O SECUENCIAL	861.11	26.54	938.88	23.87	894.44	27.8

Autores como Rodríguez *et al.* (2007), lograron reducir un 83% de los ST en un TRH de 8 horas, Da Silva *et al.* (2007) removieron el 90% de ST, empleando un reactor de flujo ascendente UASB, utilizando como sustrato lodos activados. Tomando en cuenta a los autores antes mencionados se considera que los resultados obtenidos en esta investigación se encuentran un poco bajos, sin embargo no es posible comparar con los resultados expuestos por los autores antes señalados, con los valores obtenidos en nuestro experimento, puesto que los resultados que ellos obtuvieron podría estar influenciados por el tipo de agua que emplearon en el tratamiento con los reactores ya que es un agua que se toma de un etapa de pretratamiento de aguas residuales, en este experimento el agua no recibe ningún tratamiento previo. La remoción en nuestro caso podría ser aún mayor con el hecho de hacer algunos ajustes en el diseño de nuestro reactor.

#### 4.6 Efecto del pH en el proceso de tratamiento de agua en la CCM.

De acuerdo a la determinación de pH se puede observar en la tabla 4.6 que a menor tiempo de retención hidráulica el pH es mayor, puesto que en el TRH de 36 h el pH inicial fue de 7.28 y al concluir el tratamiento el pH se encontraba en 8.1 siendo este el más bajo de los TRH evaluados.

**Tabla 4.6.** Efecto del pH en el proceso del tratamiento de agua residual en la CCM a distintos TRH.

	TRH 12 HORAS	TRH 24 HORAS	TRH 36 HORAS
MUESTRA	pH	pH	pH
H <sub>2</sub> O CRUDA	7.33	7.25	7.28
ANAEROBIO	7.7	7.56	7.76
H <sub>2</sub> O SECUENCIAL	8.3	8.23	8.1

En los estudios realizados por otros autores se reflejan resultados de pH de 9 en el tratamiento de aguas residuales en un tiempo de retención hidráulica de 8 días Caicedo (2006) y un pH obtenido de 7.5 en un tiempo de retención hidráulica de 6 horas en el estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Civil (2003). Lo anterior nos lleva a la conclusión que el nivel de pH obtenido mediante la realización de nuestro experimento está dentro de un rango óptimo para la actividad de los microorganismos dentro del reactor.

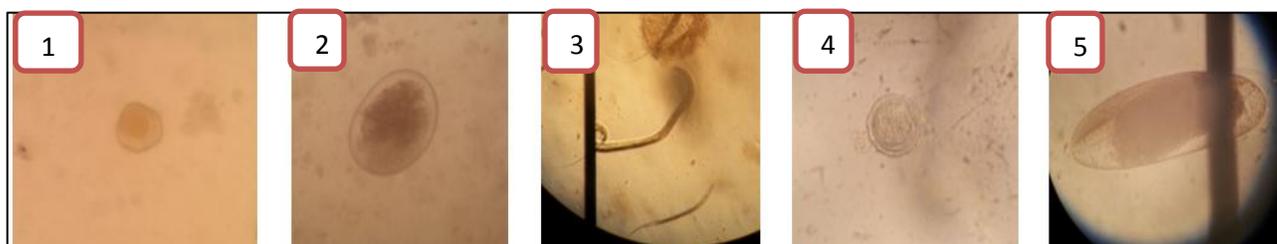
#### 4.7 Remoción de huevos de helmintos.

En la tabla 4.7 se muestra el porcentaje de remoción de huevos de helminto donde en el TRH de 36 h se logró remover el 95.9%, seguido TRH de 24 h con el 95.4 %, y finalmente el TRH de 12 h alcanzo remover el 94% de huevos.

**Tabla 4.7.** Porcentaje de remoción de huevos de helminto

MUESTRA	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (H)		
	12 HORAS	24 HORAS	36 HORAS
H <sub>2</sub> O CRUDA (h/L)	200	240	220
H <sub>2</sub> O SECUENCIAL(h/L)	12	11	9
ERH (%)	94	95.4	95.9

Durante la determinación de huevos de helminto se logró identificar algunas especies de acuerdo a Hatam-Nahavandi *et al.*, (2015) como lo son (1) *Hymenolepis diminuta*, (2) *Coccidian ssp.*, (3) *Rhabditidae* (larva viva), (4) *Moniezia ssp.* y (5) *Ancylostoma duodenale* (Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Huevos de helmintos presentes en agua residual.

En estudios realizados por Morgan S *et al.*, (1994), han reportado una remisión de huevos de helminto de 100% en agua residual sometida a un pretratamiento, es necesario mencionar que en este experimentos se logró remover de un 94 a 95.9% de huevos de helminto en diferentes TRH utilizando agua residual municipal sin ningún pretratamiento.

Esta comparación entre resultados nos permite concluir que nuestros valores obtenidos están en un valor medio lo cual puede llegar a mejorar realizando algunos ajustes en el diseño del sistema bioelectroquímico utilizado en este experimento. Es necesario remarcar que en cuanto a huevos de helmintos y DBO se refiere, se cumple con los límites establecidos dentro de la NOM-003-SEMARNAT-1997.

En la tabla 4.8 se observan los resultados obtenidos en investigaciones similares empleando reactores de tipo UASB con diversos TRH.

**Tabla 4.8.** Comparación de resultados obtenidos en otras investigaciones en reactores tipo AUSB con diferentes TRH.

Temperatura °C	TRH	DQO% REMOSION	DBO5 % REMOSION	ST %	pH	HELMINTOS (h/L)	AUTORES
20	4-6 Hrs	140-160 mg/L	40-50 mg/L	50-60%	X	100%	Morgan <i>et al.</i> ,(1994)
38	24 Hrs	75%	X	X	X	X	Castillo <i>et al.</i> , (2006)
X	10-24 Hrs	65%	>80%	72%	X	X	Passigivillela y Ferreyra. ( 1999)
X	X	72%	82%	90%	X	X	Da silva <i>et al.</i> , (2007).
22	8-5 Hrs	83%	93%	95%	X	X	Rodriguez <i>et al.</i> , (2011)
X	8 Hrs	83%	85%	80%	X	X	Villela (1997)
20	6-10 Hrs	80%	80%	90%	X	X	Torres.(2014)
15	8 dias	80%	92%	X	9	X	Caicedo . (2006)
X	15 dias	50%	X	X	X	X	Bermudez, R <i>et al.</i> , (2005)
11	6Hrs	X	70%	X	7.5	X	Departamento de Ingenieria Civil (2003)
24	1 dia	35%	X	X	X	X	Ladu (2014)
35	23 Hrs	95%	X	X	7	X	Soroa <i>et al.</i> ,(2005)
25	25 Hrs	70%	X	X	7	X	Orozco <i>et al.</i> ,(2014)

## CONCLUSIÓN

Al analizar el comportamiento electroquímico de los materiales utilizados en nuestro reactor, se comprobó que el polipirrol presenta una adaptación que le permite a los microorganismos altamente activos adherirse a los electrodos aceptables para la degradación de la materia orgánica contenida en el agua residual. Además de obtener valores considerables de densidad de potencia al hacer la evaluación el en desarrollo del proyecto.

El diseño del biorreactor de flujo ascendente tipo H a escala piloto nivel laboratorio, es un modelo bastante eficiente con respecto a los valores obtenidos en la degradación de materia orgánica, en el tercer tiempo de retención hidráulica de 36 horas teniendo una eficiencia de remoción de DQO de 91.75%, y una eliminación de huevos de Helmintos considerable la cual fue del 95.9 %, en el experimento realizado.

La realización del proyecto del reactor de flujo ascendente tipo H, nos permitió hacer especulaciones acerca de la factibilidad que se tiene al realizar el tratamiento de las aguas residuales domésticas, mediante la utilización de materiales de bajo costo tales como el caso de los electrodos utilizados de espuma de poliuretano, grafito en aerosol y polipirrol, así como la membrana de intercambio protónico CMI-7000, lo cual nos demuestra que son muy buenos materiales que reflejan buenos resultados en el tratamiento de estos residuos.

Lo anterior nos permite concluir que la utilización de este tipo de biorreactor y materiales utilizados es adecuada para la aplicación a nivel industrial para el tratamiento de aguas residuales ya que es una tecnología innovadora y de un costo/beneficio remarcable.

## LITERATURA CITADA

- Alzate** L., Fuentes C., Álvarez G.A., Álvarez G.A., P.J.S. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo pem. *Interciencia*. 33 (007).
- Bermúdez**, R. C., Rodríguez, S., Martínez, M. D. C., y Terry, A. I. (1995). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogas Rosa C. Bermúdez, Suyén Rodríguez, Mirna de la C. Martínez, Adis I. Terry.
- Betancourt**, M., Enrique, J., y Rivera S. (2004). Biopelícula: Una comunidad microscópica en desarrollo., Valle, U. *Colombia Médica*, 35 (1): 34–39.
- Buitrón**, G., Pérez J. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*.14(1):5-11.
- Caicedo** M. F. 2006. Diseño, construcción y arranque de un reactor U.A.S.B. piloto para el tratamiento de lixiviados. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Castillo**, E.F, Solano J.K. y Rangel, M.P. (2006). Evaluación Operacional De Un Sistema a Escala Laboratorio De Biopelícula Anaerobia Soportada Para El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas. *Ingeniería Química*.
- Castro** N. (2014). Diseño y simulación de un proceso de tratamiento de aguas residuales domésticas para la generación simultánea de energía eléctrica mediante celdas de combustible microbianas. <http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co>,
- Centro de ILLINOIS contra intoxicaciones**. (2005). Enfermedades Transmitidas por los Alimentos y el agua. 13 de diciembre del 2015, de ILLINOIS Department of

Public Health Sitio web:

[http://illinoispoisoncenter.org/ipc\\_media/pdf/food\\_spa.pdf](http://illinoispoisoncenter.org/ipc_media/pdf/food_spa.pdf)

**Colombia**". Ponencia en X Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia, Ouro Preto, Brasil.

**CONAGUA y SEMARNAT**. Estadísticas del Agua en México. (2010). Ediciones, 2006-2008, 2010 y 2011.

**CONAGUA**. (2013). Estadísticas del Agua en México.

**Corona-rivera, M. a, & Antonio-carmona, I. D.** (2010). Los polímeros conductores de la electricidad y sus aplicaciones en la nanotecnología.

**Choy, M.M.** (2008). Polimeros semiconductores como alternativa tecnologica en la proteccion de nuestro ambiente. Vasa. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>

**Da Silva, L. C.; Chernicharo, C. A. L.; De Oliveira, J. M.; De Souza, O. J. e Rodrigues, J.** *Avaliação de desempenho da pré-operação dos reatores UASB da ETE Onça: Capacidade instalada 2,05 m<sup>3</sup>/s.* 24<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental, Belo Horizonte, Brasil, 2007.

**Departamento de ingenieria civil, Universidad de New Bronswick, PO Box 4400, Fredericton, NB, E3B5A3, canada.** (2003). Impacto de la temperatura sobre el rendimiento, microbiológicos, y los aspectos hidrodinámicos de reactores UASB tratamiento de aguas residuales municipales. Sitio web: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14640220>

**Díaz, A., Gorostiza, I., & Susaeta, I.** (1999). Recuperación de suelos contaminados mediante biobarreras.

**Dirckx y David Davies,** 2003. Fases de formación de las biopelículas. *Center for Biofilm Engineering Montana State University*).

**García M.** (2010). Tratamientos Específicos de Vertidos Industriales. Tratamientos de Aguas Residuales Industriales.

**García Vera.** Introducción a la Microbiología. España: EUNED. (Segunda Edición).

**Guerrero-Olazarán, M., Cab-barrera, E. L., Galán-Wong, L. J., & Viader-salvadó, J. M.** (2004). Biotecnología de Proteínas Recombinantes para la Aplicación en Acuicultura. *Memorias Del VII Simposio Internacional de Nutrición Acuícola,*

**Hays, S., Zhang, F., & Logan, B. E.** (2011). Performance of two different types of anodes in membrane electrode assembly microbial fuel cells for power generation from domestic wastewater. *Journal of Power Sources,* <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011>.

<http://gaia.inegi.org.mx>(2015).

**Lozano-Blanco. L,J. & Godinez Soanez C.** (ND). Montaje Y Estudio De Una Pila De Combustible Depuración Simultánea De Aguas Residuales.

**Ladu, J. L. C., & Lü, X.** (2014). Effects of hydraulic retention time, temperature, and effluent recycling on efficiency of anaerobic filter in treating rural domestic wastewater. *Water Science and Engineering,* <http://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.005>

**Membranes International Inc.** CMI-7000 Cation Exchange Membranes Technical Specifications, 7456. Retrieved from <http://www.membranesinternational.com/tech-cmi.htm>

**Morgan S. F., M. S., Morgan S. J y Noyola R. A.** 1994. Aplicabilidad de la Digestión Anaerobia para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. *Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM.*

**Murray, P. R.** (2009). Microbiología Médica + Student Consult, 6a ed.

- Nazar C,** Julio. (2007). Biofilms bacterianos. *Revista de otorrinolaringología y cirugía de cabeza y cuello*.<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-48162007000100011>
- OCHOA,** S., Carvajal, L. F., Gómez, A., (2007). Simulación de un lavado hidráulico en tuberías para el control del crecimiento de biopelícula. *Dyna*,
- Orozco** Gaviria, C. A., Triviño Cabrera, C. C., & Manrique Losada, L. (2014). Arranque de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones andino amazónicas. (spanish). *Start-up a uasb reactor for domestic wastewater treatment in andean-amazonian conditions*.  
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=108520517&lang=es&site=ehost-live>.
- Passig,** F. H.; Villela, L. C. H. e Ferreira, O. P. (1999). *ETE Piracicamirim. Nova conceição de sistema de tratamento de esgotos sanitários – Partida, operação e monitoramento de desempenho*. Anals do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil.
- Pérez** Cortés, Y., & Villegas Peña, O. (2004). Diseño Teorico De Un Reactor Hibrido, Mediante Sistemas No Convencionales Para El Tratamiento De Las Aguas Residuales,.
- Rodriguez** Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). Tratamientos Avanzados De Aguas Residuales Industriales.. <http://doi.org/M-30985-2006>.
- Rodríguez,** J.; Torres, P. and Duque, A. (2011). “Evaluation of UASB reactor followed by trickling filter for domestic wastewater treatment in Valle del Cauca,
- Sengodon,** P., & Hays, D. B. (2012). Microbial Fuel Cells,.
- Seoánez** M. (2005). Depuración de Las Aguas Residuales Por Tecnologías Ecológicas y De Bajo Costo. España: Mundi-Prensa.

- Serope** Kalpakjian. (2002). *Manufactura, Ingeniería, Tecnología*. Cuarta edición. México: Pearson educación.
- Soroa**, P., *Biológicas, C.*, & *Garnika, L.* (2005). *Anaerobios Para El Tratamiento De Aguas Residuales Industriales*.
- The Mendeley Support Team.** (2011). *Getting Started with Mendeley*. Mendeley Desktop. London: Mendeley Ltd. Retrieved from <http://www.mendeley.com>
- Torres-Lozada**, P. (2014). in *Developing Countries*.  
<http://doi.org/10.1196/annals.1425.030>
- Villela**, L.C.H. (1997). *Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) protótipo: Desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas*. Tese de doutoramento (Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (São Carlos).
- Zambrano**, M. A. & *Suárez Londoño, L.* (2006). *Biofilms bacterianos: sus implicaciones en salud y enfermedad*. *Universitas Odontológica*  
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231220955004>
- Zerbino**, Jorge O., *Falivene, Claudio, Maltz, Alberto, Sustersic, María G.*.(2010). *Películas de polipirrol electropolimerizadas en presencia de dodecilsulfato de sodio*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 1 (24). Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627680003> consultado(11/09/2015).