

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Generación de voltaje y comportamiento de la materia orgánica en una celda de combustible microbiana con diferentes configuraciones de electrodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual municipal

Por:

ALONDRA RECIO BERLANGA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Febrero de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Generación de voltaje y comportamiento de la materia orgánica en una celda de combustible microbiana con diferentes configuraciones de electrodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual municipal

Por:

ALONDRA RECIO BERLANGA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

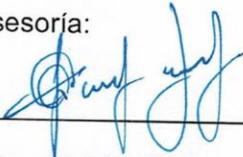
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Asesor Principal Interno



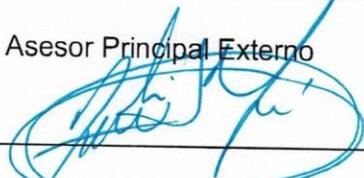
Dr. Carlos Andrés Covarrubias Gordillo

Asesor Principal Externo



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Co-Asesor



Dr. Alonso Méndez López

Co-Asesor





M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México.

Febrero de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

Generación de voltaje y comportamiento de la materia orgánica en una celda de combustible microbiana con diferentes configuraciones de electrodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual municipal

Por:

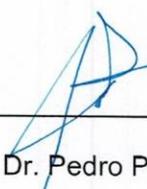
ALONDRA RECIO BERLANGA

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

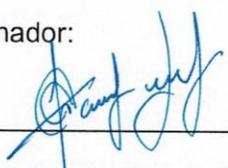
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por el jurado examinador:



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

Asesor Principal Interno



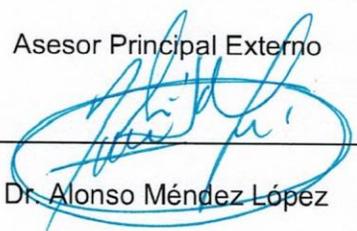
Dr. Carlos Andrés Covarrubias Gordillo

Asesor Principal Externo



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Co-Asesor



Dr. Alonso Méndez López

Co-Asesor



M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México.

Febrero de 2023



DEDICATORIA

A mis padres Ramón Recio y Ana Cristina Berlanga por haberme forjado como la persona que soy ahora; a ti pá por ser mi ejemplo de constancia y dedicación, así como darme un conocimiento más profundo de Dios, y a ti mami, por tu fortaleza e inspiración diaria. Este logro es de ustedes también, por su bendición diaria que fue una gran motivación para terminar mis estudios universitarios. Por eso les doy mi trabajo, como ofrenda por su paciencia y amor de padres.

A mi hermano Ramón Recio, porque cada día me muestra la manera en la que hay que llevar la vida. A mi hermana Sara Recio por ser una de mis fuentes de alegría más grandes, a ti pequeña que cada vez logras metas más importantes. Gracias hermanos por su apoyo moral cada vez que lo necesité y por nunca dudar de mi capacidad para lograr mis sueños.

A mi abuelo Humberto Berlanga porque sus canas son sinónimo de sabiduría que a la vez son experiencias de vida que me han servido de inspiración. También a mis abuelos difuntos Ramón Recio, Dora Estela y Juanita Alvarado que de haber estado aquí, se alegrarían junto con mis padres por este gran logro en mi vida.

A Elvia Berlanga, María de los Lagos Berlanga, Norma Alicia Berlanga, María Guadalupe Berlanga y al resto de mi familia por siempre mostrarme su interés en mi formación académica de diferentes maneras y siempre alegrarse por mis triunfos.

A mis grandes amigos y futuros colegas Fernando, Alex, Jimmy, Natanael, Val, Memo, Manuel y Linnet, porque me han permitido aprender algo de cada uno de ustedes, en especial a mi gran amigo Emiliano Treviño que las palabras aquí son pocas para expresar el gran cariño que le tengo, pues siempre fue mi mano derecha por estos cinco años, gracias por tu ayuda incondicional para asuntos de la escuela, de la vida y del corazón también, por ser mi compañero en los grandes proyectos

como la Tesis y por todo lo vivido. “Para ustedes, compañeros, amigos, hermanos todos ¡Buitres por siempre!”

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme entendimiento para ir paso por paso para lograr esta meta tan importante, por darme fortaleza y siempre rodearme de buenas personas a lo largo de mi estancia en la Universidad.

A la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, mi *alma terra mater* por abrirme la puerta de su arco principal y darme las herramientas necesarias para formarme ética y moralmente como buena profesionista, gracias también por las amistades que me dejó. Para mí es un orgullo ser Buitre y dejar en alto el nombre de mi universidad.

Al Dr. Pedro Pérez Rodríguez por su paciencia y conocimientos para culminar una parte importante de mi formación profesional científica y por la oportunidad de trabajar como su tesista.

Al Dr. Carlos, a la Dra. Silvia y al Dr. Alonso por su apoyo durante toda mi formación académica y la confianza de brindarme las instalaciones y el material para el desarrollo de mi tesis.

Al Dr. Miguel Ángel Pérez Rodríguez por su papel tan importante en la formación de la carrera, así como sus tutorías y el siempre poner todo lo que estaba a su alcance para apoyar a esta primera generación de Ingenieros en Biotecnología.

Al Dr. Marco Adán Juárez, al Dr. Javier Montalvo y al resto de la academia de Ingeniero en Biotecnología, por guiarnos en nuestra formación profesional con atenciones personalizadas hacia los alumnos de la carrera.

A todos los profesores y profesoras que formaron parte muy importante de mi formación profesional, por dejar algo que marcó para siempre mi vida académica.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria.....	4
Agradecimientos.....	5
Índice de figuras.....	8
Índice de tablas.....	9
Abreviaturas.....	10
Resumen.....	11
Introducción.....	12
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos.....	14
Hipótesis.....	15
Capítulo 1. Revisión literaria.....	16
1.1 El agua a nivel global.....	16
1.2 El agua en México.....	17
1.3 Situación de las aguas residuales en México.....	18
1.3.1 Almacenamiento en presas.....	20
1.3.2 El agua en la agricultura.....	20
1.3.3 Abastecimiento público.....	21
1.3.4 El uso del agua en la industria.....	21
1.3.5 Descargas de aguas residuales.....	21
1.3.6 Tratamientos de aguas residuales.....	22
1.4 Clasificación de las aguas residuales.....	22
1.4.1 Aguas residuales domésticas.....	22

1.4.2	Aguas residuales urbanas.....	23
1.4.3	Aguas residuales industriales.....	23
1.4.4	Aguas residuales de lluvia.....	24
1.4.5	Aguas con restos líquidos industriales.....	24
1.4.6	Aguas residuales agrícolas.....	24
1.4.7	Características físicas y químicas de las aguas residuales.....	25
1.4.8	Características microbiológicas de las aguas residuales.....	26
1.5	Tipos de tratamientos de aguas residuales.....	26
1.5.1	Tratamiento físico.....	27
1.5.2	Tratamiento químico.....	27
1.5.3	Tratamiento biológico.....	27
1.5.4	Tratamiento aerobio de contaminantes.....	28
1.5.5	Tratamiento anaerobio de contaminantes.....	29
1.6	Sistemas bioelectroquímicos.....	29
1.7	Celdas de combustible microbianas (CCM).....	30
1.8	Componentes de una celda de combustible microbiana.....	32
1.8.1	Microorganismos.....	32
1.8.2	Sustrato.....	32
1.8.3	Ánodo.....	33
1.8.4	Cátodo.....	34
1.9	Tipos de celdas de combustible microbiana.....	35
Capítulo 2. Materiales y métodos.....		37
2.1	Ubicación del experimento.....	37
2.2	Tipo de agua y colecta.....	37
2.3	Preparación de materiales.....	38
2.4	Construcción y operación de la CCM.....	39
2.5	Determinación de materia orgánica en la CCM.....	41
2.5.1	Material y equipo.....	41
2.5.2	Procedimiento.....	41
Capítulo 3 Resultados y discusiones.....		42

Conclusión.....	46
Referencias bibliográficas.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración básica de una CCM de doble cámara.....	30
Figura 2. Diagrama de la CCM utilizada en los experimentos.....	40
Figura 3. Cinética de generación de voltaje en CCM.....	42
Figura 4. Eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Generación de centros urbanos (descargas municipales).....	19
Tabla 2. Características generales de las Aguas Residuales de la Planta Tratadora del Gran Bosque Urbano- Ejercito Mexicano.....	37
Tabla 3. Tipos de tratamientos usados en el experimento.....	40
Tabla 4. Resultados obtenidos del sistema dos.....	43
Tabla 5. Comparación de resultado con lo reportado por otros autores.....	45

ABREVIATURAS

CCM	Celda de combustible microbiana
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Km³	Kilómetro cúbico
m³	Metro cúbico
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
L/s	Litros por segundo
pH	Potencial de hidrógeno
DQO	Demanda química de oxígeno
NADH	Nicotinamida adenina dinucleótido
FADH	Favín adenín dinucleótido
BES	Bioelectrochemical System (siglas en inglés)
CEM	Celda de electrolisis microbiana
CESM	Celda de electrosíntesis microbiana
MIP	Membrana de intercambio de protones
MIC	Membrana de intercambio de cationes

RESUMEN

La investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, ubicada en Saltillo Coahuila, México. El objetivo de este proyecto consistió en evaluar el desempeño en la generación de voltaje y comportamiento de la materia orgánica en una CCM con diferentes configuraciones de electrodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual municipal. Se evaluaron tres tipos de sistemas, siendo el sistema 2 donde la barra de grafito estaba unida al circuito y la espuma de poliuretano libre en el medio, la que mostró mayor generación de voltaje con un valor de 100 mV a las 144 horas. En comparación con otros autores, se podría decir que los resultados obtenidos no son óptimos, estando en un nivel bajo, tomando en cuenta las condiciones del agua residual con la que se trabajó y las condiciones ambientales.

INTRODUCCIÓN

A consecuencia de la crisis ambiental, la escasez de recursos naturales, el calentamiento global y la contaminación, han provocado el surgimiento de avances tecnológicos para la obtención de los recursos necesarios sin causar un mayor impacto ambiental al planeta.

Por otra parte, es importante resaltar que México es un país megadiverso, lo que le permite situarse como país con recursos considerados como fuentes renovales de energías, esto le permite buscar nuevas formas de satisfacer las necesidades de la población y a las empresas desarrollar tecnologías e información para la transición energética en la producción industrial.

Las energías alternativas son un reto y una oportunidad; dentro de las principales oportunidades, se puede ver un futuro “mejor” de un planeta con bajas emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera y, por consecuencia, un menor impacto en el calentamiento global (principales causantes del cambio climático).

Y a su vez, se convierte en un reto, ya que se tendrían que realizar algunos cambios en el estilo de vida de los humanos, deshabituarnos a lo ya establecido.

El crecimiento de las energías renovables es importante, pues según investigaciones, la participación de las energías renovables en el suministro eléctrico global pasará del 26% en el 2018 al 44% en el 2040, y proporcionará 2/3 del incremento de la demanda eléctrica registrada en ese periodo en tecnologías eólicas y de más.

Anudado a lo anterior de acuerdo con algunos estudios de balances hídricos del planeta, solo el 0.007% del agua dulce está disponible para las actividades diarias del ser humano. Por eso, queda claro que durante el siglo XXI los problemas que

estén relacionados con la disponibilidad del vital líquido van a seguir siendo el tema principal para la supervivencia humana, al mismo tiempo que la producción de energía y alimentos.

El uso del agua a nivel mundial se distribuye principalmente en los asuntos domésticos (13%), industriales (59%) y agrícolas (30%); esto para los países desarrollados, mientras que para los países en desarrollo se distribuyen de esta manera: 8% tiene uso doméstico, 10% para la industria y para la agricultura 82%. Ante este panorama surge la necesidad de tratar agua mediante el desarrollo de estrategias, tratamientos o manejos sustentables del agua, para controlar la contaminación de la misma y así poder garantizar su disponibilidad para cualquier actividad humana necesaria para la vida diaria.

Actualmente, una de las tecnologías más prometedoras para atacar ambas problemáticas son las celdas de combustible microbianas (CCM). Son sistemas que pueden contribuir a solucionar la contaminación del agua, además de cubrir otra gran necesidad de la humanidad que es la producción de energía. Una CCM es un dispositivo que usa microorganismos para convertir la energía química de un sustrato o fuente rica en materia orgánica para generar energía eléctrica. Esto es posible por un intercambio de electrones que sucede durante su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en vez de darle el lugar aún aceptor natural de electrones como lo es el oxígeno.

Por lo anterior el presente trabajo propone evaluar el desempeño de tres sistemas diferentes con grafito y espuma de poliuretano para el tratamiento de agua residual municipal y la generación de voltaje, así como el comportamiento de la degradación de la materia en dichos sistemas.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el desempeño en la generación de voltaje y comportamiento de la materia orgánica en una celda de combustible microbiana con diferentes configuraciones de electrodos de grafito y espuma de poliuretano durante el tratamiento de agua residual municipal.

Objetivos específicos.

1. Sintetizar y caracterizar los electrodos de grafito y espuma de poliuretano.
2. Construir y operar tres CCM escala laboratorio.
3. Caracterizar electroquímicamente las CCM.

HIPÓTESIS

El empleo de un material compuesto por barras de grafito y espuma de poliuretano recubierta con grafito en aerosol como ánodo, en una celda de combustible microbiana, promoverá la generación de electricidad e incrementará la degradación de materia orgánica durante el tratamiento de agua residual municipal.

CAPÍTULO 1

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 El agua a nivel global.

El agua como un recurso vital y necesario para el desarrollo de cualquier país, debería ser administrada para el beneficio de la población, lo que lleva a tener mayores responsabilidades relacionadas con el líquido vital; su contabilización, conservación y control de su uso adecuado y derechos del uso del agua. Algo muy importante que hay que considerar es que cuando se habla de una adecuada administración de este recurso es que, si hay una crisis del agua, también habrá una crisis de desarrollo.

Uno de los desafíos más graves ante los que se encuentra el mundo de hoy es la crisis del agua que se avecina y, en efecto, en el siglo pasado la demanda mundial sobre los recursos hídricos se multiplicó por seis, mientras que la población del planeta se triplicó. De no mejorar la gestión de los recursos hídricos y los ecosistemas, se estima que para el año 2025 dos tercios de la población mundial padecerá problemas de penuria de agua, con escasez grave o moderada (GWP, 2016).

Actualmente, el mundo está en constante competencia por el recurso hídrico con la intención de cubrir las necesidades de sus propias poblacionales, energéticas y agrícolas. Sin embargo, algunos países no cuentan con políticas y legislaciones nacionales de desarrollo en los recursos hídricos que ayuden a establecer marcos para la gestión del agua.

Por lo tanto, es preciso decir que a medida que aumenta la población y la economía, la demanda de agua es mayor y por consecuencia la presión sobre los recursos hídricos crece, los cuales, de por sí ya se muestran limitados.

El agua constituida como un valioso recurso, escaso en el tiempo y el espacio, sometido a la vulnerabilidad de la contaminación, de bajo costo y algunas veces sin las medidas legales de protección, requiere de un manejo integral que muchas veces no es puesto en la práctica. Por tanto, la gestión del agua en esencia es una gestión de conflictos, que permite atender los diversos intereses relacionados con la cantidad y calidad del agua; implica diseñar y utilizar mecanismos prácticos y eficaces para resolver los conflictos que se presentan (CONAGUA, 2022).

1.2 El agua en México.

En México el agua es un asunto estratégico y de seguridad nacional, hasta el día de hoy se ha convertido en el elemento central de la política ambiental y un factor clave de la política de desarrollo social y económica, dependiendo de su disponibilidad queda el desarrollo de algunas regiones del país, y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar poblacional.

Las condiciones del clima del territorio mexicano varían desde la aridez en el norte, climas cálidos- húmedos y subhúmedos en el sur- sureste, y climas fríos o templados en las regiones geográficas elevadas.

Las zonas centro y norte del país reciben apenas el 9 % del agua renovable al año, mientras que en las entidades del sur-sureste reciben más de la mitad del agua renovable al año (67.2 %), sin embargo, sus habitantes tienen menor acceso al vital líquido, pues no cuentan con los servicios básicos (INEGI, 2019).

Las cuencas son unidades naturales de terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas debida a la conformación del relieve. Para propósitos de administración de las aguas nacionales, al 7 de julio del 2016 se tenían publicadas las disponibilidades de las 757 cuencas hidrológicas en que se divide nuestro país. Las cuencas se agrupan en 37 regiones hidrológicas, éstas a su vez en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA).

En lo que respecta a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos. Al 4 de enero de 2018 se tenían publicadas las disponibilidades de todos ellos. La

medición del ciclo hidrológico la lleva a cabo CONAGUA con 3,090 estaciones climatológicas y 815 estaciones hidrométricas. (CONAGUA, 2019).

Cerca de un 70% del agua que llueve en el país se evapora y regresa a la atmosfera, el resto escurre por los ríos o arroyos o se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos.

En los ríos del país fluyen 396 km cúbicos de agua anualmente, incluyendo las importaciones de otros países y excluyendo las exportaciones. Aproximadamente el 87% de esta corriente de agua se presenta en 39 ríos, cuyas cuencas ocupan el 58% de la extensión territorial continental del país.

Por otro lado, con respecto a la población, en las últimas cinco décadas se cuatriplicó, pasando de ser 25.8 millones de habitantes en 1950 a 97.4 millones para el 2000. En ese entonces y ahora 22 años después, impacta en la demanda de agua para consumo humano y quizá en mayor proporción, en la demanda de agua de uso agrícola e industrial.

El 64% del volumen de las aguas subterráneas va destinada para el abastecimiento público, el 33% para uso agropecuario y el 24% para la industria (CONAGUA, 2016). Lo que nos lleva a deliberar los retos que tenemos como país hacia el agua; la demanda del vital líquido crece conforme aumenta la población y el desarrollo económico, la mala distribución del agua ante la población en tiempo y espacio, la disponibilidad debido a la contaminación de las aguas y el uso ineficiente del agua en diferentes sectores que la utilizan.

1.3 Situación de las aguas residuales en México.

Existen 17 acuíferos con problemas de intrusión salina ubicados principalmente en Baja California, Baja California Sur, Colima, Sonora y Veracruz que presentan los principales retos para lograr un manejo sustentable del agua en México y es que la mayoría de las aguas del país reciben descargas de agua residuales sin tratamiento (municipal o industrial) lo que ha llevado a la gran cantidad de aguas contaminadas en el país. Solamente la tercera parte de las aguas municipales se recolectan en el

alcantarillado y reciben algún tratamiento antes de su descarga (SEMARNART, 2022).

Según el Registro Público de Derechos de Agua, se tenía un volumen de 75 km cúbicos para uso consuntivos. Esto equivale al 16% de la disponibilidad natural media nacional, y de acuerdo con la clasificación de la ONU, el recurso del país se considera como sujeto a presión moderada. Sin embargo, en la zona centro y norte, este indicador alcanza un valor de más de 40% lo que convierte al agua en un elemento sujeto a fuerte presión y limitante de desarrollo.

Tabla 1. Generación de centros urbanos (descargas municipales).

Aguas Residuales	Total
Se recolectan en alcantarillado	6.46 km ³ /año (255 m ³ /s)
Se generan	2.18 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.75 millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.5 millones de toneladas de DBO ₅ al año

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el total del agua dulce que tiene el país es de 446 mil 777 millones de metros cúbicos, de los cuales, el 67% se encuentra en la región sureste, a la vez, el resto del territorio nacional sólo posee el 33 % del vital líquido.

La CONAGUA explica que el agua renovable o agua dulce, que nutre los 633 mil km de longitud de los ríos mexicanos, los 653 acuíferos y las 731 cuencas del territorio, es la cantidad máxima del líquido que es posible explorar sin modificar los ecosistemas.

Hoy en día, el país recibe 449 mil millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De dicha cantidad, se estima que el 21.2% escurre por los ríos y arroyos y el 6.3% restante se filtra y recarga los acuíferos.

En general, el agua renovable disponible es de tres mil 692 metros cúbicos por habitante al año, pero es importante mencionar y hacer notar que en el sureste del país (que cuenta con el 23% de la población), la disposición del líquido es siete veces mayor que el resto del territorio nacional.

Además de lo anterior mencionado, un reto muy grande que enfrentará el país en el futuro es que se estima que para el 2030 el agua renovable a nivel nacional disminuirá a tres mil 250 metros cúbicos. Por lo que se debe tener especial cuidado con los mantos subterráneos, puesto que su sobreexplotación ocasiona los abatimientos de los niveles freáticos, el hundimiento del terreno y puede causar afectaciones difícilmente reversibles a los ecosistemas y a la sociedad (Gamboa, 2017).

1.3.1 Almacenamiento en presas.

Con el fin de dar abasto a las necesidades de la población, en cuanto a consumo de agua, ha sido necesario contar con mayores volúmenes del líquido vital de los que se podrían obtener de las fuentes de suministros comunes (ríos, lagos y acuíferos) por lo que se han construido infraestructuras (presas, embalses y bordos) para reducir los efectos de las contingencias ocasionadas por la variabilidad natural. Estas infraestructuras sirven también para el control de avenidas y en algunos casos para la generación de energía.

A nivel nacional existen 5100 presas y bordos que almacenan aproximadamente 150 mil hectómetros cúbicos de agua. Pero gran parte de esa cantidad de agua se almacena en 180 presas al 73 % de su capacidad (SEMARNAT, 2019).

En México, la CONAGUA clasifica a los consumidores de agua en tres sectores: agrícola, abastecimiento público e industrial. En 2017, el volumen que se concesionó a estos usos fue 21 % mayor al registrado en 2001, pasando de 72.7 a 87.9 kilómetros cúbicos; esta última cifra representa el 19.2 % del agua renovable total 451.6 km cúbicos (SEMARNAT, 2019).

1.3.2 El agua en la agricultura.

Es el sector que más agua consume (CONAGUA, 2016); para el 2017 recibió el 76 % del volumen para las actividades pecuarias y acuícolas. El agua es destinada a los sistemas de riego y producen cerca del 80 % de la producción natural.

1.3.3 Abastecimiento público.

Corresponde a la que se entrega por las redes de agua potable y abastece usuarios domésticos, así como el sector público urbano. Usa aproximadamente el 14.4% del volumen total, siendo su principal fuente de abasto los acuíferos, sin embargo en el informe de la CONAGUA realizado en el 2019, menciona que la superficie asignada creció hasta el 59% (CONAGUA, 2019).

1.3.4 El uso de agua en la industria.

La industria autoabastecida y de generación de energía eléctrica usa alrededor del 9% del agua. Con respecto a su fuente de abasto, lo dominan las aguas superficiales, sin embargo, la extracción de agua subterránea para la industria aumentó a más del 68.6% (SEMARNART, 2019).

1.3.5 Descargas de aguas residuales.

Las aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias contienen elementos y sustancias químicas disueltas, así como sólidos suspendidos, que cuando son vertidas sin un tratamiento causan contaminación de los cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos, lagunas, etc); se estima que a nivel mundial entre el 80 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir un tratamiento previo (CONAGUA, 2020).

Las aguas residuales de origen municipal provienen de las viviendas, edificios públicos y de la escorrentía que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos, bacterias, coliformes fecales y materia orgánica, entre otros (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2010).

A nivel nacional, entre los años 2000 y 2005 el volumen de descargas generados de agua residuales municipales aumentó poco más del 6 % (pasando de 250 a 265.6 metros cúbicos). Para el 2014 el volumen de aguas residuales provenientes de las descargas municipales fue de aproximadamente 7.2 miles de hectómetros cúbicos (SEMARNART, 2017).

1.3.6 Tratamiento de aguas residuales.

Anteriormente, la solución más común para desalojar las aguas residuales ha sido descargarlas directamente a los cuerpos de agua. De esa manera, el problema se diluía o se enviaba lejos del sitio de origen con la esperanza de que los ecosistemas procesarían los contaminantes y no tendría consecuencias negativas. Pero cuando el volumen de aguas residuales creció y rebasó la capacidad natural de los ecosistemas acuáticos para procesarlo, se hicieron evidentes los graves problemas de salud y ambientales que ocasionaban.

En términos generales, el tratamiento se refiere a un conjunto de procesos, tanto físicos, químicos y biológicos, que remueven o reducen los contaminantes. Estos procesos se clasifican en general en tres niveles, los cuales de manera progresiva eliminan desde la materia sólida que no se disuelve en el agua, hasta los microorganismos patógenos y los olores desagradables que caracterizan a las aguas residuales. Los procesos de tratamiento más comunes incluyen los lodos activados, lagunas de estabilización, primario avanzado, lagunas aireadas, filtros biológicos, dual y otros (SEMARNAT, 2020).

México ha avanzado en el tratamiento de aguas residuales en las últimas décadas. Para el 2016 el país ya trataba 123.6 metros cúbicos por segundo de aguas residuales en 2,536 plantas municipales y 75.9 metros cúbicos en 3,041 plantas industriales, que representa un incremento muy notable a comparación del año 1998 (SEMARNART, 2017).

1.4 Clasificación de las aguas residuales.

Las aguas residuales son comúnmente clasificadas como: aguas residuales domésticas, aguas residuales urbanas, aguas residuales industriales, agua residual de lluvia, agua con restos líquidos industriales, y aguas residuales agrícolas (Metcalf *et al.*, 2007).

1.4.1 Aguas residuales domésticas.

Originadas en viviendas o instalaciones comerciales privadas o públicas. Están compuestas principalmente por aguas fecales, aguas de lavado y limpieza. Contienen principalmente gérmenes patógenos, materia orgánica, sólidos, detergentes, nitrógeno y fósforo entre otros en menor proporción.

Desde un punto de vista sanitario, son de mayor interés los gérmenes de origen fecal con el agua porque pueden producir enfermedades hídricas. Estos son principalmente producidos por el aparato digestivo y pueden ser patógenos (Metcalf *et al.*, 2007).

El agua residual domestica también puede dividirse en:

- Aguas negras: son las que contienen orina y heces fecales (inodoros y urinales).
- Aguas grises: son las que contienen detergentes y grasas, provienen de lavaplatos, lavadoras, lavabos y lavaderos. Además, contienen agua que se utiliza para bañarse (Eco – Intellutions, 2019).

1.4.2 Aguas residuales urbanas.

La descarga de agua residual de origen urbano proviene de viviendas, edificios públicos y de la corriente de agua que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno y fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales, materia orgánica entre muchos otros (Jiménez *et al.*, 2010). En México en el año 2012, los centros urbanos descargaron aproximadamente 7.3 km³ de aguas residuales. A nivel entidad federativa, las que en ese año generaron las mayores descargas de aguas municipales fueron el Estado de México, Ciudad de

México y Veracruz, que en conjunto contabilizan 27.1 % del volumen generado. (SEMARNAT, 2018).

1.4.3 Aguas residuales industriales.

Es el agua que se utiliza para el campo y ganado que puede conocerse también como procesos productivos industriales. En el país, las plantas de tratamiento industrial procesaron 60,532 L/s, removiendo 1.3 millones de toneladas de DBO, un volumen que corresponde a partes el 19 % de la carga orgánica de las aguas industriales generadas. Las entidades que desde el 2017 a la fecha han tratado mayor volumen de agua residual industrial fueron Sonora, Veracruz, Tamaulipas, Chiapas y Baja California Sur (Jiménez, *et al.*, 2010).

1.4.4 Agua residual de lluvia.

Es la generada por la lluvia y puede caer agua limpia o poco contaminada, sin embargo, es importante mencionar que los primeros litros que cae de la lluvia suelen estar altamente contaminados, esto es porque las gotas de la lluvia atrapan la contaminación suspendida en el aire y arrastran la basura que está en las calles y la que se encuentra estancada en las coladeras (Eco – Intellutions, 2019).

1.4.5 Agua con restos líquidos industriales.

Las industrias deben contar con plantas de tratamiento de agua; en algunas ocasiones suelen ser las aguas más contaminantes y no pueden llegar al alcantarillado y mucho menos a los ecosistemas.

La diversidad de las aguas industriales puede ser muy amplia (aguas de proceso, limpieza, refrigeración, etc.), pues los contaminantes que contienen son de naturalezas muy diferentes.

La mayor parte de los procesos industriales usan el agua de una u otra manera, una vez que haya sido usada el agua debe ser tratada antes de ser vertida al medio natural (Rittmann, 2001).

1.4.6 Agua residual agrícola.

Son todas aquellas aguas contaminadas por fertilizantes y pesticidas que se usan para incrementar el rendimiento de los cultivos agrícolas. Aunque se usen en todo momento, es importante tener conocimiento de su uso porque son químicos que contaminan bastantes litros de agua y causan problemas a la salud del ser humano.

Estas aguas deben recibir un tratamiento muy complejo, mayormente de tipo químico. Los métodos físicos y biológicos también son usados para el tratamiento de estas aguas, sin embargo, los químicos son los que eliminan con mayor eficacia las sustancias dañinas (Fibras y Normas de Colombia, 2022).

1.4.7 Características físicas y químicas de las aguas residuales.

El estar consciente de la composición de las aguas residuales, ayuda a elegir el adecuado tratamiento que debería tener. Los contaminantes físicos y químicos son los que determinan el tipo de tratamiento que debe llevar el agua (Alexander Franco, 2002). Los principales componentes son:

- **Materia orgánica:** son los residuos vegetales, animales, detergentes, grasas, aceites y estos están compuestos por carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y azufre. Estos serían los principales elementos que una planta de tratamiento de agua debería eliminar para garantizar su proceso y purificación.
- **Materia inorgánica o sólida grande:** puede ser separada por medio de rejas (telas, plásticos, llantas) y todo el material inorgánico que pueda presentarse en el agua.

- Materia inorgánica o sólidos pequeños: este material puede atravesar una reja; algunas flotan y otras quedan en el fondo y para separarlas se usan materiales que permiten su separación sea más fácil.

1.4.8 Características microbiológicas de las aguas residuales.

La materia orgánica genera organismos microscópicos que deben ser eliminados, entre éstos los principales son (Barba, 2002):

- Bacterias: se originan a partir de la materia orgánica y se encarga de reducirla, estas bacterias nacen principalmente de las heces fecales. Pueden ser de origen fecal o bacterias implicadas en procesos de biodegradación, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento. En las aguas residuales brutas, predominan las especies pertenecientes a los siguientes grupos: *Escherichia*, *Salmonella*, *estreptococos fecales*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Serratia*, *Bifidobacterium*, *Clostridium*, *Zooglea*, *Flavohacterium*, *Nocardia*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Mycobacterium*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, etc. Las bacterias coliformes se utilizan como indicador de polución por vertidos de origen humano, ya que cada persona elimina diariamente de 100,000 a 400,000 millones de coliformes a través de las heces, además de otras clases de bacterias.
- Hongos: se generan en aguas industriales y son más resistentes a las bacterias. La mayoría son aerobios estrictos, pueden tolerar valores de pH relativamente bajos, y tienen baja demanda de nitrógeno. Esto les hace desempeñar una función importante en el tratamiento de aguas residuales industriales. Los géneros que pueden encontrarse son: *Geotrichium*, *Mucor*, *Aureobasidium*, *Subbaromyces*, *Fusarium*, *Sepedonium* y *Sphaerotilus*. En el tratamiento con lodos activados, los hongos, junto a bacterias filamentosas, pueden dar lugar a un problema conocido como bulking, debido a que su presencia dificulta la sedimentación de los fangos.
- Protozoos: son organismos que se alimentan de bacterias y materia orgánica. Los que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son

amebas, flagelados y los ciliados libres y fijos. Estos organismos juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en filtros percoladores y fangos activados. Pueden eliminar bacterias suspendidas en el agua, ya que éstos no sedimentan, evitando la producción de efluentes con turbidez.

1.5 Tipos de tratamientos de aguas residuales.

Los tratamientos de aguas residuales se dividen en función de la naturaleza del proceso que se lleve a cabo, de esta forma se pueden observar los tratamientos de tipo físico, químico y biológico.

1.5.1 Tratamiento Físico.

Son los métodos en los que se aplica una separación física, generalmente de sólidos. Estos métodos normalmente dependen de las propiedades físicas de los contaminantes, como la viscosidad, tamaño de partículas, flotabilidad, etc. Entre estos métodos podemos encontrar el tamizado, la precipitación, separación y filtración de sólidos.

Las aguas residuales son consideradas dispersiones debido a la gran cantidad de impurezas que contienen. Estas impurezas varían de tamaño en un amplio rango. La separación de gran parte de las impurezas tiene lugar por sedimentación. Sin embargo, debido a que muchas de estas son demasiado pequeñas, para obtener un proceso de eliminación eficiente mediante esta operación, es preciso llevar a cabo la unión de estas partículas en grupos de mayor tamaño, facilitando su decantación con la intención de obtener una separación satisfactoria por sedimentación. A este proceso se le conoce como coagulación (Aguilar, 2002).

1.5.2 Tratamiento químico.

Este tratamiento tiene como finalidad mediante la adición de ciertos productos químicos la alteración del estado químico de estas sustancias que permanecerían por tiempo indefinido de forma estable para convertirlas en partículas susceptibles de separación.

Con este tratamiento puede llegar a eliminar del 80 al 90% de la materia total suspendida, del 40 al 70% de DBO y del 30 al 40% de la DQO (Aguilar, 2002).

1.5.3 Tratamientos Biológicos.

Se usan sistemas biológicos de manera que se pretende eliminar los contaminantes coloidales. Son microorganismos que actúan sobre la materia en suspensión y luego la transforman en sólidos sedimentados. Pueden ser procesos aeróbicos o anaeróbicos, como los son los lodos activos, los filtros percoladores, la biodigestión anaerobia y las lagunas aireadas.

Los tratamientos biológicos son preferidos, pues contienen mayores rendimientos con menos costos económicos de explotación y mantenimiento, destruyen completamente los contaminantes, transformándolos en sustancias inocuas como el dióxido de carbono, el metano, el nitrógeno molecular, etc. (Daphne, 1994). Los costos de los procesos biológicos a los químicos son de 5 a 20 veces menores que los químicos (Marco *et al.*, 1997).

1.5.4 Tratamiento aerobio de contaminantes.

El tratamiento biológico es una opción para depurar las aguas residuales y que se basa en la capacidad que tienen los microorganismos para metabolizar y convertir la materia orgánica, en suspensión y disuelta, en tejido celular nuevo y diferentes gases (Metcalf y Eddy, 2003). El oxígeno juega un papel primordial en el tratamiento biológico de las aguas residuales, esto se debe a que su ausencia o presencia condiciona el tipo de microorganismos que se encargarán de degradar y eliminar la materia orgánica presente en el agua residual (Ramalho, 2003).

Un ejemplo de estos tratamientos pueden ser el lodo activado, que se refiere a un proceso de tratamiento por el cual el agua residual y el lodo biológico (cultivo aeróbico de microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado reactor. Los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, lugar del cual son recirculados nuevamente al tanque aireador o reactor para mantener la concentración de microorganismos en la cámara de aireación aproximadamente constante, el resto se elimina como barros en exceso. En el proceso de lodos activados los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica en el agua residual de manera que ésta les sirve de sustrato alimenticio. Es importante indicar que la mezcla o agitación se efectúa por medios mecánicos superficiales o sopladores sumergidos, los cuales tienen doble función: primero, producir una mezcla completa y segundo, agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle (Romero, 2008).

1.5.5 Tratamiento anaerobio de contaminantes.

La tecnología anaerobia para el tratamiento de aguas residuales, se encuentra bien consolidada. Entre las principales ventajas se destacan: menor costo de instalaciones, no es necesario suministrar oxígeno por lo que el proceso es más económico y menor requerimiento energético, además de producir bajas cantidades de lodos si se compara con las tecnologías aerobias. También se puede implementar en sistemas compactos que requieren menor área de terreno, que los sistemas de lagunajes. No obstante, estos sistemas presentan desventajas como: requieren de un mayor tiempo de contacto o retención hidráulica, así como más tiempo de aclimatación lo que impide el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales y dificultades para tratar aguas residuales con bajas cargas orgánicas. Por lo general, se requiere de un pos-tratamiento ya sea para descargar en los cuerpos receptores o para su reúso (Mara, 2004; Calijuri *et al.*, 2009; Rojas *et al.*, 2010).

1.6 Sistemas Bioelectroquímicos.

Los sistemas bioelectroquímicos (BES, por sus siglas en inglés) se basan en la capacidad de algunos microorganismos para catalizar diferentes reacciones electroquímicas, específicamente, reacciones que involucren una transferencia de electrones, como las de óxido-reducción (Rabaey *et al.*, 2007; Rozendal *et al.*, 2008).

Según el modelo y su aplicación, los sistemas bioelectroquímicos pueden clasificarse en cuatro categorías: celdas de combustible microbianas (CCM) para la generación de energía eléctrica, celdas de electrólisis microbiana (CEM) que producen compuestos químicos inorgánicos como el hidrógeno, celdas de electrosíntesis microbiana (CEsM) para la síntesis de compuestos químicos orgánicos; y las celdas de desalinización microbiana para la remoción de sales en medio acuoso (Wang y Ren, 2013).

Los sistemas bioelectroquímicos son una herramienta biotecnológica útil para explorar y explotar la capacidad de los microorganismos, de mejorar el rendimiento de su fermentación. Estos sistemas usan energía eléctrica como fuerza externa para redirigir las vías metabólicas microbianas hacia el aumento o disminución de los productos finales.

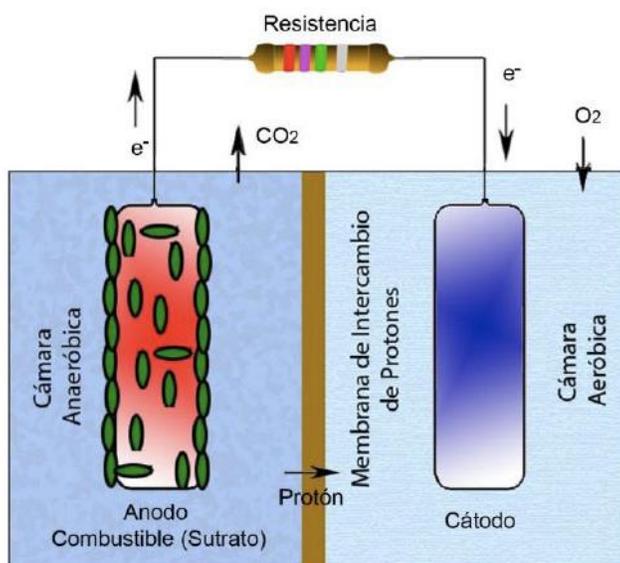


Figura 1. Configuración básica de una CCM de cámara doble modificada a partir de lo descrito por Du *et al* (2007).

1.7 Celdas de combustible microbianas (CCM).

Las celdas de combustibles microbiana (CCM) son dispositivos que usan a los microorganismos para oxidar la materia orgánica e inorgánica y generar energía eléctrica (Logan *et al.*, 2006). Como todos los sistemas bioelectroquímicos, consisten en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, que están unidos por un cable externo formando un circuito eléctrico completo, además de los compartimientos que contienen a los electrodos y que están separados por una membrana permeable solo a cationes (Bond y Lovley, 2003).

En la cámara anódica, los microorganismos crecen y oxidan el sustrato disponible en condiciones anaerobias, liberan electrones, protones y CO₂ al medio. Los protones se dirigen a la cámara catódica atravesando la membrana de intercambio catiónico, y al mismo tiempo los electrones son dirigidos al ánodo, gracias a la habilidad que tienen algunos microorganismos de transferir electrones fuera de la célula, lo que se conoce como transferencia de electrones extracelular (Rabaey, 2010). Una vez en el ánodo viajan al cátodo a través del cable externo que conecta a los electrodos (colector de electrones), cuando los electrones llegan al cátodo en condiciones aerobias, se combinan con los protones para reducir moléculas de oxígeno hasta formar agua, lo que crea un flujo de corriente eléctrica (Rabaey y Verstraete, 2005; Logan y Regan, 2006; Lovley, 2006). Cuando el oxígeno u otras moléculas aceptoras, como nitratos o sulfatos, están presentes en la cámara catódica, la generación de corriente eléctrica es producida, pero si no están presentes, la generación no es espontánea. Los electrones que llegan al cátodo reducen alguna molécula para completar el proceso de óxido-reducción (que comenzó en el ánodo) y estimular la generación de corriente eléctrica (Pant *et al.*, 2012). Los microorganismos que generan energía eléctrica son referidos como exoelectrogénicos por su capacidad de transferir electrones fuera de la célula (Logan y Regan, 2006).

Las CCM se caracterizan por generar energía que opera eficientemente a temperatura ambiente e incluso a muy bajas temperaturas también, además de producir muy bajas concentraciones de CO₂.

Al utilizar la materia orgánica de las aguas residuales como combustible mientras se está generando energía, se consigue una depuración de aguas contaminadas (Huang *et al.*, 2013).

Las CCM pueden ser monitoreadas a través de parámetros electroquímicos tales como densidad de potencia, corriente eléctrica y el voltaje. De igual forma, un parámetro biológico muy importante es la carga orgánica del sustrato a emplear expresada en kg/m³ (Rabaey *et al.*, 2003; Zhang., *et al* 2013).

1.8 Componentes de una Celda de Combustible Microbiana.

1.8.1 Microorganismos.

Múltiples trabajos han utilizado diversos tipos de inóculos, entre los que destacan, lodos activados (Lee *et al.*, 2003), lodos anaerobios (Rabaey *et al.*, 2003), aguas residuales domesticas (Min y Logan, 2004), aguas residuales industriales (Prasad *et al.*, 2006), sedimentos marinos (Bond *et al.*, 2002) o sedimentos acuáticos (Holmes *et al.*, 2004a). Los mejores resultados se han obtenido empleando lodos activados o anaerobios (Rabaey *et al.*, 2008.). Los cultivos mixtos generan una mayor energía que los cultivos puros, esto se debe a las interacciones sinérgicas que se presentan en el ánodo y la participación de cepas con capacidades metabólicas complementarias (Lee *et al.*, 2003).

1.8.2 Sustrato.

Diversos estudios realizados a lo largo del tiempo demuestran que el uso de cultivos de bacterias específicas usan como sustrato el azúcar, así como también usan las aguas residuales domesticas (Liu *et al.* 2004).

El sustrato es uno de los aspectos más importantes de la CCM, porque es el combustible a partir del cual se genera la energía. Los compuestos puros se pueden degradar de manera más simple, lo que permite obtener mayor generación de energía (Pant *et al.*, 2010), además a nivel experimental es recomendable su uso porque se facilita la evaluación de condiciones operacionales de la CCM tales como son, la eficiencia coulombica, la densidad de potencia y la resistencia interna. Algunas investigaciones han empleado, por ejemplo, acetato (Huang *et al.*, 2010; Leropoulos *et al.*, 2010; Nam *et al.*, 2010), glucosa (Li *et al.*, 2010; Sharmay Li, 2010;), sacarosa (Leropoulos *et al.*, 2005), almidón (Shimoyama *et al.*, 2008), lactato (Feng *et al.*, 2010), ácido tereftálico (Song *et al.*, 2009), tintes sintéticos (Ali, 2010), indol (Luo *et al.*, 2010), lactosa, maltosa, xilosa, formiato, propionato, ácido succínico y etanol (Liu *et al.*, 2010), entre otros.

Sin embargo, el uso de sustratos complejos en una CCM es de gran interés porque, además de ser fuentes de energía, estos se pueden degradar y/o biorremediar antes de su descarga al medio ambiente. A diferencia de los compuestos puros los sustratos complejos requieren para su degradación una comunidad microbiana diversa y electroquímicamente activa (Pant *et al.*, 2010), cuyas poblaciones se van seleccionando dependiendo del tipo de sustrato. Como ejemplos de este tipo de sustratos se pueden explorar: aguas residuales provenientes del procesamiento de frutas y vegetales, suero de queso, melazas de destilerías, aguas residuales de biorrefinerías, aguas residuales de industrias farmacéuticas con contaminantes recalcitrantes, residuos agrícolas, entre otros. Además, se ha demostrado que las CCM pueden utilizar como sustratos no sólo material orgánico degradable, sino también material resistente a la biodegradación (Logan *et al.*, 2006).

1.8.3 Ánodo.

Deben ser conductores, biocompatibles y químicamente estables en la solución del reactor, el material más usado es el carbono en cualquier presentación.

Para incrementar el desempeño del ánodo, diferentes estrategias químicas y físicas han sido utilizadas. Materiales electrocatalíticos como son compuestos de

polianilinas han mostrado que mejoran la generación de corriente ayudando a la oxidación directa de metabolitos microbianos (Falcón *et al.*, 2009).

En este tipo de electrodo es donde se lleva a cabo la oxidación, el ánodo debe cumplir con los criterios mencionados anteriormente, los materiales para el ánodo más utilizados son los metales y el carbón. El ánodo presenta una característica diferente al cátodo y es la formación de biopelícula, esto ocurre cuando el material del ánodo tiene especial compatibilidad con el microorganismo, en ocasiones puede entenderse como un fenómeno favorable, pues facilita el transporte de electrones a través del circuito externo para posteriormente encontrarse en la cámara catódica.

Materiales convencionales de carbono: en este grupo se encuentran las varillas de grafito, tela de carbón, papel carbón, fieltro de carbón y el carbón reticulado. El carbón es utilizado por cumplir con las características de conductividad, biocompatibilidad, estabilidad química y accesibilidad, es importante aclarar que en consecuencia de la accesibilidad no es un material de costo elevado, por lo que ha sido ampliamente estudiado.

Materiales modificados: en esta clasificación se encuentran los materiales modificados con el fin de mejorar la conducción de energía eléctrica, para la modificación de los materiales recientemente se ha empleado los nanotubos de carbono (CNT) ya que la conductividad eléctrica, estabilidad química, biocompatibilidad, área de contacto son los principales criterios que se estudian en este tipo de materiales.

Materiales compuestos: en esta categoría se encuentran los materiales modificados junto con otro tipo de materiales como los polímeros conductores, el estudio de estos materiales se realiza con el fin de mejorar la propiedad electrolítica que pueden llegar a obtener, así como la compatibilidad con el microorganismo, los materiales compuestos pueden también incluir materiales carbonosos como los descritos previamente. Cuando los materiales se modifican recibiendo el nombre de compuestos las propiedades que se estudian son distintas, ya que estos electrodos poseen mejores cualidades catalíticas.

Materiales metálicos: uno de los materiales metálicos que más se utiliza es el acero inoxidable por sus propiedades no corrosivas, aun así, no es un material versátil o adaptable a todo tipo de sistemas (López *et al.*, 2006).

1.8.4 Cátodo.

Los materiales empleados para el ánodo pueden, en su mayoría, ser utilizados en el cátodo. Sin embargo, al encontrarse el microorganismo en la cámara anódica las condiciones de oxígeno son limitadas, no ocurre lo mismo en la cama catódica por lo que el catado puede ser: expuesto al aire, expuesto al aire en fase acuosa y bio-cátodo.

Ahora bien, para determinar el electrodo que mejor se ajuste a cierta configuración de CCM, los criterios son: alta resistencia mecánica, propiedades catalíticas, alta conductividad eléctrica e iónica

1.9 Tipos de Celdas de Combustible Microbiana.

Es posible destacar que existen diferentes arquitecturas de CCM, dentro de las cuales destacan las de doble cámara, cámara simple, apilada y de flujo ascendente.

Celdas de combustible microbiana de dos cámaras: este tipo de celdas se han utilizado he implementado a escala laboratorio y usualmente trabajan en modo batch y con un medio químico definido para la producción de energía. Las CCM de dos cámaras están compuestas por una cámara anódica y catódica que se encuentran conectadas por medio de un puente de intercambio iónico y en ocasiones puede ser reemplazado por un puente salino, permitiendo el paso de los iones a la cámara catódica y bloqueando la difusión de oxígeno en la cámara anódica, la configuración más común es la denominada tipo H (Guotao, et al., 2015).

Celdas de combustible microbiana de una cámara: el compartimiento de la CCM se denomina cámara anódica, la cámara catódica está expuesta directamente al aire, al igual que las CCM de dos cámaras el transporte de electrones se realiza por medio de una membrana de intercambio iónico, a comparación de las CCM de dos

cámaras esta configuración se considera en ventaja debido a costos menores de construcción ya que la cámara catódica en su configuración no necesita aireación siendo el oxígeno presente en el aire el aceptor final de electrones (Guotao, *et al.*, 2015).

Celdas de combustible microbiana con sistema de flujo ascendente: este tipo de CCM trabaja en modo de flujo continuo. El equipo se divide en dos secciones, donde una de las secciones será la cámara anódica y la otra sección la cámara catódica (Guotao *et al.*, 2015).

En este tipo de celdas, el ánodo se encuentra ubicado en el fondo y el cátodo en la parte superior de un contenedor en forma cilíndrica. Este diseño no tiene separación física y no hay problemas asociados a la transferencia de protones. La alimentación del sustrato se realiza desde abajo y pasa del ánodo al cátodo de forma ascendente (Nava *et al.*, 2018).

Celdas de combustible microbiana apilada: las CCM apiladas se definen como varias CCM conectadas en serie o en paralelo, por medio de este diseño se pueden conseguir mejores salidas de voltaje o corriente eléctrica, la conexión de varias CCM en paralelo generan mayor eficiencia que las que se encuentran conectadas en serie, debido a que la celda conectada en paralelo tiene una mayor corriente de cortocircuito, es decir, permite una velocidad de reacción bioelectroquímica mayor que en las celdas que están conectadas en serie. Sin embargo, la conexión de varias celdas, ya sea paralela o en serie implica costos elevados a causa de emplear varios electrolitos seguidos (Guotao, *et al.*, 2015).

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del experimento.

El experimento se llevó a cabo en el laboratorio de Biología General del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila.

2.2 Tipo de agua y lugar de colecta.

Para el trabajo se colectó agua residual municipal cruda proveniente de la Planta Tratadora de Aguas Residuales del Gran Bosque Urbano - Ejército Mexicano en la ciudad de Saltillo, Coahuila que cuenta con las características generales que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Características generales del aguas residuales colectada en la Planta Tratadora del Gran Bosque Urbano - Ejercito Mexicano.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES PROMEDIO
Temperatura	°C	20
pH	-	7.1
Grasas y aceites	mg/L	125
Solidos sedimentables	mg/L	5
Solidos suspendidos totales	mg/L	400
DBO total	mg/L	370
DBO soluble	mg/L	160
DQO total	mg/L	1070
Nitrógeno total	mg/L	75
Nitrógeno amoniacal	mg/L	40
Nitrógeno total Kjeldhal	mg/L	70
Fosforo total	mg/L	14
Fosforo inorgánico	mg/L	10
Arsénico	mg/L	0.03
Cadmio	mg/L	0.03
Cianuros	mg/L	0.01
Cobre	mg/L	0.10
Cromo	mg/L	0.10
Mercurio	mg/L	0.001
Níquel	mg/L	0.1
Plomo	mg/L	0.2
Zinc	mg/L	0.40
Coliformes fecales	NMP/100 ml	5x10 ⁷
Huevos de helminto	HH/L	3

2.3 Preparación de los materiales.

Se recortaron piezas de 4 cm² de espuma de poliuretano, lavando posteriormente este material con agua destilada y acetona con el fin de remover impurezas. Enseguida, las piezas fueron colocadas en una estufa de secado a una temperatura de 80 °C durante un lapso de una hora, o hasta llegar a peso constante. A continuación, se realizó un recubrimiento de las piezas de espuma de poliuretano (previamente lavadas) con grafito en aerosol (Dry Graphite Lube), aplicando 3 capas en cada cara del soporte (espuma PU), posteriormente se secó este material a temperatura ambiente. Por último, las piezas recubiertas fueron lavadas con agua destilada para remover el exceso de grafito.

Las barras de grafito como colectores de electrones, fueron pretratadas por dos métodos dependiendo su ubicación en la celda de combustible microbiana (colector anódico y cátodo). Previo al acondicionamiento, las barras de grafito fueron lijadas secuencialmente con papel lija de 400, 600 y 1200 micras grano, enjuagando en cada paso abundantemente con agua destilada.

- Colector anódico: los colectores de grafito fueron sumergidos secuencialmente durante 1 hora en soluciones de HCl 1M, agua desionizada, NaOH 1M, y agua desionizada. Por último, se secaron en un horno a 80 °C por 12 horas (Gao *et al.*, 2013).
- Cátodo: se colocó una barra de grafito en un vaso de precipitados de 1000 ml añadiendo una solución de ácido nítrico al 5 %. La mezcla fue hervida por 12 horas a una temperatura constante de 120 °C. El material fue lavado con agua destilada (agitanando por 15 minutos), y finalmente, se colocó en un horno de secado a 130 °C por 12 horas, almacenando el material hasta su uso (Erable *et al.*, 2009).

2.4 Construcción y operación de la CCM.

Se construyeron celdas de combustible microbianas de doble compartimento de un volumen aproximado de 2000 ml (1000 ml cada compartimento), agregando una barra de grafito previamente acondicionada en el compartimento catódico (cátodo) y 1000 ml de solución búfer de fosfatos (10 g/L NaHCO₃ y 8.5 g/L NaH₂PO₄) como

solución catolítica (oxigenando la solución de forma externa con una bomba de aire acoplada a un difusor). En el compartimento anódico se colocó una barra de grafito previamente pretratada insertada en la espuma de poliuretano recubierta con grafito en aerosol, y 1000 ml de agua residual municipal cruda (Saltillo, Coahuila) como sustrato. Se utilizó una membrana de intercambio catiónico pre-hidratada (NaCl 5%, 12 h) para separar los compartimentos (CMI-7000 marca International Membranes Inc.). El monitoreo de las celdas se llevó a cabo utilizando un multímetro digital (Fluke 289 - Trendcapture) con el cual se determinó el voltaje de cada celda 1 veces al día durante toda la reacción (30 días), empleando una resistencia externa de 1 K Ω para cerrar el circuito (Fig. 2). Se determinó la demanda química de oxígeno (DQO) de forma diaria.

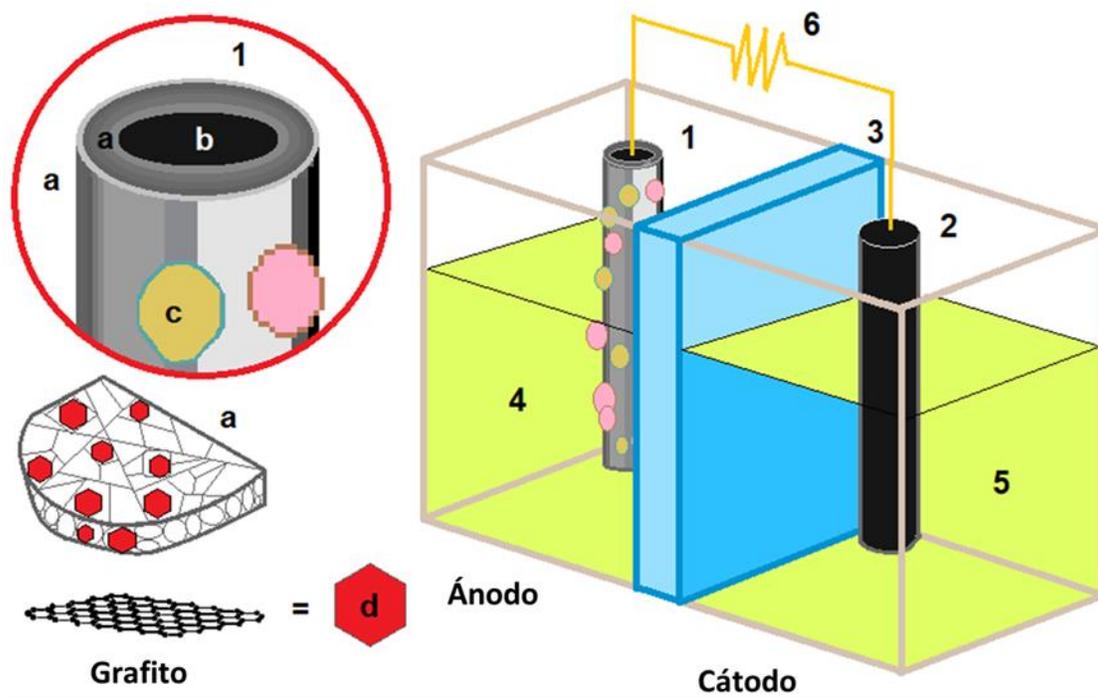


Figura 2. Diagrama de la CCM utilizada en los experimentos.

En la siguiente tabla se muestran los 3 tipos de tratamientos usados durante la fase experimental.

Tabla 3. Tipos de tratamientos usados durante el experimento.

Tratamiento 1	Espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol unida al circuito + barra de grafito libre
Tratamiento 2	Barra de grafito unida al circuito + espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol libre
Tratamiento 3	Barra de grafito unida a la espuma de poliuretano conectadas al circuito.

2.5 Determinación de materia orgánica en la celda de combustible microbiana.

La técnica para llevar a cabo la determinación de materia orgánica está basada en la Norma Mexicana NMX-AA-030-SCFI-2012.

2.5.1 Material y equipo.

El equipo y material usado para la determinación de la técnica fueron los siguientes: digester termorregulador HACH DRB/200, espectrofotómetro HACH DR/2010, centrifuga SOLBAT J600 y micropipetas LABMATE SOFT (1/5000) (100/1000) ml. Como material de laboratorio de usaron tubos HACH con tapón de rosca, frascos ámbar de 1 litro, matraces de aforación de 1 litro y como reactivos fueron el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$), Sulfato de mercurio ($HgSO_4$), Sulfato de plata (Ag_2SO_4) y biftalato de potasio ($C_8H_5KO_4$).

2.5.2 Procedimiento.

En este apartado se describe el procedimiento para la realización de la técnica anteriormente mencionada:

1. En un tubo Hach se añadieron 3.5 ml de la solución de ácido plata y 1.5 ml de la solución de dicromato de potasio.
2. Se agregaron 2.5 ml de la muestra problema y se cerraron bien con el tapón de rosca; fue necesario realizar un blanco de referencia (agua destilada).
3. Se agitó lentamente por inversión y se colocaron los tubos en el termodigestor durante 2 horas a 150°C.
4. Los tubos se sacaron y dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se leyó la absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm.
5. Se calculó la concentración de la DQO con la curva estándar.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentan los resultados más destacables obtenidos durante la realización de los experimentos.

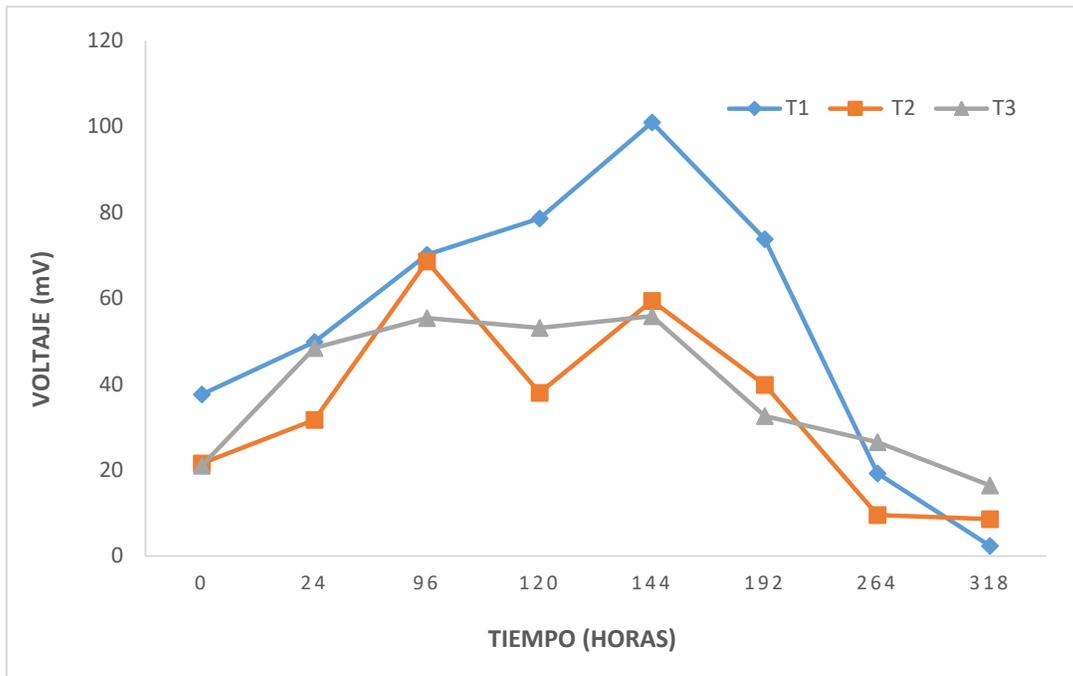


Figura 3. Cinética de generación de voltaje en CCM.

En la figura 3 se muestra el comportamiento de los tres sistemas empleados. Se puede observar que el sistema 1 (espuma de poliuretano con la barra de grafito libre en el medio), fue el que generó mayor voltaje alcanzando valores de 100 mV, mientras que el sistema dos (barra de grafito con la espuma de poliuretano suelta en el medio) generó un voltaje máximo de 68 mV y el sistema tres (barra de grafito unida a la espuma de poliuretano) generó un máximo de 55 mV. Cabe mencionar que el incremento en la energía eléctrica producida se debe a la degradación de materia orgánica, que al oxidarse libera electrones al medio, mismos que son recuperados por los ánodos sintetizados y redirigidos hacia el exterior del sistema. De igual manera, en esta figura se puede apreciar que la CCM no deja de producir corriente eléctrica sino hasta las 260 horas transcurridas.

De acuerdo con los datos obtenidos, el sistema de la barra de grafito unida al circuito más la espuma de poliuretano libre, mostró el mayor valor de voltaje y densidad de

potencia generados. A continuación, se muestra una tabla donde se resumen los resultados obtenidos en este tratamiento.

Tabla 4. Resultados obtenidos del tratamiento dos.

TRATAMIENTO	VOLTAJE	DENSIDAD DE POTENCIA	ERDQO
2			
Barra de grafito + EPU libre	100 mV	10.19 mW / m ²	4.46

Esto se debe a que el grafito es un material que se caracteriza por tener una alta conductividad eléctrica y alta biocompatibilidad, mejorando la interacción bacteria-soporte y facilitando así la captura y redirección de los electrones.

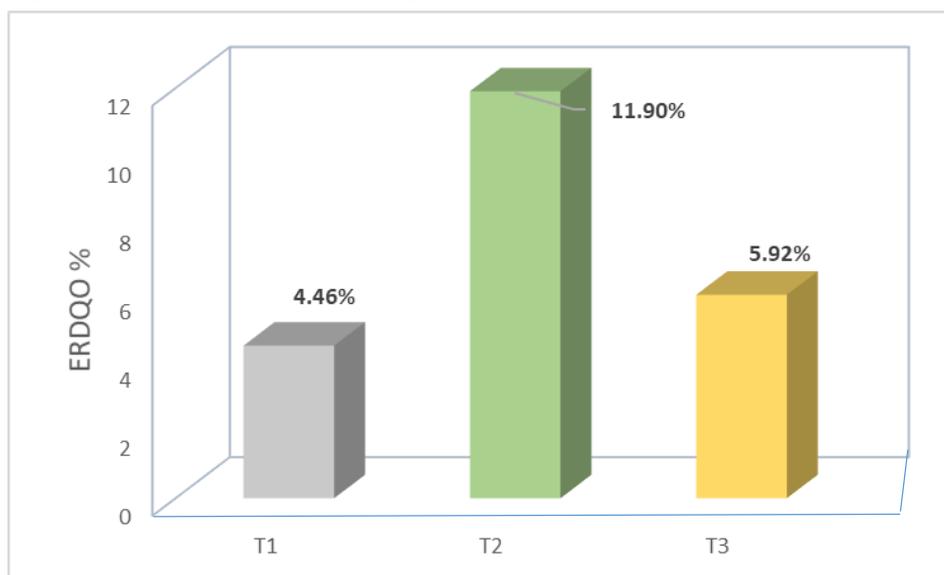


Figura 4. Eficiencia de remoción de Demanda Química de Oxígeno.

Por otra parte, en figura 4 se representa porcentualmente la comparación entre los sistemas en su desempeño en la remoción de materia orgánica. Se puede observar que el sistema dos (barra de grafito con la espuma de poliuretano libre en el medio)

fue la que obtuvo mayor valor con un 13.90%, mientras que en el sistema tres se observó un 5.95% y el sistema unos solo 4.46%.

Los resultados de la evaluación del desempeño bioelectroquímico revelan que el uso de grafito en diferentes presentaciones, al aplicarse como material anódico, genera una mayor adhesión de microorganismos eléctricamente activos y, por lo tanto, mayor remoción de materia orgánica en aguas residuales municipales.

Los valores obtenidos durante el experimento resultaron ser superiores a lo observado por lo reportado por Jiménez Escamilla (2017), quien utilizó una tela de grafito como ánodo en lugar de barra y espuma de poliuretano.

Y a su vez muy inferiores que los datos obtenidos por Germán Buitrón y Jaime Pérez (2013) que usaron electrodo de carbón rígido, obteniendo estos resultados probablemente por la mayor afinidad del carbón rígido a la barra de grafito.

Es importante mencionar que es probable que los datos obtenidos durante el experimento se vieran afectados por las lluvias de la temporada en la que fue recolectada el agua residual con la que se trabajó, trayendo como consecuencia una posible dilución de todos sus componentes. De igual manera, es posible que la actividad microbiana se viera afectada por las bajas temperaturas del área en la que se llevó a cabo el experimento, como es mencionado por Espinosa- Rodríguez (2012).

En la tabla 5 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con lo reportado por otros autores, observando valores similares en algunos casos y muy inferiores en comparación a otros.

Tabla 5. Comparación de resultados con lo reportado por otros autores.

Diseño de la celda	Ánodo	Cátodo	Sustrato	Membrana	Densidad de potencia máxima alcanzada	Referencia
Celda de combustible microbiana tipo PEM	Carbón granular en bolsas de acero inoxidable	Tela de carbón marca Electrochem Inc. Cubiertas con tinta de carbón	Agua residual sintética	Nafion 137	325 y 97 mWm ⁻³	Domínguez-Maldonado <i>et al.</i> , (2014)
Doble compartimiento	Tela de grafito	Placa de acero inoxidable	Agua residual sintética	Naifon 137	0.02 mW/m ²	Jiménez Escamilla <i>et al.</i> , (2017)
Doble compartimiento.	Barras de grafito	Barras de grafito	Lodos de planta de tratamiento de agua residual	Puente salino	0.557 mW/m ²	Dolly M, <i>et al.</i> , (2015)
Tipo H	Grafito Toray tipo S	Electrodo de carbón rígido	Agua residual campus UNAM	Sin Membrana	408 mW/m ²	Buitrón G <i>et al.</i> , (2001)
De doble compartimiento (PEM)	Consortio microbiano mixto	Consortio microbiano mixto	Agua residual sintética	Nafion 137	336 mW/m ²	Liliana álzate <i>et al.</i> , (2008)
Doble compartimiento	Electrodos de platino	Electrodos de platino	Agua residual del procesamiento del café	FUMASEP F-14100	89 mW/ m ²	Cárdenas <i>et al.</i> , (2002)

CONCLUSIÓN

Al analizar el comportamiento electroquímico de la barra de grafito y la espuma de poliuretano cubierta con grafito en aerosol, se comprobó que, en el caso de ese experimento, no funcionaron adecuadamente las dos en unión a un circuito, siendo la barra de grafito conectada al circuito y la espuma libre en el medio, lo que mostraría mejores resultados, probando que los microorganismos altamente activos se adhieren mejor a la barra de grafito.

Además de obtener valores medios-bajos de densidad de potencial al hacer la evaluación durante el desarrollo del proyecto.

El diseño de celda de doble cámara a escala laboratorio, es un modelo eficiente respecto a la generación de voltaje, la remoción orgánica fue baja, en el caso de este experimento con el agua residual municipal. Debido a la variación de la composición química de las aguas residuales municipales, sería conveniente repetir más ciclos de trabajo con la celda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, MI (2002). Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación. EDITAR.
- Aguilar-González, M., Buitrón, G., Shimada-Miyasaka, A., Mora-Izaguirre, O., & Engormix, C. (s/f). ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS BIOELECTROQUÍMICOS: FACTIBILIDAD DE SU USO PARA AUMENTAR LA PRODUCCIÓN RUMINAL DE PROPIONATO. Com.ar. Recuperado el 28 de septiembre de https://www.produccionanimal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/173-sistemas_bioelectroquimicos.pdf.
- Alzate-Gaviria, Liliana, Fuentes-Albarrán, Carmen, Álvarez-Gallegos, Alberto, & Sebastián, J. (2008). GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA TIPO PEM. *Interciencia*, 33(7), 510-517. Recuperado en 01 de octubre de 2022, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700008&lng=es&tlng=es.
- Arnáiz, C., & Lsac Y Juman Lebrato, L. (s/f). Tratamiento de aguas residuales biológicas . Usal.es. Recuperado el 19 de octubre de 2022, de <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/edar.pdf>.
- Buitrón G, Pérez J. Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos. *TIP Rev Esp Cienc Quim Biol*. 2013;14 (1):5-13.
- Cárdenas, D., Villegas, J. R., Solís, C., Sanabria-Chinchilla, J., Uribe, L., & Fuentes-Schweizer, P. (2022). Evaluación del desempeño de una celda de combustible microbiana con electrodo de grafito modificado para el tratamiento de agua residual del procesamiento del café. *Revista Colombiana de Química*, 51(1),40-47. Epub October 26, 2022.<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v51n1.101385>.
- Calijuri, M., Xavier, R.K., De Brito, T., Cesca, B., Oliveira, E.H. (2009). Tratamiento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/wetlands

construídas de flujo horizontal: eficiencia e estabilidad de remoción de materia orgánica, sólidos, nutrientes e coliformes. Eng Sanit Ambient., 14(3),421-430.

- Castillo Cotrina, Daladier Miguel; Tito Vargas, Carlos Francisco(2017).Producción de bioelectricidad en celdas de combustible microbiana utilizando *Acidithiobacillus ferrooxidans*.
- Comisión Nacional del Agua. (s/f). Agua en el Mundo . gob.mx. Recuperado el 12 de octubre de 2022, de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo>.
- Comisión Nacional del Agua. (s/f). Situación de los Recursos Hídricos. gob.mx. Recuperado el 18 de enero de 2023, de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>.
- Condorchem Envitech. Recuperado el 13 de octubre de 2022, de <https://condorchem.com/es/tratamiento-de-aguas-residuales-industriales/>.
- de Estadística e Información Ambiental, D.-DG (s/f). Informe del Medio Ambiente . Gob.mx:8443. Recuperado el 12 de octubre de 2022, de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>.
- de iones metálicos y aplicaciones electroquímicas. Universitat Autònoma de Barcelona, 2006. p.
- Espinosa-Rodríguez, M. A., Flores- Álamo, N., Esparza-Soto, M., & Fall, C.. (2012). Efecto de la temperatura en la tasa de crecimiento y decaimiento heterotrófico en el rango de 20-32°C en un proceso de lodos activados. Revista mexicana de ingeniería química, 13(2), 309-321. Recuperado en 13 de enero de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200010&lng=es&tlng=es.
- Domínguez-Maldonado, J.A., García-Rodríguez, O., Aguilar-Vega, M., Smit, M., & Alzate-Gaviria, L.. (2014).
- Gamboa, O. (2017, 27 de marzo). ¿Sabemos que existe agua en México? Org.mx; Consejo Consultivo del Agua. <https://www.aguas.org.mx/sitio/blog/noticias/item/1048-sabemos-cuanta-agua-existe-en-mexico.html>.

- Gómez Molina, LL, & Merchán Bermúdez, AM (2016). Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas . <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/1305>.
- Jiménez C., B.; J.C. Durán, J. M. Méndez C. Calidad. En: Jiménez C., M.L. Torregrosa y L. Aboites (Eds.). El Agua en México: cauces y encauces. AMC-Conagua. México. 2010.
- Jiménez-Escamilla, Maxvell Gustavo, Garibay-Orijel, Claudio, & Borja-Salin, Manuel Antonio. (2018). MODELO BIOQUÍMICAMENTE ESTRUCTURADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA. Revista internacional de contaminación ambiental, 34(2), 331-345. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.13>.
- MACANÁS DE BENITO, Jorge. Desarrollo de nuevas membranas compuestas para la separación.
- Mara, D.D. (2004). Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. Earthscan, London, Sterling, VA, p 310.
- Martínez Valdés, Yaset, & Villalejo García, Víctor Michel. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad actual. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* , 39 (1), 58-72. Recuperado en 21 de septiembre de 2022, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000100005&lng=es&tlng=en.
- Metcalf, E. E. y Eddy, H. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. New York: McGraw.
- Moletta, R. (1993). La digestion anaérobic: du plus petit au plus grand. Biofutur 1, 16-25.
- Nava-Diguero, P., & Castillo-Juárez, &. (s/f). Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad: Agua, energía y contaminación Ecorfan.org. Recuperado el 19 de octubre de 2022, de https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_a_Innovativa/vol2num5/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V2_N5_3.pdf.

- Pant, D., A. Singh, G. Van Bogaert, S. I. Olsen, P. S. Nigam, L. Diels, and K. Vanbroekhoven. 2012. Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy production and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters.
- Pant, D., G. Van Bogaert, L. Diels, and K. Vanbroekhoven. 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells(MFCs) for sustainable energy production. *Bioresour. Technol.* 101: 1533-1543.
- Peguin, S., P. Delorme, G. Goma, and P. Soucaille. 1994. Enhanced alcohol yields in batch cultures of *Clostridium acetobutylicum* using a three-electrode potentiometric system with methyl viologen as electron carrier. *Biotechnol. Lett.* 16: 269-274.
- Plasencia-Verde, Claudia C., Grabiell-Rios, Katherine S., Luque, José A., & Best, Ivan K.. (2021). Evaluación del potencial energético de residuos de cacao (*Theobroma cacao* L.) por medio de celdas de combustible microbiano (CCM). *Información tecnológica*, 32(4), 89-98.
- Ramalho, R. (2003). Introduction to wastewater treatment processes (second edition). San Diego: Academic Press.
- Ramos Chalen, S. C., & Salas Rendón, F. E. (2016). Tesis. Recuperado a partir de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/18049>.
- Rojas, N., Sánchez, A., Matiz, A., Salcedo, J.C., Carrascal, A.K. (2010). Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y *Escherichia coli* presentes en agua residual doméstica, empleada para riego. *Universitas Scientiarum*, 15(2), 139-149.
- Revelo, Dolly M, Hurtado, Nelson H, & Ruiz, Jaime O. (2013). CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (CCMS): UN RETO PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>.
- Revelo, Dolly M, Hurtado, Nelson H, Ruiz, Jaime O, & López, Stefanía. (2015). Uso de Microorganismos Nativos en la Remoción Simultánea de Materia Orgánica y Cr(VI) en una Celda de Combustible Microbiana de Biocátodo (CCM).

- Información tecnológica, 26(6), 77-88. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000600010>.
- Romero, J. (2008). Tratamiento de aguas residuales teorías y principios de diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
 - Rittmann B, McCarty P. 2001. Principios y aplicaciones de la biotecnología ambiental. Columbus, Ohio McGraw-hill . (s/f). Sciepub.com. Recuperado el 27 de enero de 2023, de <http://www.sciepub.com/reference/33452>.
 - RSC Adv. 2: 1248-1263. Park, D. H., and J. G. Zeikus. 1999. Utilization of electrically reduced neutral red by *Actinobacillus succinogenes*: physiological function of neutral red in membrane-driven fumarate reduction and energy conservation. *J. Bacteriol.* 181: 2403- 2410.
 - S.A.S., C. D. N. F. Y. (2020, 5 mayo). Las aguas residuales de origen agrícola y ganadero. TÉRMINOS Y DEFINICIONES. <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/las-aguas-residuales-de-origen-agricola-y-ganadero/>.
 - Silva-Leal, J., Bedoya-Rios, D., & Torres-Lozada, P. (2013). Efecto del secado térmico y el tratamiento alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química nueva* , 36 (2), 207–214. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422013000200002>.
 - Sun, G., Thygesen, A., & Meyer, A. S. (2015). Acetate is a superior substrate for microbial fuel cell initiation preceding bioethanol effluent utilization. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(13), 4905–4915. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6513-5>.
 - (S/f). Edu.ec. Recuperado el 12 de octubre de 2022, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6087/5/CAPITULO%202.pdf> (s/f). *El Medio Ambiente en México 2013-2014*, Gob.mx:8443. Recuperado el 12 de octubre de 2022, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html.

- (S/f). Usal.es. Recuperado el 18 de octubre de 2022, de <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>.
- (S/fb). Cloudfront.net. Recuperado el 18 de octubre de 2022, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57123734/GESTION_INTEGRAL_DEL_T RATAMIENTO_AR-with-coverpage, 259.
- Tipos de Aguas Residuales, ¿cuántos existen y qué contienen? (s/f). Com.mx. Recuperado el 20 de enero de 2023, de <https://ecointell.com.mx/plantas-de-tratamiento-de-agua/tipos-de-aguas-residuales-cuantos-existen-y-que-contienen>.