



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

**“EVALUACIÓN DE GRAFENO Y MAGNETITA COMO
MEMBRANAS DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES EN
CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”**

Trabajo de Titulación:

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTOR: MIGUEL ANGEL PÉREZ BRAVO

DIRECTORA: Dra. MAGDY MILENY ECHEVERRÍA GUADALUPE

Riobamba - Ecuador

2019

© 2019, Miguel Ángel Pérez Bravo.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

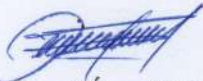
El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de Titulación: Tipo proyecto de Investigación **“EVALUACIÓN DE GRAFENO Y MAGNETITA COMO MEMBRANAS DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”**, de responsabilidad del señor Miguel Ángel Pérez Bravo, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2019-10-02
Dra. Magdy Mileny Echeverría Guadalupe DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2019-10-02
Dr. Robert Alcides Cazar Ramírez MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2019-10-02

Yo, Miguel Ángel Pérez Bravo, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 3 de septiembre de 2019



Miguel Ángel Pérez Bravo

060406221-6

DEDICATORIA

A todas las personas que me ayudaron a lo largo de esta etapa estudiantil, especialmente a mis padres, mi hermana y mis abuelos por ser el pilar fundamental, a mis amigos por su apoyo incondicional y a mis profesores por su guianza académica.

Miguel

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por darme la oportunidad de obtener una profesión y ser una ayuda para la sociedad, en especial al Grupo de Investigación, Desarrollo para el Ambiente y Cambio Climático (GIDAC) por su asesoría. A mi familia por su apoyo y comprensión.

Miguel

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
Justificación	2
OBJETIVOS.....	3
General.....	3
Específicos.....	3
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Marco Conceptual.....	5
<i>1.2.1. Bioelectricidad</i>	<i>5</i>
<i>1.2.2. Celdas de Combustible Microbiano (CCMs)</i>	<i>6</i>
<i>1.2.3. Factores intervinientes en la producción de bioelectricidad</i>	<i>7</i>
<i>1.2.3.1. Configuración de Celdas de Combustible Microbiano</i>	<i>7</i>
<i>1.2.3.2. Materiales</i>	<i>11</i>
<i>1.2.3.3. Efectos del pH</i>	<i>12</i>
<i>1.2.3.4. Efectos de la Temperatura.....</i>	<i>12</i>
<i>1.2.3.5. Sustratos e inóculos.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.3.6. Membranas.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.3.7. Tipos de membranas.....</i>	<i>15</i>
1.2.4. Grafeno	16
1.2.5. Magnetita	17
CAPÍTULO II	
2. METODOLOGÍA	19
<i>2.1.1. Georreferenciación del sitio de muestreo</i>	<i>20</i>
<i>2.1.2. Condiciones climáticas</i>	<i>20</i>

2.1.3.	<i>Procedimiento de muestreo</i>	20
2.1.4.	<i>Características del suelo</i>	20
2.1.5.	<i>Análisis complementario de sustratos</i>	21
2.1.5.1.	<i>Porcentaje de Humedad</i>	21
2.2.	Configuración de CCM's	22
2.2.1.	<i>Sustratos</i>	22
2.2.2.	<i>Preparación de la Cámara Anódica</i>	22
2.2.3.	<i>Sistema de adquisición de datos</i>	23
2.3.	Preparación de CCM's para el monitoreo	23
2.3.1.	<i>Esterilización</i>	23
2.3.2.	<i>Pre-tratamiento de la membrana</i>	23
2.3.3.	<i>Síntesis de Magnetita</i>	24
2.3.4.	<i>Síntesis de Grafeno</i>	25
2.3.5.	<i>Análisis de sustratos</i>	25
2.3.6.	<i>Diseño Experimental</i>	25
2.4.	Eficiencia	26
2.5.	Lugar Experimental	27
2.5.1.	<i>Materiales experimentales</i>	27
2.5.2.	<i>Materiales, reactivos y equipos de Laboratorio</i>	28
2.6.	Planteamiento de Hipótesis	29
2.6.1.	<i>Hipótesis Textual</i>	29
2.6.2.	<i>Hipótesis Estadísticas</i>	29
2.6.2.1.	<i>Hipótesis Nula</i>	29
2.6.2.2.	<i>Hipótesis Alternativa</i>	29
2.6.3.	<i>Variables</i>	30
2.6.3.1.	<i>Independiente</i>	30
2.6.3.2.	<i>Dependientes</i>	30
2.6.3.3.	<i>Intervinientes</i>	30

CAPITULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
3.1.	Análisis físico-químico del inóculo usado (páramo de suelo alto andino)	31
3.1.1.	<i>Parámetros complementarios</i>	32
3.2.	Parámetros meteorológicos de la zona de muestreo	32

3.3.	Materiales adicionales a la Membrana de la Cámara Anódica	33
3.3.1.	<i>Grafeno</i>	33
3.3.2.	<i>Magnetita.....</i>	34
3.4.	Valores De Voltaje Generados	35
3.5.	Intensidad de corriente generada en las celdas	38
3.6.	Densidad de Potencia	40
3.6.1.	<i>Área de la membrana de intercambio.....</i>	40
3.6.2.	<i>Cálculo de Densidad de Potencia</i>	40
3.7.	Análisis Elemental de sustratos empleados	42
3.8.	pH.....	43
3.9.	Comprobación de Hipótesis.....	43
3.9.1.	<i>Pruebas de Normalidad.....</i>	43
3.9.2.	<i>Comparación de tratamientos</i>	45
3.9.3.	<i>Comparación de tratamientos en pares.....</i>	46
3.9.3.1.	<i>Relación entre grafeno y magnetita</i>	46
3.9.3.2.	<i>Relación entre grafeno y blanco.....</i>	47
3.9.3.3.	<i>Relación entre grafeno y blanco con imán</i>	49
3.9.3.4.	<i>Relación entre blanco y blanco con imán.....</i>	50
3.9.3.5.	<i>Relación entre magnetita y blanco con imán.....</i>	52
3.9.3.6.	<i>Relación entre magnetita y blanco</i>	54
3.10.	Discusión	55
 CONCLUSIONES.....		59
RECOMENDACIONES.....		60
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Membranas de intercambio usadas en CCMs.....	11
Tabla 1-2:	Parámetros analizados en la muestra de suelo de páramo..	21
Tabla 2-2:	Diseño Experimental	26
Tabla 3-2:	Materiales experimentales utilizados.....	27
Tabla 4-2:	Materiales, reactivos y equipos de laboratorio	28
Tabla 1-3:	Análisis de suelo.....	31
Tabla 2-3:	Conductividad y % de Humedad.....	32
Tabla 3-3:	Parámetros Meteorológicos	32
Tabla 4-3:	Correspondencia de Celdas y tratamientos.....	35
Tabla 5-3:	Análisis Elemental de Sustratos	42
Tabla 6-3:	pH de CCM's al final del monitoreo	43
Tabla 7-3:	Pruebas de Normalidad.....	43
Tabla 8-3:	Prueba de Kruskal-Wallis.....	45
Tabla 9-3:	Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitman para Grafeno y Magnetita.....	46
Tabla 10-3:	Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitman para Grafeno y Blanco.....	48
Tabla 11-3:	Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitman para Grafeno y Blanco con imán.....	50
Tabla 12-3:	Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney para blanco y blanco con imán	51
Tabla 13-3:	Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney para magnetita y blanco con imán	53
Tabla 14-3:	Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney para magnetita y blanco.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema del circuito de una CCM.....	7
Figura 2-1. CCMs de configuración simple.....	8
Figura 3-1. CCM de flujo ascendente	10
Figura 4-1. CCMs apiladas	10
Figura 5-1. CCMs de configuración tubular	10
Figura 1-2. Lugar de muestreo, sector Villa La Unión	19
Figura 1-3. Presencia de Grafeno en la membrana visto en MEB	33
Figura 2-3. Magnetita vista en MEB.....	34

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3.	Cromatograma de Grafeno	33
Gráfico 2-3.	Cromatograma de Magnetita	35
Gráfico 3-3.	Voltaje en función del tiempo.....	36
Gráfico 4-3.	Intensidad de corriente en función del Tiempo	39
Gráfico 5-3.	Densidad de Potencia.....	41
Gráfico 6-3.	Representación de la normalidad de CCMs con magnetita	44
Gráfico 7-3.	Representación de la normalidad de CCMs blancos.....	44
Gráfico 8-3.	Representación de la normalidad de CCMs blancos con imán	45
Gráfico 9-3.	Voltaje promedio generado por los materiales de la membrana.....	47
Gráfico 10-3.	Comparación de medias de tratamientos	49
Gráfico 11-3.	Comparación de medias de tratamientos	52
Gráfico 12-3.	Comparación de medias de tratamientos	53
Gráfico 13-3.	Voltaje en función de la degradación.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Valores de diferencia de potencial generados por las celdas medido en Voltios (V).

ANEXO B: Intensidad de corriente de CCMs medida en amperios (A)

ANEXO C: Densidad de Potencia en CCMs medidas en mW/m^2

ANEXO D: Evidencias fotográficas del desarrollo del trabajo.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CA	Cámara Anódica
CC	Cámara Catódica
CCMs	Celdas de Combustible Microbiano
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
HCL	Ácido Clorhídrico
MB	Membrana Bipolar
MEB	Microscopio Electrónico
MIA	Membrana de Intercambio Anódico
MIC	Membrana de Intercambio Catódico
MIP	Membrana de Intercambio de Protones
RGO	Óxido de Grafeno Reducido

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo evaluar grafeno y magnetita como membranas de intercambio de electrones en Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) para mejorar la estabilidad de voltaje y eficiencia en la generación de bioelectricidad, se utilizó como inóculo suelo de páramo alto andino del Cantón Colta, mediante un sistema de tres conglomerados para obtener una muestra compuesta, en esta fueron analizadas sus características físico-químicas. El sustrato empleado una mezcla 50:50 de frutas (naranja: *Citrus sinensis*, banano: *Musa acuminata L.* y manzana: *Pyrus malus L.*) y vegetales (arveja: *Pisum sativum L.*, haba: *Vicia faba L.*, zapallo: *Cucurbita máxima Duchesne*), del cual se analizó Carbono, Nitrógeno, Hidrógeno y Azufre (CNHS); la membrana de grafeno se obtuvo mediante exfoliación directa de óxido de grafito, previamente tratado en baño ultrasónico, sobre un tejido de fibra de carbono, simultáneamente la magnetita se sintetizó a partir de cloruro férrico y cloruro ferroso. El voltaje generado por las CCMs fue monitoreado durante quince días consecutivos, posteriormente se estimó la eficiencia de los materiales usados como membranas a través de una comparación de densidad de potencia y la degradación de CHNS. El voltaje promedio obtenido por celdas con grafeno fue 131mV, su densidad de potencia de 9,17mW/m² y una degradación del sustrato de 8.60% (N), 35.29% (C), 24.49% (H) y 12,16% (S), mientras que celdas con magnetita consiguieron una degradación de 6.44% (N), 24.05% (C), 19.02% (H) y 11,35% (S) , un voltaje de 14mV y una densidad de potencia de 0,22 mW/m², por lo que con un nivel de confianza del 95% y suficiente evidencia estadística la membrana de grafeno tiene mayor rendimiento con una densidad de potencia 42 veces mayor en relación a la magnetita, para nuevas investigaciones es recomendable evaluar otras combinaciones de materiales los cuales benefician la aplicabilidad de las CCMs a gran escala.

Palabras Clave: <BIOTECNOLOGÍA>, <BIOELECTRICIDAD>, <CELDS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS (CCMs)>, <MEMBRANAS DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES>, <GRAFENO>, <MAGNETITA>, <DENSIDAD DE POTENCIA>, <DEGRADACIÓN>

ESPOCH - DBRAI
PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS
BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL



18 SEP 2018

REVISIÓN DE RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Pcr: 18 Hora: 09:37

ABSTRACT

This work aims to evaluate graphene and magnetite as electron exchange membranes in Microbial Fuel Cells (MFCs) to improve voltage stability and efficiency in the generation of bioelectricity, an Andean high moor soil of Colta Canton was used as inoculum, through a system of three clusters to obtain a composite sample, in this its physical-chemical characteristics were analyzed. The substrate used a 50:50 mixture of fruits (orange: *Citrus sinensis*, banana: *Musa acuminata L.* and apple: *Pyrus malus L.*) and vegetables (pea: *Pisum sativum L.*, bean: *Vicia faba L.*, squash: *Cucurbita Duchesne maximum*), of which Carbon, Nitrogen, Hydrogen and Sulfur (CNHS) was analyzed; The graphene membrane was obtained by direct exfoliation of graphite oxide, previously treated in an ultrasonic bath, on a carbon fiber fabric, simultaneously the magnetite was synthesized from ferric chloride and ferrous chloride. The voltage generated by the MFCs was monitored for fifteen consecutive days, subsequently the efficiency of the materials used as membranes was estimated through a comparison of power density and CHNS degradation. The average voltage obtained by graphene cells was 131mV, its power density of 9.17mW / m² and a substrate degradation of 8.60% (N), 35.29% (C), 24.49% (H) and 12.16% (S), while magnetite cells achieved a degradation of 6.44% (N), 24.05% (C), 19.02% (H) and 11.35% (S), a voltage of 14mV and a power density of 0,22 mW / m², so with a 95% confidence level and sufficient statistical evidence the graphene membrane has a higher performance with a power density 42 times higher in relation to magnetite, for new research it is advisable to evaluate other combinations of materials which benefit the applicability of large-scale MFCs.

Keywords: <BIOTECHNOLOGY>, <BIOELECTRICITY>, <MICROBIAL FUEL CELLS (MFCs)>, <ELECTRON EXCHANGE MEMBRANES>, <GRAPHENE>, <MAGNETITE>, <POWER DENSITY>, <DEGRADATION>



INTRODUCCIÓN

En la actualidad la mayor fuente de energía es el uso de combustibles fósiles, estos por sus procesos de extracción y combustión ocasionan fuertes impactos ambientales. La extracción conlleva la remoción de especies de flora y fauna provocando pérdidas de ecosistemas, mientras que la refinación y su combustión genera emisiones gaseosas, metales pesados, material particulado que en su conjunto son los causantes de la degradación ambiental del planeta.

De acuerdo al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, en el Ecuador en 2016 se consumieron 1185 millones de galones de gasolina y 1993 millones de galones de diesel oil, siendo estas los derivados de petróleo más empleados. Por ello, las celdas de combustible microbiano (CCMs) han generado nuevas expectativas, como métodos de obtención de energías limpias. Estas se plantean además como una alternativa viable a solucionar grandes conflictos ambientales y sociales vigentes tales como la polución presente en cuerpos hídricos y la falta de acceso a energías limpias, se puede brindar una solución conjunta a lo descrito en base a un correcto desarrollo de celdas. Por ello CCMs se han utilizado en muchos campos, tales como tratamiento de aguas residuales y la recuperación de suelos, y biosensores, la salida de baja potencia de CCMs ha limitado su aplicación (Jiang et al., 2016, p.2), estas no generan voltajes uniformes y constantes a lo largo del tiempo, por lo tanto, presentan variabilidad en su generación. Según menciona (Park & Ren, 2011a, p.1) entre las posibles causas de variación se pueden destacar la composición de las celdas, pérdida de electrones, la comunidad bacteriana y cambios en las condiciones ambientales.(Park & Ren, 2011b, p.2)

En estudios antes realizados, no se consiguió una estabilidad en la producción de bioelectricidad, ocasionado al decaimiento microbiano a lo largo del tiempo. La caída final de voltaje podría deberse a tres razones: el desgaste del material utilizado como electrodo afectando a la captación de electrones en la cámara anódica (CA), al mismo tiempo a las reacciones que se llevan a cabo en la cámara catódica (CC); y, la insuficiencia nutricional provocando competencia, antagonismo y nueva selección en el consorcio bacteriano de la CA que dependiendo de su resistencia al stress nutricional pudo afectar al desempeño en la producción bioeléctrica en las celdas de combustibles microbianas (CCMs) (Logroño et al, 2015, p.2).

Justificación

La búsqueda de una alternativa de generación de energía limpia y sostenible es un paso predominante para el futuro, además esto de la mano con la conservación de recursos y el aprovechamiento de residuos. Es por ello que existe la importancia de desarrollar investigaciones en las que se potencie estas alternativas. Desde años atrás, este tipo de estudios han venido causando gran impacto por sus aportes.

Las celdas de combustible microbiano (CCMs) son compartimentos electroquímicos que usan microorganismos como catalizadores para producir electricidad a partir de las transformaciones redox de materia orgánica y sustratos inorgánicos presentes en la biomasa o aguas residuales (Logan et al., 2006, p.1). Se han elaborado importantes artículos investigativos en donde se detallan la estructura básica de este tipo de celdas, enfocándose en sus principios de funcionamiento y su evolución al paso del tiempo, además de resaltar los rangos del voltaje obtenidos en una celda de composición básica (Rabaey & Verstraete, 2005, p.1). Su principio de funcionamiento es sencillo en esencia, se necesita una cámara donde sean liberados los electrones y otra donde sean captados e intermedia a estas dos, una membrana como separador.

Las celdas de combustible microbiano por sus materiales y la composición de las mismas, tienen valores fluctuantes de voltaje, mostrando una etapa de adaptación hasta alcanzar el máximo voltaje, pero decaen al pasar el tiempo, por ende, es necesario la búsqueda de alternativas a materiales y diseños en donde se pueda mantener a lo largo del tiempo la estabilidad de voltaje. De acuerdo a (Nakamura et al., 2009, p.1) , los nanomateriales, tales como óxido de grafeno reducido (RGO), y magnetita podrían servir como redes conductoras adicionales que junto a biopelículas electroactivas dopadas con estos materiales exhiben alta eficiencia en la transferencia de electrones. Por lo tanto, este estudio se enfoca en la búsqueda de sustratos y materiales óptimos para la generación estable de voltaje a lo largo del tiempo, en el interior de celdas de combustible microbiano (CCMs).

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a través del Grupo de Investigación para el Desarrollo, Ambiente y Cambio Climático (GIDAC-CEAA) ha ejecutado investigaciones de importante avance en la generación de bioelectricidad, es por ello que esta investigación cuenta con el apoyo de este grupo, además de la disponibilidad de participación de múltiples profesionales competentes en el área. Este trabajo de titulación es pertinente a la línea de investigación de Protección Ambiental y a la sublínea de Biotecnología de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias y la Carrera de Ingeniería en Biotecnología Ambiental, por lo tanto, se justifica la realización del mismo.

OBJETIVOS

General

- Evaluar el grafeno y magnetita como membranas de intercambio de electrones en Celdas de Combustible Microbianas para mejorar la estabilidad de voltaje y eficiencia en la generación de bioelectricidad con suelos de páramo alto andino.

Específicos

- Monitorear celdas de combustible microbianas de configuración simple y cátodos parcialmente expuestos al aire.
- Comparar eficiencia de materiales necesarios para una transferencia de electrones eficiente dentro del bioánodo.
- Evaluar la cantidad de voltaje producido en relación a un rendimiento electroquímico de flujo de electrones.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

Desde hace varios años atrás se ha despertado el estudio de nuevas alternativas para la generación sostenible de electricidad, es de ahí que parten investigaciones usando Celdas de Combustible Microbiano (CCMs). Dado el avance de estudios anteriores y con el objetivo de lograr mayor conocimiento acerca del comportamiento de los microorganismos en el interior de las celdas, se han efectuado investigaciones de generación de bioelectricidad a partir de cultivos puros usando *Pseudomonas aeruginosa* en contraste con consorcios bacterianos de la misma especie junto con *Bacillus tequilensis*, demostrando el efecto que causan las interacciones entre microorganismos (Deepika *et al.*, 2013, p.2)

En búsqueda del incremento del rendimiento de CCMs, se han realizado estudios que han llevado a nuevas configuraciones de celdas en donde se ha modificado su estructura o se han añadido materiales que por sus características logran una mayor captación de electrones, tal es el caso de la magnetita que al formar parte del tejido de carbono en la cámara anódica logró mejorar el desempeño de la celda, evitando pérdida de electrones (P. Liu *et al.*, 2018, p.6). Por otro lado, existen escasas técnicas para mantener el voltaje generado en CCMs a lo largo del tiempo, el uso del grafeno provee una alternativa viable para este estudio debido a que este ha podido aumentar la potencia estacionaria debido a su conductividad eléctrica mejorada, así como también el área del ánodo y mayor cantidad de microorganismos adheridos a los ánodos (Yu, Wang, & Ma, 2018, p.4). Los materiales recientemente utilizados como electrodos, ya sea para aceptores o donantes de electrones e igual forma como soporte para la implantación de microorganismos, son a base de carbono tales como el grafeno, grafito, nanotubos de carbono por su resistencia mecánica, biocompatibilidad y superficie microscópica irregular (Guo *et al.*, 2015, p.1). Asimismo, estudios como los de (Sun *et al.*, 2016, p.3) permiten reconocer que diferentes variaciones en los electrodos y los reactores pueden tener un importante efecto en el poder de salida, el crecimiento bacteriano y la eficiencia de remoción, enfocado esto principalmente en que las variaciones de las membranas pueden favorecer a la remoción simultánea de carbono y nitrógeno en las celdas.

Adicionalmente, se puede partir de la descripción (Nakamura *et al.*, 2009, p.2) sobre redes bacterianas eléctricamente conductoras que demuestran que coloides generados a partir de óxidos de hierro

pueden incrementar la generación de corriente en un ambiente bacteriano. Los resultados obtenidos en varias investigaciones permiten conocer criterios para determinar el rendimiento de celdas de combustible microbianas, los cuales se establecen en base a los diversos parámetros electroquímicos como son la densidad de potencia, voltaje de las celdas y los parámetros de degradación biológica de los sustratos (Rahimnejad *et al.*, 2011, p.3).

La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por medio del Centro de Energías Alternativas y Ambiente (GIDAC-CEAA) ha realizado trabajos de importante avance en el uso de celdas de combustible microbianas (CCMs). Se ha trabajado en la evaluación de la capacidad electrogénica de microorganismos presentes en suelos de páramo andino contrastando de manera similar con suelos de la región Amazónica, en el cual como resultado se obtuvo una mayor generación de voltaje en suelos de páramo de 4000msnm. (W. Logroño *et al.*, 2015, p.1), en adición se ha venido experimentando con este tipo de celdas como biosensores para el monitoreo de ciertos parámetros como DBO en aguas residuales sintéticas de arroz acortando el tiempo de respuesta, logrando a la par la generación de bioelectricidad junto con el tratamiento de dicho efluente.(W. Logroño *et al.*, 2016, p.1), esto aprovechando los principios de funcionamiento analizados ampliamente por (Rogers, 1995, p.3) en su trabajo sobre aplicaciones ambientales de los biosensores resaltando su versatilidad, fácil aplicación y ventajas de costo-beneficio.

No solo se ha trabajado con cepas bacterianas, sino también se ha incursionado en el mundo de las microalgas mediante valoraciones de su capacidad de producción de bioelectricidad conjuntamente con la biodegradación de aguas residuales de la industria textil que cuentan con la presencia de tintes propios de la misma, teniendo un decrecimiento importante de DQO y una reducción en la concentración de metales pesados de hasta un 98% de Zn y entre 54-80% en el caso de Cr (W. Logroño *et al.*, 2017, p.2).

1.2. Marco Conceptual

1.2.1. Bioelectricidad

Es la generación de energía eléctrica a partir de organismos vivos, en su mayoría se usan microorganismos para la ejecución de esta actividad. Este proceso se basa principalmente en el metabolismo microbiano, el cual degrada un sustrato con contenido de carbono y libera electrones, estos forman un flujo al ser atraídos a un cátodo, este fenómeno por ende origina corriente eléctrica (Rabaey & Verstraete, 2005, p.1). La materia orgánica contenida en la cámara anódica se oxida, producto de esto se forman electrones y protones. La generación de electrones

es proporcional a los protones, en el caso de generarse un electrón se obtendrá del mismo modo un protón. Los electrones se remueven rápidamente por acción de la biopelícula en el circuito eléctrico de la celda. Los protones tienen que desplazarse fuera de la biopelícula para posteriormente ser consumidos en el cátodo (Gámez Galicia, 2016, p.3).

Los electrones generados de la oxidación de la materia orgánica se transportan a la parte externa de la superficie celular esperando un aceptor final en este lugar, a todo este proceso se lo conoce como transferencia extracelular de electrones (Lovley, 2008, p.4). Entre las explicaciones acerca de cómo los microorganismos liberan electrones en el electrodo están: los citocromos como artífices de la transferencia, a quienes (Busalmen *et al.*, 2008, p.1) define como proteínas relacionadas con la respiración de microorganismos, únicamente están presentes en aquellos con características electrogénicas; estos son mediadores tanto externos como propios de los organismos que colaboran en la transferencia junto con los pilis participando en este proceso (Falcón, Lozano, & Juárez, 2009, p.10).

1.2.2. Celdas de Combustible Microbiano (CCMs)

Es un dispositivo que utiliza microorganismos para convertir la energía química presente en un sustrato en energía eléctrica, esto es posible cuando bajo ciertas condiciones algunos microorganismos transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de a un aceptor natural de electrones (como oxígeno). Este proceso contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible (Pant *et al.*, 2010, p.1).

Estos dispositivos están conformados por una cámara anódica anaerobia y una catódica aerobia, separadas por un tejido de carbono en donde se forma una biopelícula microbiana. Los sustratos orgánicos son oxidados en la cámara anódica de las CCMs por las actividades metabólicas de los microorganismos presentes, los electrones generados son transferidos a circuitos externos vía transferencia electrónica extracelular (EET) (Sun *et al.*, 2016, p.2).

Las Celdas de Combustible Microbianas son una tecnología emergente que podrían contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada (Revelo *et al.*, 2013, p.2). Esto debido a que las CCMs en su funcionamiento generan bioelectricidad y a su vez realizan un tratamiento de aguas residuales si estas se usan en el interior de la cámara anódica (Rabaey & Verstraete, 2005, p.1).

Las CCMs son consideradas como fuentes de diferencia de potencial débil debido a que las salidas de voltaje no se mantienen constantes, esto originado por la resistencia que tienen dentro de su

esquematación como se muestra en la Figura 1-1. El voltaje interno y las resistencias pueden variar de una manera no lineal, dependiendo de los cambios en las condiciones de las CCMs.

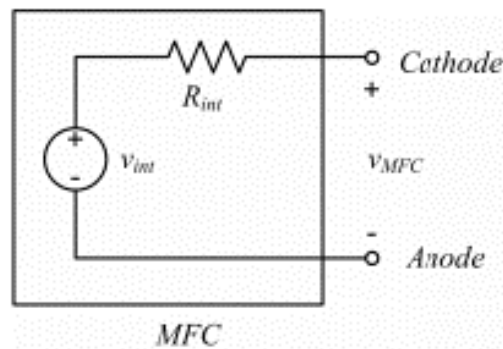


Figura 1-1. Esquema del circuito de una CCM

Realizado por: (Park y Ren 2011b)

1.2.3. Factores intervinientes en la producción de bioelectricidad

1.2.3.1. Configuración de Celdas de Combustible Microbiano

El aumento eficiente de densidad de potencia y eficiencia coulombica a la que (H. Liu & Logan, 2004, p.2) definen como la fracción de electrones captados como corriente versus la captación máxima posible; además de su rentabilidad, está determinado por la exitosa identificación de materiales y configuración en la construcción de CCMs.

Las principales configuraciones son:

- Celdas de Combustible Microbianas de Cámara doble, son dos compartimentos individuales (ánodo y cátodo) enlazadas por una membrana de intercambio catiónico, esta membrana puede ser sustituida por un puente salino. Este tipo de configuración amplía la superficie de contacto en membrana y electrodos, asimismo incrementa la densidad de potencia, esta configuración también es conocida como de tipo H. (Logan *et al.*, 2006, p.2)
- Las Celdas de Cámara Simple presentan el ánodo y cátodo en un mismo compartimento separadas por un tejido de carbono. El cátodo en la mayoría de celdas de este tipo de composición se encuentra parcialmente expuesto al aire (R. Kumar, Singh, & Zularisam, 2017, p.370). Es el tipo de configuración más simple para iniciar con CCMs, puede tener forma cilíndrica o rectangular, el ánodo se mantiene en contacto con el sustrato y el inoculo como se observa en la figura 2-1, además de formar parte de su estructura puede hacer las veces de un conjunto

membrana-electrodo (Nandy & Kundu, 2018, p.32). Las ventajas de este tipo de celdas, radica en su facilidad de ensamblaje por sus pocos componentes, junto con esto, su costo es inferior al resto de configuraciones convirtiéndose en una alternativa viable para la experimentación (Du & Gu, 2007, p. 470).

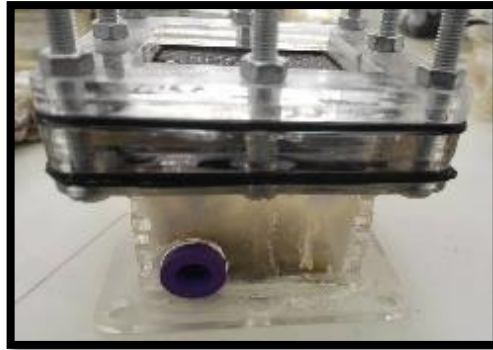


Figura 2-1. CCMs de configuración simple

Realizado por: (Pérez, 2018)

- Las cámaras de flujo ascendente son una nueva alternativa en el estudio de CCMs, se trata de un tubo cilíndrico en cuyo extremo superior se encuentra la cámara catódica, a continuación, capas de fibra de vidrio y pequeñas esferas de vidrio, al final se encuentra la cámara anódica. El sustrato ingresa por la parte inferior, atraviesa primero la cámara anódica y asciende continuamente hasta el cátodo, este movimiento es el que origina un gradiente en el flujo de electrones generando bioelectricidad como se esquematiza en la Figura 3-1, no cuentan con una división material del ánodo y cátodo (R. Kumar *et al.*, 2017, p.371). Aunque se trata de una novedosa configuración, presenta varias desventajas. Según mencionan (Zhou *et al.*, 2013, p.4) la potencia generada por este sistema es muy inferior al alto costo que conlleva su aplicación. Por otra parte, este es muy usado para el tratamiento de aguas residuales con aceptables resultados, mas no como un eficiente sistema de generación eléctrica (Brutinel & Gralnick, 2012, p.45).

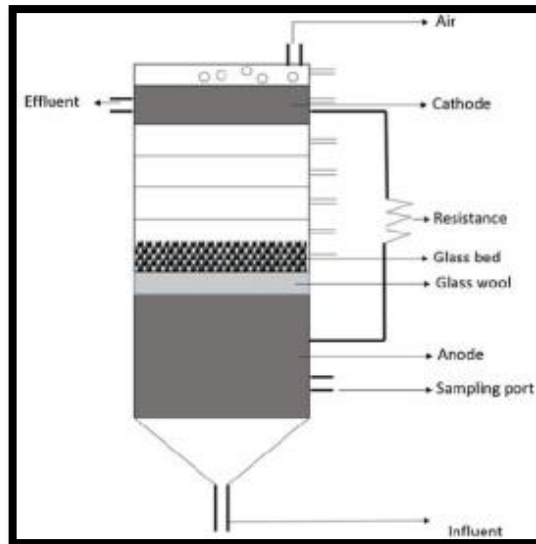


Figura 3-1. CCM de flujo ascendente

Realizado por: (Kumar, Singh y Zularisam 2017)

- El interés de la comunidad científica, centrada en CCMs, ha llevado al desarrollo de configuraciones innovadoras, tal es el caso de las Celdas Biosolares en las que se plantea el uso cooperativo de cepas microbianas metabólicamente distintas. En este tipo de celdas se usa una hibridación de inóculos bacterianos heterotróficos y fotosintéticos (L. Liu & Choi, 2017, p.140). Al igual que el resto de celdas, estas cuentan con un ánodo y un cátodo, las bacterias contenidas en microcámaras trabajan de manera sinérgica formando el biofilm en la cámara anódica, estas son autosustentables debido a que los metabolitos generados por las comunidades fotosintéticas sirven como alimento para las heterotróficas y estas a su vez generan residuos usados como fuente de alimento para las fotosintéticas; los electrodos se encuentran intercalados y son fácilmente visibles (Nandy & Kundu, 2018, p.34).
- Las celdas de combustible microbiano apiladas son un conjunto de celdas de configuración simple que se encuentran conectadas unas con otras, sea de forma paralela o en serie tal como en la Figura 4-1 (Logan *et al.*, 2006, p.3). Este tipo de estructura de celda permite adquirir una mayor cantidad de voltaje y potencia de salida que con una sola celda. Las celdas apiladas en forma paralela tienen mejores resultados que en serie, esto debido a que se incrementan las reacciones bioelectroquímicas entre unas y otras favoreciendo al voltaje de salida; este voltaje no es la sumatoria de los voltajes generados en cada una de las celdas debido a que se incrementan también las pérdidas generadas por la resistencia que ejercen estas celdas (R. Kumar *et al.*, 2017, p.373).



Figura 4-1. CCMs apiladas

Realizado por: (Logan et al. 2006)

- La celda de combustible microbiana tubular es un cilindro bastante alargado similar a la Figura 5-1, aunque cuenta con cámaras anódicas y catódicas no usa ningún mediador, catalizador o una membrana de intercambio de protones, no es necesario un control estricto de condiciones anaerobias. Para la generación de bioelectricidad, este tipo de celda se configura a manera de hélice para iniciar el flujo de electrones. El rendimiento de estas celdas puede aumentar, si se colocan mayor número de cámaras entre ánodo y cátodo (Scott *et al.*, 2007, p.1065).

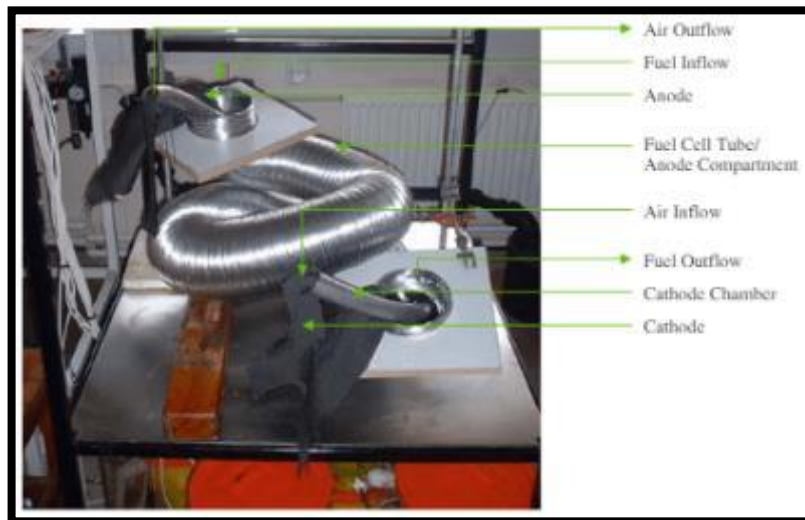


Figura 5-1. CCMs de configuración tubular

Realizado por: (Scott, Murano y Rimbu 2007)

1.2.3.2. Materiales

Las celdas pueden elaborarse de diversos materiales, además que sus componentes varían de acuerdo a la finalidad del estudio y los costos a considerar. Las CCMs pueden elaborarse de plexiglás o acrílico, además de vidrio, platino e incluso cobre (Du *et al.*, 2007, p.468). La configuración de las celdas es otro parámetro a considerar para la selección de materiales previo su construcción; en el caso de aquellas que son de doble cámara el material comúnmente usado es el vidrio dado la facilidad para incorporar el puente salino en ellas (Logan *et al.*, 2006, p.2). El material común para la estructura de celdas de cámara simple es el acrílico, permite visualizar lo que ocurre en el interior de ella y controlar de cierta manera el medio (Poggi *et al.*, 2009, p.2).

El ánodo puede ser estructurado de varios tipos de materiales, los más usados son: compuestos de carbón que son muy útiles por su durabilidad, alta conductividad, biocompatibilidad y bajo costo (Li *et al.*, 2017, p.2), además que se adaptan a varios diseños se encuentra disponible como placas compactas de grafito, barras, o gránulos, como material fibroso ya sea tela, paño, fieltro, papel, fibras o espumas, y también como carbón vidrioso. (Gámez Galicia, 2016, p.17); el grafito, de manera similar a los electrodos de carbón, provee alta estabilidad y conductividad (Kalathil *et al.*, 2017, p.312); el acero inoxidable aparece como otra alternativa al momento de armar un ánodo, es un excelente sustituto de la estructuras de carbono, es eléctricamente conductivo, resistente a la corrosión y una densidad de potencia relativamente estable (Pocaznoi *et al.*, 2012, p.2); finalmente, la cerámica también brinda características acordes a la de un ánodo, siendo también muy empleada en su construcción, dado a que otorga un ambiente acorde a la unión de bacterias, además de condiciones estables de conducción (Massazza *et al.*, p.2 2015).

El cátodo también puede estar constituido de diversos materiales, en su mayoría se usan componentes similares a los descritos en el ánodo tales como grafito, estructuras de carbono, incluso porcelana (Du *et al.*, 2007, p.476), aunque existe un interés creciente en estructuras más innovadoras, bajo este concepto se ha usado el platino (Pt) el cual es favorable en la reducción del oxígeno, lastimosamente este metal es demasiado costoso, además que su rendimiento decae debido a que provoca un envenenamiento al entorno bacteriano (Zhou *et al.*, 2011, p.5).

Tabla 1-1: Membranas de intercambio usadas en CCMs

Item	Material	Observaciones
Ánodo	Grafito, fieltro de grafito, papel carbón, tela de carbono, Pt, Pt negro.	Necesario

Cátodo	Grafito, fieltro de grafito, papel carbón, tela de carbono, Pt, Pt negro.	Necesario
CA	Grafito, policarbonato, Plexiglás	Necesario
CC	Grafito, policarbonato, Plexiglás	Opcional
PEM	Nafion, Ultrex, puente salino, tabique de porcelana.	Necesario

Fuente: (Du, Li y Gu 2007)

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019.

1.2.3.3. Efectos del pH

El pH es un factor importante a considerar, en especial en la cámara anódica, dado que es el lugar donde los microorganismos degradan el sustrato y liberan protones que se mueven a través de la membrana electrolítica polimérica (MEP), esto junto con los electrones que también se liberan. Debido a la operación de las celdas a lo largo del tiempo, además de la resistencia que generan las celdas acompañado de la falta de eficiencia en el transporte de los iones, ocasiona la acumulación de protones que a su vez causan una acidificación de la cámara anódica. (R. Kumar *et al.*, 2017, p.376). Dicha acumulación de protones desfavorece al crecimiento microbiano, para una óptima actividad bacteriana la cámara anódica debe poseer un pH cercano a la neutralidad (Venkata *et al.*, 2014, p.787).

1.2.3.4. Efectos de la Temperatura

La temperatura es un factor importante a controlar en CCMs ya que su rendimiento depende de ello, (Jafary *et al.*, 2013, p.257) manifiesta en sus estudios que una temperatura entre 20° – 30°C permite un ambiente óptimo, incluso en temperaturas mayores. El incremento del poder de densidad puede ser atribuida al metabolismo bacteriano directamente relacionado con la temperatura (P. Kumar *et al.*, 2018, p.49). Se puede considerar además que la temperatura está relacionada con el tipo de microorganismo a usar y al ambiente en el que este esté adaptado (Phung *et al.*, 2004, p.1). Cuando se ha establecido el biofilm, el metabolismo bacteriano puede adaptarse a pequeñas fluctuaciones de temperatura sin alterar su comportamiento (R. Kumar *et al.*, 2017, p.377). Al contraste de esto, (Yong *et al.*, 2014, p.21) menciona que a altas temperaturas de hasta 45°C se beneficia el rendimiento de CCMs, se obtiene mayor poder de salida ocasionado porque las bacterias en el biofilm manifiestan su mayor actividad catalítica en dichos rangos de temperatura.

1.2.3.5. *Sustratos e inóculos*

- **Sustratos**

El sustrato constituye el combustible a partir del cual se genera la energía. En los primeros años, sustratos simples como glucosa y acetato eran de uso general, pero en los últimos años las investigaciones se centran en la utilización de sustratos menos convencionales con el fin de utilizar la biomasa presente en aguas residuales de diverso tipo y adicionalmente depurarlas y generar energía. (Revelo *et al.*, 2013, p.18)

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 CCMs pueden utilizar como sustratos no sólo material orgánico degradable, sino también material resistente a la biodegradación. (Logan *et al.*, 2006, p.3). El uso de desechos orgánicos domiciliarios posee ciertas ventajas, como el bajo costo de adquisición y la abundancia en la que estos se encuentran. (Revelo *et al.*, 2013, p.24)

- **Páramos**

“Páramo” se deriva del latín *paramus* que quiere decir *lugar frío y desamparado* vocablo usado por los celtas y antiguos habitantes de la península Ibérica y zonas contiguas de Europa. Durante la conquista española a América, los ibéricos denominaron páramo a las tierras Andinas de bajas temperaturas, similares a las tierras altas y frías de su lugar de origen. (Llambí *et al.*, 2012, p.9).

En el Ecuador se establece al páramo entre el límite superior de altura de los bosques andinos (entre 3.000 y 3.500 m) y el límite inferior de las nieves (entre 4.800 y 5.000 m), toma lugar, en los Andes septentrionales y ecuatoriales. Estos prados de altura (*Neotropical alpine grasslands*) dominados por gramíneas formadoras de penachos, se enfrentan a un clima rudo: el promedio de las temperaturas anuales es bajo, hay una alta humedad a pesar de las precipitaciones moderadas y una débil evaporación. En tal entorno climático y altitudinal, se desarrolla un tipo de vegetación muy particular que presenta un alto grado de endemismo. En primer lugar, resulta que este medio está definido por la presencia de algunas asociaciones vegetales típicas. Pero dentro del nombre genérico de paramo existe una fuerte diversidad, tanto a nivel botánico como en lo concerniente a las condiciones climáticas y edafológicas. (Podwojewski *et al.*, 2000, p.7). El Ecuador posee

aproximadamente 1.8 millones de hectáreas de páramo, esto corresponde aproximadamente el 7% de la superficie del territorio nacional (Mena Vázquez, 2010, p.107).

La importancia de los suelos de páramos radica en los servicios ambientales que estos proveen dentro de un ecosistema. En el territorio ecuatoriano, el suelo de páramo tiene un origen volcánico en su mayoría. Esto adicionado a las bajas temperaturas permiten una lenta descomposición de materia orgánica constituyendo una estructura tridimensional semejante a una esponja, dicha condición se encarga de absorber agua y mantenerla a lo largo del tiempo, convirtiéndose en zonas de captación y distribución de este recurso para tierras bajas. Una característica adicional en este suelo, es el poseer aproximadamente el 50% de materia orgánica dentro de su composición estableciéndose como sumideros de CO₂, aportando de manera significativa en la lucha contra el calentamiento global (Podwojewski *et al.*, 2000, p.12).

- **Inóculos**

Varios microorganismos son estudiados dentro de celdas de combustible microbianas para la generación de bioelectricidad. Se han desarrollado estudios sobre *Geopsychrobacter electrodiphilus* aislada de lechos marinos, que tiene la capacidad de transferir hasta el 90% de los electrones disponibles en los donadores orgánicos (Holmes *et al.*, 2004, p.6029). Otros microorganismos ampliamente estudiados tanto en cepas puras como en consorcios son *Bacillus tequilensis* y *Pseudomonas aeruginosa* por su versatilidad de uso y adaptación a las condiciones de la cámara catódica (Deepika *et al.*, 2013, p.425).

En la cámara anódica, para la optimización de las reacciones, se deben mantener condiciones anaeróbicas. Si esto no sucede, los electrones generados por las reacciones metabólicas del inóculo bacteriano que se supone deben desplazarse al ánodo, cambian su aceptor final, ocasionando la reducción del oxígeno que junto con protones generan agua. Por este motivo, los microorganismos responsables del proceso de bioelectricidad deben ser anaerobios estrictos o facultativos para que las condiciones establecidas se cumplan (Ortiz *et al.*, 2017, p.74).

1.2.3.6. Membranas

En base a los estudios realizados, se conoce que los diferentes diseños de CCMs requieren en su mayoría una separación entre la cámara anódica y la catódica, mediante una membrana de intercambio catiónico. Ésta, es comúnmente constituida de Nafion (Dupont Co., USA), aunque Rabaey (2005) también considera útiles compuestos inertes de carbono, como Ultrex (Membranes International Inc., Glen Rock, N.J.) que muestran una mayor relación entre eficiencia y costo.

Las membranas de intercambio protónico, catiónico, aniónico y bipolares son usadas en CCMs únicamente como una forma de desvinculación de las cámaras que contienen los electrodos aparte de disminuir la difusión de oxígeno en la cámara anódica (Zuo *et al.*, 2008, p.2).

1.2.3.7. Tipos de membranas

- **Membrana de intercambio de protones (MIP)** al igual que el resto de membranas su principal labor es la de separar las cámaras aeróbica y anaeróbica mientras los iones pasan a través de ella. Entre las características más importantes que deben tener las MIP están: una alta conductividad de protones, baja difusividad de oxígeno y estabilidad bioquímica. (Kumar, *et al.*, 2018, p.375). Captan los protones producidos por la acción microbiana, mientras que los electrones fluyen por medio de un circuito externo y terminan en el oxígeno como suceptor final, completando el circuito (Hoskins *et al.*, 2014, p.157).
- **Membrana de intercambio de cationes (MIC)** es una barrera entre cámaras, su objetivo es el transporte de los protones producidos hacia la cámara catódica además de impedir el paso de oxígeno hacia el sustrato para así mantener las condiciones anaeróbicas (Rahimnejad *et al.*, 2015, p.701). Los iones de carga positiva deben ser acarreadas a través de esta por ende a menudo es considerada como una MIP, en las MIC a veces se incluyen cargas negativas aunque estas son rechazadas para permitir el paso de los cationes a través de esta. (Dorfner, 1991, p.512). La desventaja que presentan estas membranas es su alto costo además de su resistencia interna (Ghasemi *et al.*, 2012, p.83).
- **Membrana de intercambio anódico (MIA)** es un tipo de membrana de intercambio iónico que tiene grupos funcionales ionizables, se origina con el afán de solventar las limitaciones de las membranas catiónicas, esta membrana usa buffers para incrementar el flujo de protones (Zhuang *et al.*, 2012, p.83). Las MIA en su mayoría están constituidas de carbono y han demostrado que con una misma superficie que las MIC han tenido mayor recuperación de electrones, además que presentan costos inferiores a otras usadas, estas membranas junto con cátodos tubulares de menor resistencia interna se convierten en futuros prósperos en la evaluación del funcionamiento de CCMs (Zuo *et al.*, 2008, p.5).
- **Las membranas bipolares (MB)** son la sumatoria de dos membranas monopolares, se constituyen en una variante de los separadores comunes usados en CCMs, en donde los protones son conducidos junto con iones hidróxido. (Rahimnejad *et al.*, 2015, p.701). Según los estudios de Salwan (2009) este tipo de membranas incrementa la conductividad eléctrica y reduce su costo. Entre los materiales más estudiados para este tipo de membranas están el

grafito y placas de acero inoxidable; el grafito provee resistencia además de una excelente conductividad eléctrica, junto con su fácil obtención y baja densidad es una de las mejores alternativas; mientras que el acero inoxidable aparte de cualidades similares del grafito brinda estabilidad química.

De acuerdo a (Mehta y Cooper 2003) las principales ventajas de este tipo de membrana radica en poder separar dos celdas individuales adyacentes, ayuda en el paso de corriente por fuera de la celda, distribuye los oxidantes contenidos en el interior de la celda y finalmente colabora en la gestión del calor y agua en el interior de la calda.

1.2.4. Grafeno

El grafeno es un alótropo del carbono en el cual sus átomos se organizan en estructuras hexagonales conectadas mediante enlaces sp^2 . Es un material plano considerado bidimensional. Los átomos de carbono se enlazan mediante enlaces covalentes formando hexágonos, unidos entre sí (Rodríguez, 2016, p.17). Fue aislado por primera vez en el año 2004, por los físicos Andre K. Geim y Konstantin S. Novoselov, al pegar un trozo de celo sobre la superficie de un grafito, pero no fue hasta el año 2010 cuando el grafeno comenzó a generar interés en el resto de los científicos, al ganar sus descubridores el Premio Nobel de Física. Este interés fue debido a las características únicas del material, como la excelente conductividad eléctrica, su amplia superficie, dureza y una alta conductividad térmica. Además, al proceder de una sustancia natural como el grafito, tiene menor riesgo ambiental que los materiales inorgánicos. Conduce muy bien la electricidad, por lo que varias empresas tecnológicas desarrollan estudios con este material. Además, se considera un excelente conductor de calor. (Rodríguez, 2016, p.18). Existen diferentes denominaciones del grafeno en función de su grosor, cuando únicamente éste es de un átomo se considera grafeno bidimensional (2D), mientras que a partir de diez capas incluso si alcanza las cien, se puede considerar como un material tridimensional (3D) (Geim & Novoselov, 2007, p.184).

Su estructura hexagonal en dos dimensiones provee una dispersión en línea recta, que, en otras palabras, se refiere a que los electrones se comporten como partículas carentes de masa dándoles libertad de movimiento a lo largo de la lámina, además que las impurezas presentes en el grafeno no se convierten en limitantes del movimiento de los mismos (Alcolea, 2013, p.1). Por la naturaleza de este material, de gran importancia para la transmisión de electrones por túnel a través de barreras potenciales, por razón de su contraposición al movimiento, ofrece la posibilidad de construir transistores de carbono; también se ha evaluado la capacidad del grafeno para la absorción de moléculas gaseosa en el aire, como sensores de estado sólido, lo cual resulta en el dopaje con electrones, monitoreando su resistividad se puede determinar las concentraciones de ciertos gases en la atmósfera (Katsnelson, 2007, p.26).

En la industria, este material ha despertado gran interés por el abanico de aplicaciones tecnológicas que puede llegar a tener, como el uso en dispositivos móviles para aumentar su dureza y flexibilidad sin limitar sus funciones; la implementación de celdas fotovoltaicas elaboradas con grafeno que es casi transparente a la radiación electromagnética, como la luz ultravioleta e infrarroja. El grafeno absorbe sólo el 2% de la luz que cae sobre él, no importa si es luz ultravioleta, infrarroja, o todas las otras longitudes de onda, cuando una celda fotovoltaica es intercalada entre dos hojas de grafeno, la luz atraviesa las hojas de grafeno y choca contra la celda fotovoltaica, como resultado, la celda fotovoltaica genera electricidad, la cual es llevada por las hojas de grafeno. (Tinneland, 2012, p.2). Una de las aplicaciones más llamativas para el polvo de grafeno es en las baterías eléctricas, debido a que una gran relación entre superficie-volumen y una alta conductividad puede mejorar su eficiencia en el funcionamiento, otro alótropo del carbono, los nanotubos también son empleados para este fin pero el polvo de grafeno tiene una importante ventaja debido a que es más barato de producir (Stankovich *et al.*, 2006, p.284).

1.2.5. Magnetita

De composición química Fe_3O_4 es un material inorgánico compuesto por óxido de hierro mixto, en la naturaleza se encuentra asociada en rocas metamórficas, presenta una estructura cúbica y una coloración negruzca. La caracterización de estas partículas magnéticas implica el análisis de un número amplio de parámetros químicos y físicos: como la morfología, la estructura, el tamaño, las características químicas de la superficie y la presencia de impurezas. Actualmente, la aplicación de magnetita se ha incrementado en varios campos por su versatilidad, tales como la biología, medicina, paleontología, física, biotecnología, nanotecnología entre otras. Químicamente la magnetita, Fe_3O_4 es un óxido mixto de hierro, su composición corresponde a 27,6% de oxígeno y 72,4% de hierro (Noval *et al.*, 2015, p.43).

La principal característica de este mineral y por lo que despierta intereses de estudio, es su habilidad magnética. De acuerdo a (Callister, 2007, p.296) esto se explica por su composición, partiendo en la existencia de iones Fe^{2+} y Fe^{3+} en los que existen momentos magnéticos diferentes, mientras que los iones O^{2-} son neutros en cuanto a magnetismo. Entre estos iones de hierro, se generan interacciones de acoplamiento de espines antiparalelas, a pesar de esto se produce un momento ferromagnético neto debido a que los momentos de espín no se cancelan completamente. Por las diferentes posiciones que los iones Fe^{3+} pueden adoptar se produce nuevamente un acoplamiento antiparalelo de los momentos magnéticos de los iones Fe adyacentes, por ende, los momentos magnéticos de espín de Fe^{3+} se anulan entre sí y no contribuyen a la magnetización del sólido. Todos los iones Fe^{2+} tienen sus momentos magnéticos

alineados en una misma dirección, por lo tanto, este es el total responsable de la magnetización neta del mineral.

En CCMs se ha experimentado con magnetita, aprovechando sus cualidades magnéticas, para incrementar la transferencia extracelular de electrones, formando un biofilm dopado con este compuesto incrementando la densidad de potencia de salida, de esta manera se busca mayor eficiencia en la producción de bioelectricidad (P. Liu *et al.*, 2018, p.2). Dentro de la nanotecnología es uno de los materiales que mayor interés ha generado su estudio y la versatilidad de sus aplicaciones siendo evaluadas en temas de tratamientos de remediación ambiental, por ejemplo (Starbird, 2015, p.46) analizó la capacidad de nanopartículas de magnetita, sintetizadas a partir de una solución de cloruros de hierro, para la remoción de arsénico en agua para consumo humano. Además de contaminantes químicos, se ha estudiado su aplicación remediadora de materia orgánica junto con agentes exógenos en agua y aire, como controles en emisiones industriales (Noval *et al.*, 2015, p.42), la degradación de tetraciclina y otros antibióticos presentes en aguas residuales de industrias farmacéuticas (Hou *et al.*, 2016, p.6), adicionalmente se registran estudios en los cuales se hace uso de la magnetita junto con TiO_2 en procesos de coagulación para el tratamiento de efluentes residuales, siendo recuperable y reusable por sus características magnéticas. (Vanegas *et al.*, 2014, p.43). La evaluación de la capacidad fotocatalítica de la magnetita también ha sido objeto de análisis, consiguiendo resultados favorables en cuando a la fotodegradación de azul de metileno en soluciones acuosas (Khan *et al.*, 2016, p.325).

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1. Lugar de muestreo del inóculo

El sitio escogido para realizar el muestreo fue la parroquia Villa La Unión, perteneciente al Cantón Colta situado en la Provincia de Chimborazo, el área considerada se esquematiza en la Figura 1-2.

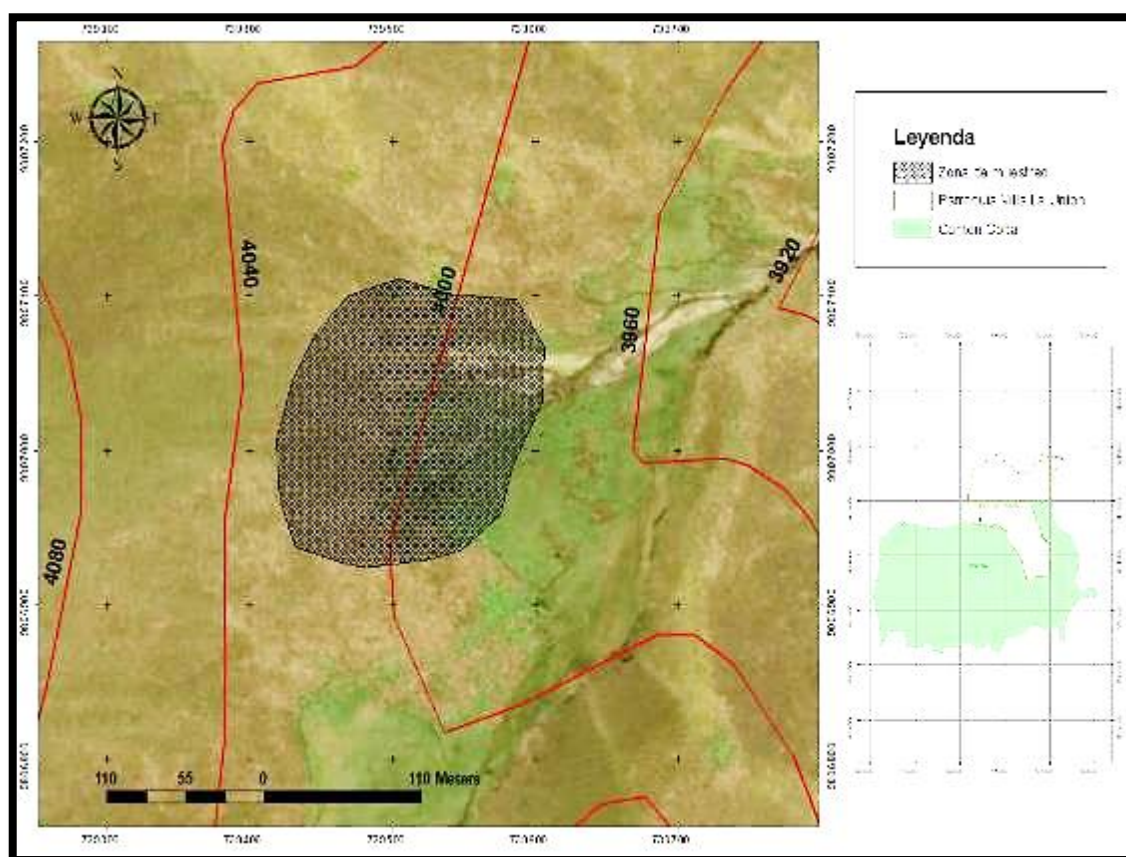


Figura 1-2. Lugar de muestreo, sector Villa La Unión

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

2.1.1. Georreferenciación del sitio de muestreo

La localización y referenciación geográfica del área de muestreo se la realizó mediante un equipo Garmin GPSMAP 78sc, las coordenadas obtenidas se muestran en unidades UTM WGS84 Zona 17S.

- Este: 739522.00 mE,
- Norte: 9806929.01 mS,
- Altitud: 4000 m.s.n.d.m

2.1.2. Condiciones climáticas

Los datos de factores climáticos de la zona de muestreo se obtuvieron a través de una estación meteorológica portátil Kestrel 3500, los principales considerados fueron: fecha de muestreo, hora, velocidad del viento, velocidad máxima y promedio del viento, temperatura, temperatura de viento frío, humedad, índice de estrés térmico, punto de rocío, temperatura en bulbo húmedo, presión barométrica y altitud.

2.1.3. Procedimiento de muestreo

En la zona escogida, se estableció una configuración de conglomerados, compuestos de cinco parcelas cuadradas de 10 m de lado aproximadamente y una separación de 100 m entre una a otra. Con el uso de un barreno, las muestras fueron tomadas a una profundidad de 20 cm en cada vértice de las parcelas formadas, además de un punto central en cada una de ellas para así conseguir una muestra inicial, dando un total de 5 submuestras de aproximadamente 625g. A continuación, se unificaron y se obtuvo una muestra compuesta de 3125 g almacenada en fundas ziploc, de los cuales 1000 g fueron dispuestos para análisis de laboratorio, 1000g para uso como sustrato en las CCMs y el material restante fue reservado para un uso posible posterior a una temperatura de 4°C.

2.1.4. Características del suelo

Una vez obtenidas las muestras de suelo, estas fueron analizadas por técnicos especialistas de Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (AGROCALIDAD), los parámetros analizados se redactan en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Parámetros analizados en la muestra de suelo de páramo.

Parámetro Analizado	Método	Unidad
pH	Electrométrico PEE/SFA/06 EPA 9045d	...
Materia Orgánica	Volumétrico PEE/SFA/09	%
Nitrógeno	Volumétrico PEE/SFA/09	%
Fósforo	Colorimétrico PEE/SFA/11	mg/kg
Potasio	Absorción Atómica PEE/SFA/12	cmol/kg
Calcio	Absorción Atómica PEE/SFA/12	cmol/kg
Magnesio	Absorción Atómica PEE/SFA/12	cmol/kg
Hierro	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg
Manganeso	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg
Cobre	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg
Zinc	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

2.1.5. Análisis complementario de sustratos

2.1.5.1. Porcentaje de Humedad

Se pesaron 100g gramos de suelo húmedo resultante del muestreo, a continuación, se colocó en una estufa a 105°C por 24 horas. Al finalizar esto, se pesó nuevamente el suelo restante

directamente de la estufa para evitar que vuelva a captar humedad. Finalmente, se aplica la ecuación 1.2 para la determinación de este parámetro.

$$\text{Ecuación 1.2} \quad \%H = \left(\frac{Ph - Ps}{Ph} \right) * 100$$

Donde:

Ph = Peso de suelo húmedo (g)

Ps = Peso de suelo seco (g)

2.2. Configuración de CCM's

Las celdas de combustible microbianas fueron de configuración simple con cátodo parcialmente expuesto al aire, construidas a partir de acrílico traslucido de 3mm de espesor. La cámara anódica se elaboró a manera de cubo de 5cm de arista, en dos de sus caras se colocaron tapones de caucho para el suministro de nutrientes y la purga de aire del interior, en su parte superior se colocó fibra de tejido de carbono como membrana de captación de electrones. El cátodo se estructuró a partir de cinco láminas de material similar a la cámara anódica dispuestas una sobre otra, en cuyo espacio superior se introdujo fibra de carbono expuesta al aire. La cámara anódica y catódica fueron fijadas una a otra mediante tornillos galvanizados de 4cm de longitud.

2.2.1. *Sustratos*

El sustrato empleado fue una combinación de residuos sólidos de frutas y vegetales en relación 50:50 en peso. Se colocaron 1.5g de frutas en proporciones iguales (Naranja: *Citrus sinensis*, Banano: *Musa acuminata L.* y Manzana: *Pyrus malus L.*) junto con una mezcla de verduras (Cascara de arveja: *Pisum sativum L.*, Haba: *Vicia faba L.*, Zapallo: *Cucurbita máxima Duchesne*). Estos residuos fueron obtenidos del Mercado Popular "La Condamine" de la ciudad de Riobamba, los cuales triturados hasta obtener un diámetro aproximado de 3mm.

2.2.2. *Preparación de la Cámara Anódica*

El inóculo utilizado en la cámara anódica de las CCMs provino de suelos de páramo no intervenido, debido a los voltajes relevantes obtenidos en investigaciones anteriores que estos generaron (Logroño et al., 2015, p.2). Se pesó 3 g de dicho suelo para mantener una relación de 1:1 de la mezcla frutas-vegetales. Esta relación fue usada a consecuencia de los resultados obtenidos en investigaciones previas, en donde se establece una mejor producción de bioelectricidad con dicha

proporción de sustratos en inóculos, estas fueron adaptadas al volumen de las celdas utilizadas en la presente investigación.

Los minerales fueron suministrados a la cámara anódica a partir de una solución constituida por 5ml de cloruro de sodio al 0.9% aforadas con agua destilada hasta 100ml, de esta se dotaron 5ml a cada una de las celdas empleadas en la investigación durante su constitución.

2.2.3. Sistema de adquisición de datos

La lectura y almacenamiento de datos de voltaje generados por las CCM's fueron ejecutados por un sistema de adquisición de datos conformado por una DAQ NI USB-6009 de 8 entradas y 14bits operada bajo un modelo de recolección digital ejecutado por el software LabView, con un intervalo de recolección de datos de sesenta segundos por un periodo de 15 días de monitoreo, considerando a cada lapso de 24 horas como un ciclo independiente.

2.3. Preparación de CCM's para el monitoreo

2.3.1. Esterilización

Todos los materiales previos a ser empleados en la construcción de las CCM's fueron completamente sumergidos en una solución de hipoclorito de Sodio al 5% durante 60 minutos. Al cabo de este tiempo, dichos componentes fueron lavados usando agua comercial para nuevamente ser sumergidos en esta por 24 horas.

2.3.2. Pre-tratamiento de la membrana

Este procedimiento se llevó a cabo con el fin de eliminar todas las impurezas presentes en el tejido de fibra de carbono. Se inició con el corte de la fibra, formando cuadrados de 8x8cm, a continuación, estos fueron sumergidos en acetona industrial por un lapso de 12 horas, al concluir este tiempo, los cortes fueron lavados por cinco ocasiones con agua destilada para eliminar los sobrantes del disolvente. Posterior a esto, se sumergió la fibra en una solución de peroxidisulfato de amonio, previamente preparada con 50g del soluto en 250ml de agua, por un periodo de tiempo de 15 minutos, este procedimiento se repitió con 100ml de ácido sulfúrico al 96% por tiempo similar. Al final de dicho proceso, se calentaron los cortes de fibra a 450°C en un horno mufla por 30 minutos, para luego lavarlos en agua destilada y conservarlos en fundas ziploc hasta su

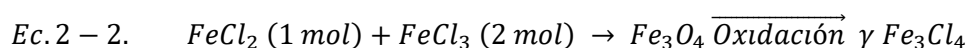
utilización. Paralelamente, las fibras que formaron parte de los cátodos, fueron tratadas únicamente con diversos enjuagues de agua destilada (Feng et al., 2010).

2.3.3. Síntesis de Magnetita

Se inició con la obtención de cloruro ferroso, para lo cual se colocaron 100 g de viruta de hierro, los cuales fueron sumergidos en 500 ml de una solución 7.4 M de HCL, esto fue sometido a una temperatura de 80°C por un tiempo de tres horas, dejando enfriar el contenido al finalizar (Hernández et al., 2003, p.2). Este proceso se realizó bajo estas condiciones debido a que permiten la mayor conversión de viruta de hierro a FeCl₂.

De forma simultánea, se preparó una solución usando 0.85ml de HCl a una concentración 12.1M y 25 ml de agua destilada, la cual fue burbujeada en nitrógeno por 30 minutos. Se añadieron 13ml de FeCl₃ al 40% y 14.2 ml de FeCl₂ en la solución anterior. Se agitó vigorosamente con ayuda de una varilla de vidrio y se adicionó 250 ml de una solución de NaOH 1.5 M gota por gota. Al trascurso del tiempo se originó un precipitado, para la recolección del sólido formado, se dispuso de un imán de neodimio y posteriormente se desechó el sobrenadante. El precipitado recogido se lavó con agua destilada, a continuación, se centrifugó a 4000 rpm por 10 minutos, repitiendo esto por tres ocasiones. Finalmente, el producto resultante se secó en un horno mufla a 70°C por 12 horas (P. Liu et al., 2018, p.383).

Las cantidades de los reactivos de hierro se establecieron de acuerdo a la Ecuación 2-2:



Por medio de este proceso, la magnetita resultante no posee surfactantes por lo que no necesitan ser removidos antes de formar una película ultrafina con este material, además que el diámetro de partícula es menor, incrementando el área de contacto tanto con la fibra de carbono como en la captación de electrones.

El material obtenido se observó bajo el ME para determinar el tamaño de partícula obtenido, para lo cual se usó cinta de carbón de 5 mm x 5 mm, donde se impregnó de magnetita, luego esto fue colocando en el interior de la platina, se cerró el contenedor para la generación de vacío, posteriormente se calibró el aumento y la definición requerida para la observación a 20 nm. Un proceso similar se efectuó con una porción de la fibra de carbono impregnada de magnetita. Además de que se analizó en el espectrofotómetro IR donde se precisó su composición, para ello

una pequeña cantidad de muestra se depositó en la platina de equipo, se ajustó la longitud de onda adecuada y se procedió a su análisis.

2.3.4. Síntesis de Grafeno

Este material se elaboró a partir de 0.625g polvo de grafito de alta pureza (PGAP), el cual fue diluido en 5 ml de N-metil-2-pirrolidona NMP, para luego ser sometido a baño ultrasónico por 6 horas con el fin de lograr una importante separación de las capas de PGAP. El uso del compuesto metilado se debió a sus propiedades como fotoprotector, desengrasante y agente limpiador en microelectrónica, además de su baja volatilidad y toxicidad.

El resultante fue dividido en cuatro partes iguales, para colocarse en los electrodos tratados de las CCM's situados una superficie plana minuciosamente aseada, para posteriormente esparcir el material a lo largo de la fibra de carbono mediante abrasión, incidiendo así nuevamente en la separación de capas de carbono. El proceso se repitió en reiteradas ocasiones, se logró una capa uniforme y sumamente delgada. Finalmente, se retiró el exceso de material y se almacenó los ánodos nuevamente en fundas tipo ziploc. Una de las membranas se observó bajo el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) hasta una amplitud de 5 μ m con un procedimiento similar al empleado en la magnetita.

2.3.5. Análisis de sustratos

Al cabo de los quince días de monitoreo, el sustrato resultante de cada una de las celdas, fue secado por 24 horas a 105°C por separado, luego se pesó 15mg de cada uno de ellos y se colocó en pequeñas cápsulas de plata. Las muestras preparadas se analizaron en el Equipo THERMO Combustion Flash 2000 Organic Elemental Analyzer bajo el método C,H,N,S Soil Analyzer, debido a que fue de interés analizar estos cuatro elementos. Finalmente, los cromatogramas resultantes fueron interpretados por el software Eager 300 EA1112 propio del equipo. La mezcla empleada como sustrato, se analizó antes de su uso en las celdas de combustible bajo el mismo proceso.

2.3.6. Diseño Experimental

La investigación realizada fue de tipo descriptiva-exploratoria, debido a que se centra en la descripción inicial del comportamiento de las CCMs, para posterior analizar la eficiencia de transporte de electrones ocasionada por los materiales añadidos en el bioánodo, cuya variable

respuesta fue el voltaje generado. El diseño de investigación es de un factor con cuatro niveles, evaluado en tres réplicas cada uno, se lo establece en base a la tabla 2-2. Se trabajó con un total de 12 unidades experimentales, monitoreadas de acuerdo a lo descrito anteriormente.

Tabla 2-2: Diseño Experimental

Factor (Material)		Repeticiones		
		1	2	3
Niveles	1.Grafeno (G)	Grafeno 1 (G1)	Grafeno 2 (G2)	Grafeno 3 (G3)
	2.Magnetita (M)	Magnetita 1 (M1)	Magnetita 2 (M2)	Magnetita 3 (M3)
	3.Blanco (B)	Blanco 1 (B1)	Blanco 2 (B2)	Blanco 3 (B3)
	4.Blanco con imán (BCI)	Blanco con imán 1 (BCI1)	Blanco con imán 2 (BCI2)	Blanco con imán 3 (BCI3)

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

2.4. Eficiencia

La eficiencia de las CCM's se determinó en base a los dos factores principales de este tipo de dispositivos: los niveles de degradación del sustrato y la densidad de potencia producida. Con los valores de voltaje (V) obtenidos a lo largo del monitoreo de las CCMs, se procedió a calcular la intensidad de corriente generada a partir de la Ley de Ohm.

Ecuación 3-2.

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde la resistencia externa considerada fue de 1000 Ω . Una vez obtenidos los valores de intensidad, se determinó la densidad de potencia generada a partir de la ecuación 4-2:

Ecuación 4-2

$$DP = \frac{U \cdot I}{A}$$

Donde:

U: representa el voltaje generado,

I: la intensidad de corriente y

A: el área de la membrana de la cámara anódica.

Los niveles de degradación del sustrato se determinaron a partir de su análisis en el equipo THERMO Combustion Flash 2000 Organic Elemental Analyzer, se estableció la relación antes y después de su paso por las CCM's.

2.5. Lugar Experimental

Todo lo concerniente al desarrollo de este Trabajo de Titulación, fue realizado en los laboratorios de Biotecnología y Protección Ambiental de la Facultad de Ciencias, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo de la ciudad de Riobamba.

2.5.1. *Materiales experimentales*

Los materiales empleados en las actividades experimentales se detallan en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Materiales experimentales utilizados.

Actividades de Investigación	Materiales y Equipos	Cantidad
Obtención y transporte de la muestra de suelo	Barreno	1
	Cinta métrica de 1m	1
	Cinta métrica de 50m	1
	Combo	1
	Cooler	1
	Cuerda	50m
	espátula	1
	Estacas de madera	4
	Estación metereológica portátil Krestel 3500	1
	fundas ziploc 25cmx25cm	5
	fundas ziploc 40cmx40cm	2
	GPS Garmin 73	1
	Guantes	3 pares
	Hielo	1 funda
	paños de limpieza	65
solución desinfectante	2 l	
Construcción de CCMs	Alambre de acero inoxidable N°3	1,5m
	Alambre de cobre de 0,6mm	2m
	Cauchos de 8cmx8xm	50

	Cutters	2
	Destornillador plano y tipo estrella	2
	Lagartos de conexión pequeños	25
	Papel celofán	1 pliego
	Pegamento instantáneo	10 barras
	Piezas de acrílico 5cmx5cm	48
	Tapones de caucho	25
	Piezas de acrílico 8cmx8cm	84
	Tejido de fibra de carbono de 0,015plg de espesor	1 yrd ²
	Tijeras	2
	Balanza analítica	
	Tornillos galvanizados de 4cm	96
Sistema de adquisición de datos	DAQ NI USB-6009	1
	Cable USB tipo AB	1
	Laptop	1
	Multímetro Digital DTB-830	1

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

2.5.2. *Materiales, reactivos y equipos de Laboratorio*

Los materiales empleados en las actividades experimentales se detallan en la tabla 4-2.

Tabla 2.5.2: Materiales, reactivos y equipos de laboratorio.

Materiales	Reactivos	Sustancias	Equipos
Balón de aforo de 500ml	Hidróxido de sodio	Polvo de grafito	Centrífuga
Probeta de 250 ml	Ácido Clorhídrico	Virutas de hierro	Balanza Analítica
Vaso de precipitación de 500ml	Ácido Sulfhídrico	Cloro comercial	Mufla
Peras de succión	Peroxidisulfato de Amonio	Agua destilada	Cámara extractora de gases
Pipetas de 10ml	Cloruro Férrico	N-metil-2-pirrolidona	
Piceta	Cloruro Ferroso		
Termómetro	Nitrógeno Gaseoso		
Reverbero con malla			
Soporte universal			
Pinza			
Bureta de 100 ml			
Balón de aforo de 250ml			

Tubos de ensayo para centrifuga			
Cápsula de porcelana 75 ml			
Erlenmeyer 100ml			
Recipiente plástico de 20 L			
Guantes de latex			
Mascarilla			

Realizado por: Pérez Miguel, 2019

2.6. Planteamiento de Hipótesis

2.6.1. Hipótesis Textual

El grafeno posee un mayor rendimiento en la producción de bioelectricidad en comparación a la magnetita como membranas de intercambio de electrones en celdas de combustible microbianas.

2.6.2. Hipótesis Estadísticas

2.6.2.1. Hipótesis Nula

Los materiales usados como membranas de intercambio de electrones tienen el mismo rendimiento en CCMs

$$H_0: \mu_G = \mu_M = \mu_B = \mu_{BCI}$$

2.6.2.2. Hipótesis Alternativa

Al menos uno de los materiales añadidos en la membrana anódica si produce un incremento en el rendimiento de las CCMs.

$$H_1: \text{Al menos un material causa un rendimiento diferente}$$

Donde:

μ_G = CCMs con grafeno como membrana de intercambio de electrones.

μ_M = CCMs con magnetita como membrana de intercambio de electrones.

μ_B = CCMs sin ningún material extra en le membrana de intercambio de electrones.

μ_{BCI} = CCMs con un imán como único material extra en le membrana de intercambio de electrones.

2.6.3. Variables

2.6.3.1. Independiente

Grafeno y Magnetita incorporados al tejido de fibra de carbono.

Tiempo

2.6.3.2. Dependientes

Voltaje generado

2.6.3.3. Intervinientes

- Condiciones de Laboratorio
- Tipo de Microorganismos
- Reacciones metabólicas en un ambiente anóxico
- Desgaste de materiales de la celda en condiciones de operación

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis físico-químico del inoculo usado (páramo de suelo alto andino)

Luego del muestreo realizado, los 1000g de suelo destinado para análisis fueron examinados en el Laboratorio de Suelos, Foliare y Aguas de la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonosanitario, los resultados se encuentran detallados en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Análisis de suelo

Parámetro Analizado	Método	Unidad	Resultado	Referencia		
				Bajo	Medio	Alto
pH	Electrométrico PEE/SFA/06 EPA 9045d	...	5.33			
Materia Orgánica	Volumétrico PEE/SFA/09	%	13.73	< 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
Nitrógeno	Volumétrico PEE/SFA/09	%	0.69	0 - 0.15	0.16 - 0.3	> 0.31
Fósforo	Colorimétrico PEE/SFA/11	mg/kg	<3.5	0 – 10.0	11.0 – 20.0	> 21.0
Potasio	Absorción Atómica PEE/SFA/12	cmol/kg	0.30	< 0.2	0.2 – 0.38	> 0.4
Calcio	Absorción Atómica PEE/SFA/12	cmol/kg	6.07	< 1.0	1.0 – 3.0	> 3.0
Magnesio	Absorción Atómica PEE/SFA/12	cmol/kg	1.23	< 0.33	0.34 – 0.66	> 0.66
Hierro	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg	406.8	0 – 20.0	21.0 – 40.0	> 41.0
Manganeso	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg	32.71	0 – 5.0	6.0 – 15.0	> 16.0
Cobre	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg	7.81	0 – 1.0	1.1 – 4.0	> 4.1
Zinc	Absorción Atómica PEE/SFA/13	mg/kg	6.87	0 - 3.0	3.1 – 6.0	> 6.1

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

3.1.1. Parámetros complementarios

Se analizó conductividad y porcentaje de humedad de la muestra de suelo en el Laboratorio de Protección Ambiental de la ESPOCH, los valores se representan en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Conductividad y % de Humedad

Parámetro	Valor	Unidad
Conductividad	100.1	μS/cm
% de Humedad	77.9	%

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

3.2. Parámetros meteorológicos de la zona de muestreo

En la Tabla 3-3 se representan los parámetros meteorológicos medidos en la zona de muestreo, utilizando una estación meteorológica portátil Krestel 3500.

Tabla 3-3: Parámetros Meteorológicos

Parámetros	Valores
Fecha de toma de factores ambientales	7/11/2018
Hora	9:32 am
Velocidad del viento/spd	4.7
Velocidad máxima del viento/spd	5
Avg de v velocidad del viento/spd	1.6
Temperatura/dEG/C	10.4
Temperatura del viento frio	7.2
Humedad	% 100
Índice de estrés térmico	%9.5
Punto de rocío	-3.4
Temperatura en bulbo húmedo	-1.5
Presión barométrica/baro/hPa	626.8
Altitud/ft	12723

Realizado por: Pérez, M. 2019

3.3. Materiales adicionales a la Membrana de la Cámara Anódica

3.3.1. Grafeno

Luego del baño ultrasónico realizado al polvo de grafito se obtuvieron 0.605g de grafeno, los cuales fueron esparcidos a lo largo de la membrana de la cámara anódica. De acuerdo a la figura 1-3 se manifiestan las láminas de grafeno en aproximadamente 5µm de espesor. Además, que el análisis espectroscópico determinó la concentración únicamente de carbono en su composición Gráfico 1-3.

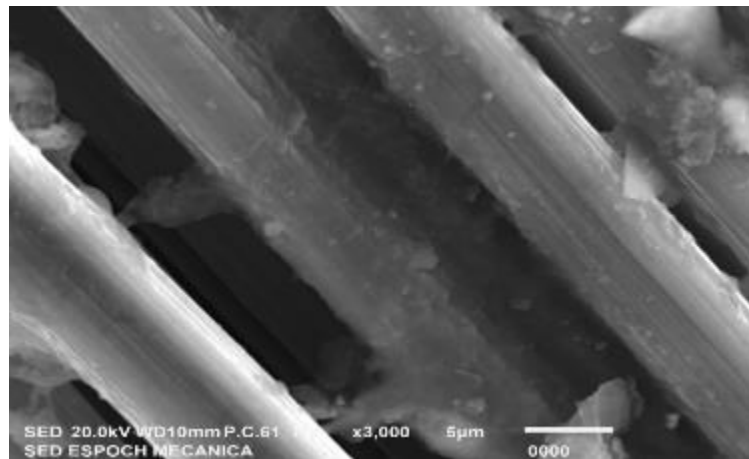
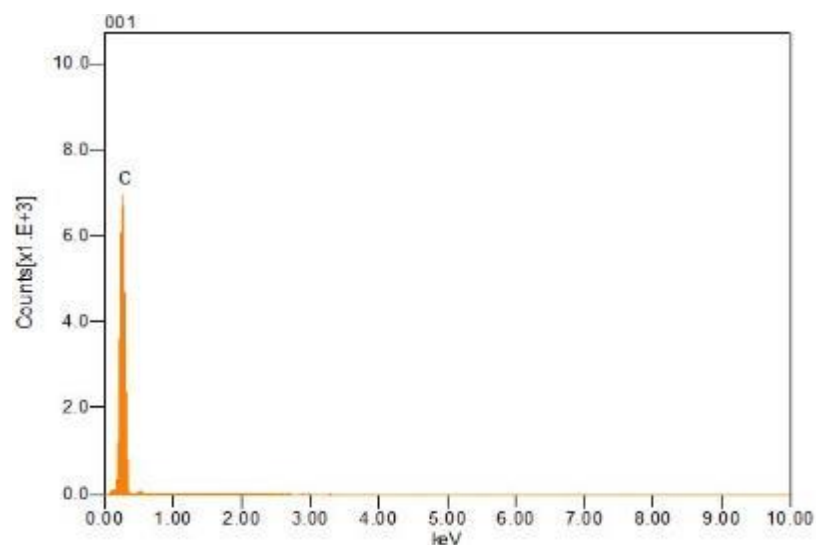


Figura 1-3. Presencia de Grafeno en la membrana visto en MEB

Realizado por: Pérez, M. 2019



Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	41.94	100.00	0.14	32515	0.4193530	K
Total	41.94	100.00				

Gráfico 1-3. Cromatograma de Grafeno

Realizado por: Pérez, M. 2019

3.3.2. Magnetita

Al final de la síntesis de magnetita se obtuvieron 11.75 g de magnetita, en la figura 2-3 se aprecia la estructura de este compuesto bajo observación en el MEB, donde las láminas obtenidas son de aproximadamente 20 μm , mientras que en el gráfico 2-3 se aprecia el cromatograma en el cual se indica su composición.

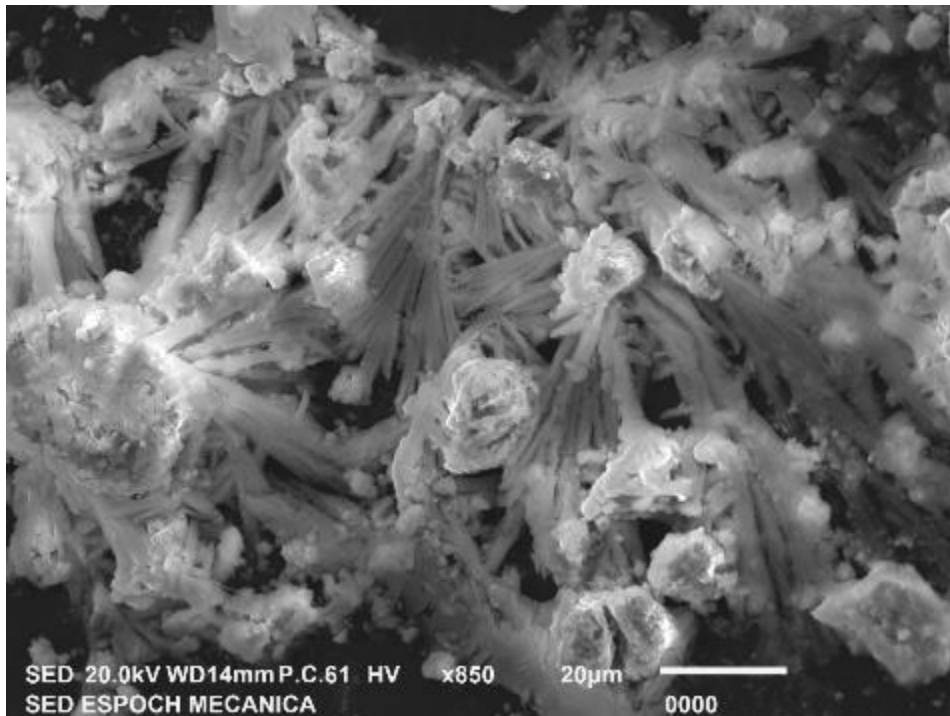
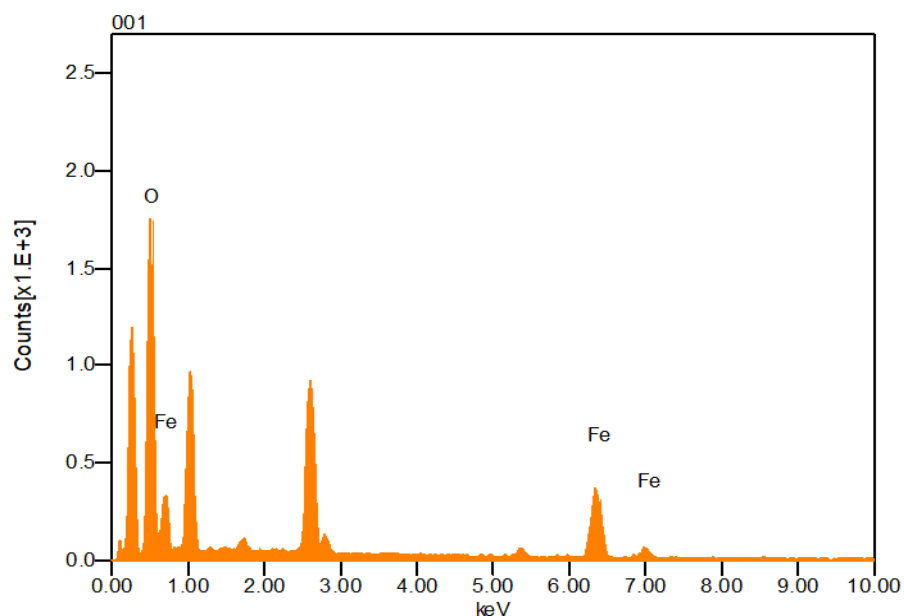


Figura 2-3. Magnetita vista en MEB

Realizado por: Pérez, M. 2019



Formula	mass%	Atom%	Sigma	Net	K ratio	Line
O	4.51	72.45	0.03	8785	0.0733034	K
Fe*	5.99	27.55	0.07	3419	0.0541271	K
Total	10.50	100.00				

Gráfico 2-3. Cromatograma de Magnetita

Realizado por: Pérez, M. 2019

3.4. Valores De Voltaje Generados

Tabla 4-3: Correspondencia de Celdas y tratamientos

Blanco	B1	Celda 1
Grafeno	G1	Celda 2
Magnetita	M1	Celda 3
Magnetita	M3	Celda 4
Blanco	B3	Celda 5
Grafeno	G3	Celda 6
Blanco + Imán	BCI1	Celda 7
Blanco + Imán	BCI3	Celda 8
Blanco	B2	Celda 9
Grafeno	G2	Celda 10
Blanco + Imán	BCI2	Celda 11
Magnetita	M2	Celda 12
Sustrato Inicial	SI	

Realizado por: Pérez, M. 2019

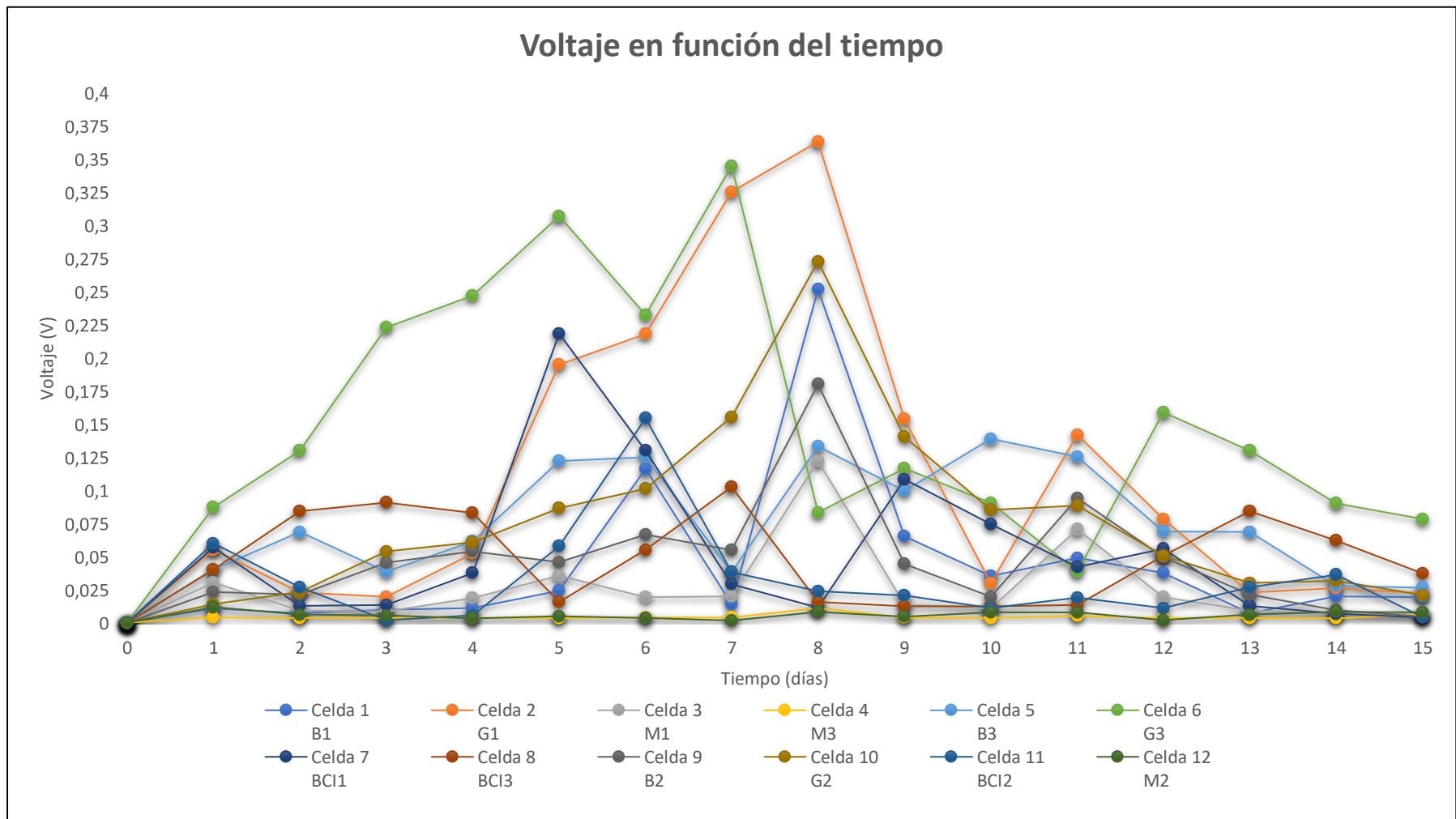


Gráfico 3-3. Voltaje en función del tiempo

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

La celda 1 correspondiente al tratamiento B1, presenta niveles bajos de voltaje durante los primeros 4 días para luego lograr un aumento en el día 5 hasta alcanzar su pico promedio máximo en el día 8 obteniendo un valor 0.252V, para luego reducir la bioelectricidad generada al paso de los días, hasta al final del monitoreo alcanzar un pico promedio de 0.019V. El tratamiento B2 propio de la celda 9, presentó una generación creciente de bioelectricidad, partiendo de 0.023V en el día 1 hasta conseguir un pico de 0.18V en el día 8 el cual a su vez se convirtió en el máximo alcanzado, a partir de ello decrece hasta un valor de 0.005V. La celda 5 (B3) mostró un inicio ascendente desde 0.04V hasta su pico máximo en el día 10, el cual fue de 0.139V siendo levemente mayor que 0.133V obtenidos en el día 8, existió una caída continua de voltaje hasta 0.026V resultantes en el día final. Cabe mencionar que todos los tratamientos B, fueron blancos, es decir celdas de configuración simple con su cátodo parcialmente expuesto al aire y sin material adicional en su membrana anódica.

Luego del monitoreo efectuado a lo largo de quince días, la celda 2 correspondiente a la primera réplica de grafeno presentó un pico inicial de 0.055V para luego descender en días posteriores hasta el día 4 en donde incrementó el voltaje generado hasta que consiguió un pico máximo promedio de 0.363 V en el día 8, posterior presentó un descenso progresivo hasta el día final en donde registró un valor de 0.022V. La celda 6 perteneciente a la tercera réplica de grafeno, mantuvo los picos superiores en relación a las demás celdas los días 2,3,4,5,12,13, 14 y 15 con un pico máximo promedio de 0.345V alcanzado en el día 7 de monitoreo, donde presentó una caída significativa al día siguiente manteniendo esta tendencia hasta el día 12 donde presentó un ligero crecimiento para al final del monitoreo marcar 0.078V. En adición, la celda 10, propia de la segunda réplica de grafeno, inició su monitoreo con valores cercanos a 0.010V con una tendencia ascendente hasta el día 8 en el que su pico máximo promedio se proyectó en 0.273V, al paso del tiempo los niveles de generación decayeron progresivamente marcando en el día 12 un voltaje de 0.05, para finalmente llegar a 0.021V en el día 15.

La celda 3 relacionada al tratamiento inicial de magnetita, mostró un desarrollo discreto en los días iniciales, su crecimiento fue lento con valores aproximados de 0.019V, hasta el día 8 donde su pico alcanzado fue de 0.122V, para luego caer nuevamente a 0.006V siendo su valor más bajo. Las celdas 4 y 12 que corresponden a los tratamientos número tres (M3) y dos (M2) de magnetita respectivamente, presentaron los picos de voltaje más bajos en toda la experimentación, manteniéndose ambas por debajo de los 0.010V, con una única excepción en el día 8, en el cual la celda 4 marca un pico de 0.011V, dónde además este fue su pico promedio más alto a lo largo del monitoreo. La celda 12 por su parte, registró su pico más alto en el día 1, con 0.012V. La tendencia a caer mostrada por estas celdas se mantuvo a lo largo del tiempo.

La celda 7 homologa al primer tratamiento de una celda blanco con un imán en su configuración (BCI1), inició con un valor cercano a 0.05V en días consecutivos experimenta un descenso leve, pero nuevamente los valores de bioelectricidad ascendieron hasta alcanzar su valor máximo de 0.218V en el quinto día, una vez más decreció hasta el día nueve cuyo valor obtenido fue 0.108V, finalmente decayó en el último día de monitoreo hasta un valor de 0.004V. La tercera réplica de una celda blanco junto con imán (BCI3), relacionado a la celda 8, mostró un inicio en ascenso, partiendo de 0.04V hasta una relativa estabilidad en los días siguientes de 0.09V, el séptimo día obtuvo 0.108V siendo el mayor valor registrado, al cabo del quince días su valor final fue de 0.037V. Finalmente, el tratamiento número de blanco con imán (BCI2) correspondiente a la celda 11 arrancó con un voltaje de 0.06V s, seguido de una leve caída, mantuvo esta tendencia hasta el cuarto día en el que los valores subieron progresivamente de 0.06V hasta 0.154V al séptimo día, este último fue su máximo valor promedio registrado, en contraste con 0.004V del día final de monitoreo. De manera más detallada, los datos se encuentran esquematizados en el Anexo A, estos a su vez ilustrados en el Gráfico 3-3.

3.5. Intensidad de corriente generada en las celdas

La intensidad de corriente generada en las celdas de combustible microbiano se determinó a partir de la Ley de Ohm, de acuerdo a la ecuación 1-3. Considerando los promedios diarios de voltaje producidos por cada una de las celdas.

ecuación 1-3.

$$I = \frac{V}{R}$$

Donde:

I = Intensidad de corriente eléctrica (A)

R = Resistencia externa de CCM's (1000Ω)

V = Voltaje generado por CCM's (V)

De esta manera los datos obtenidos se representan en el Anexo B, además que se esquematizan en el Gráfico 4-3.

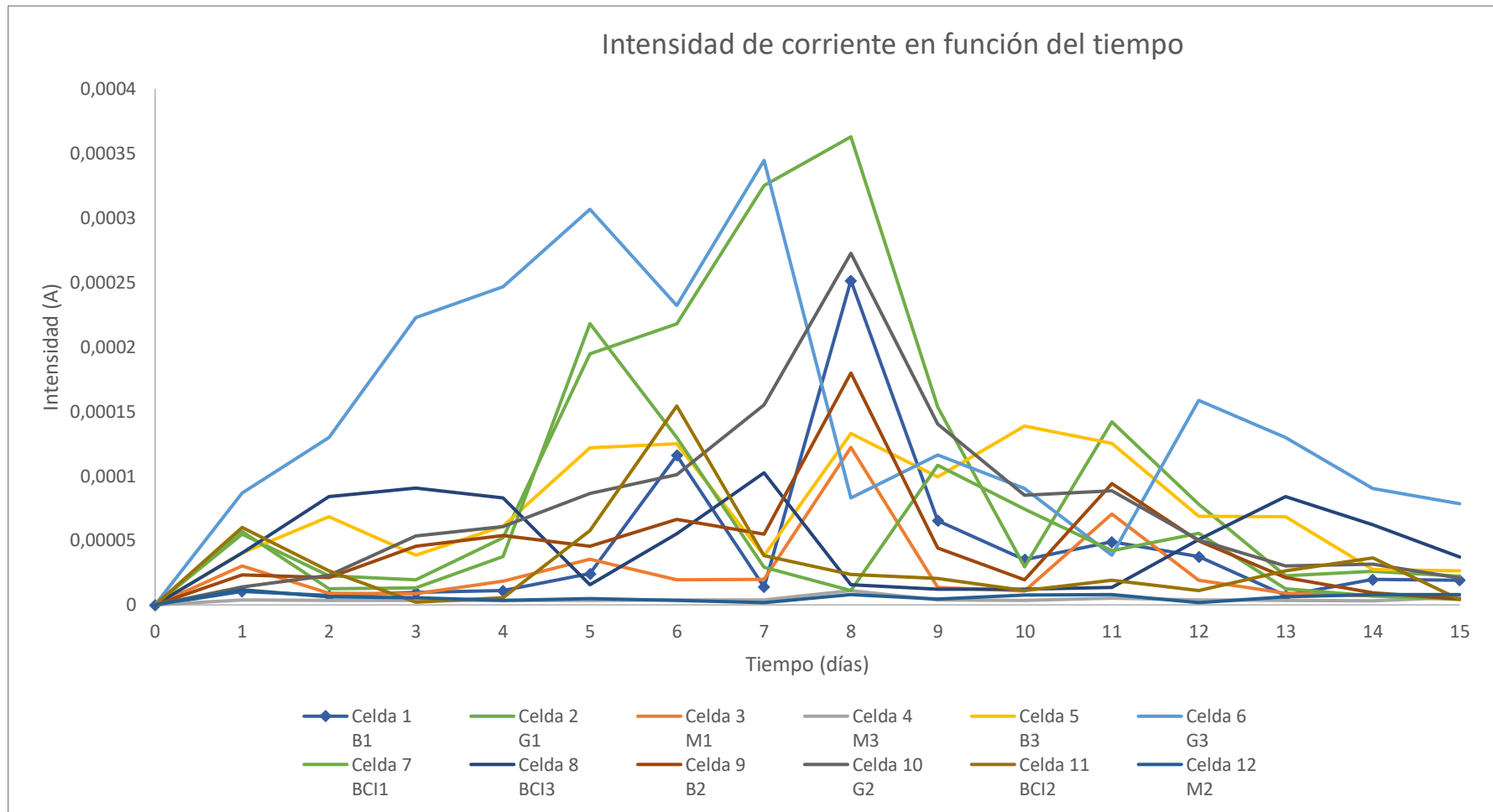


Gráfico 4-3. Intensidad de corriente en función del Tiempo

Realizado por: Pérez, M. 2019

De acuerdo al Anexo B, complementada con el gráfico 4-3, se puede decir que, en términos de intensidad, las celdas tienen un comportamiento similar al mostrado en su generación de voltaje, en donde las celdas 2 y 6 alcanzan los valores más altos, con picos máximos de 0.0003A y 0.00036A, en los días 7 y 8 respectivamente. Los valores más bajos de este parámetro, se registraron en las celdas 4 y 12 relacionadas a los tratamientos con magnetita 3 y 2, estas tuvieron valores constantes aproximados de $4 \times 10^{-6}A$, donde sus mayores picos alcanzados fueron en los días $5.3 \times 10^{-6}A$ en la celda 4 en el día 11, por su parte la número 12 alcanzó un valor de $8 \times 10^{-6}A$ en el día 8.

3.6. Densidad de Potencia

3.6.1. Área de la membrana de intercambio

Previo a la determinación de densidad de potencia, fue necesario conocer el área de la membrana en la cámara anódica, recordando que se trata de un cubo de 5 cm de arista, su membrana es una lámina cuadrada de igual dimensión. Esta magnitud se determinó a través de la ecuación 2-3, así:

Ecuación 2-3
$$A = 1 * 1$$

Donde:

A = área de la cámara anódica (m²)

S = Lado del cubo (m)

$$A = (0.05m)^2$$

$$A = 0.025m^2$$

3.6.2. Cálculo de Densidad de Potencia

La densidad de potencia se obtuvo mediante las interacciones entre voltaje e intensidad, relacionadas con el área de la cámara anódica, de acuerdo a la ecuación 3-3 indicada a continuación.

Ecuación 3-3
$$DP = \frac{V * I}{A}$$

Donde:

DP = Densidad de Potencia (mW/m²)

V = voltaje (V)

I = Intensidad de corriente (A)

A = Área de la cámara anódica (m²)

Los valores resultantes de DP para cada una de las celdas se encuentran detallados en el Anexo C, además representada en el gráfico 5-3.

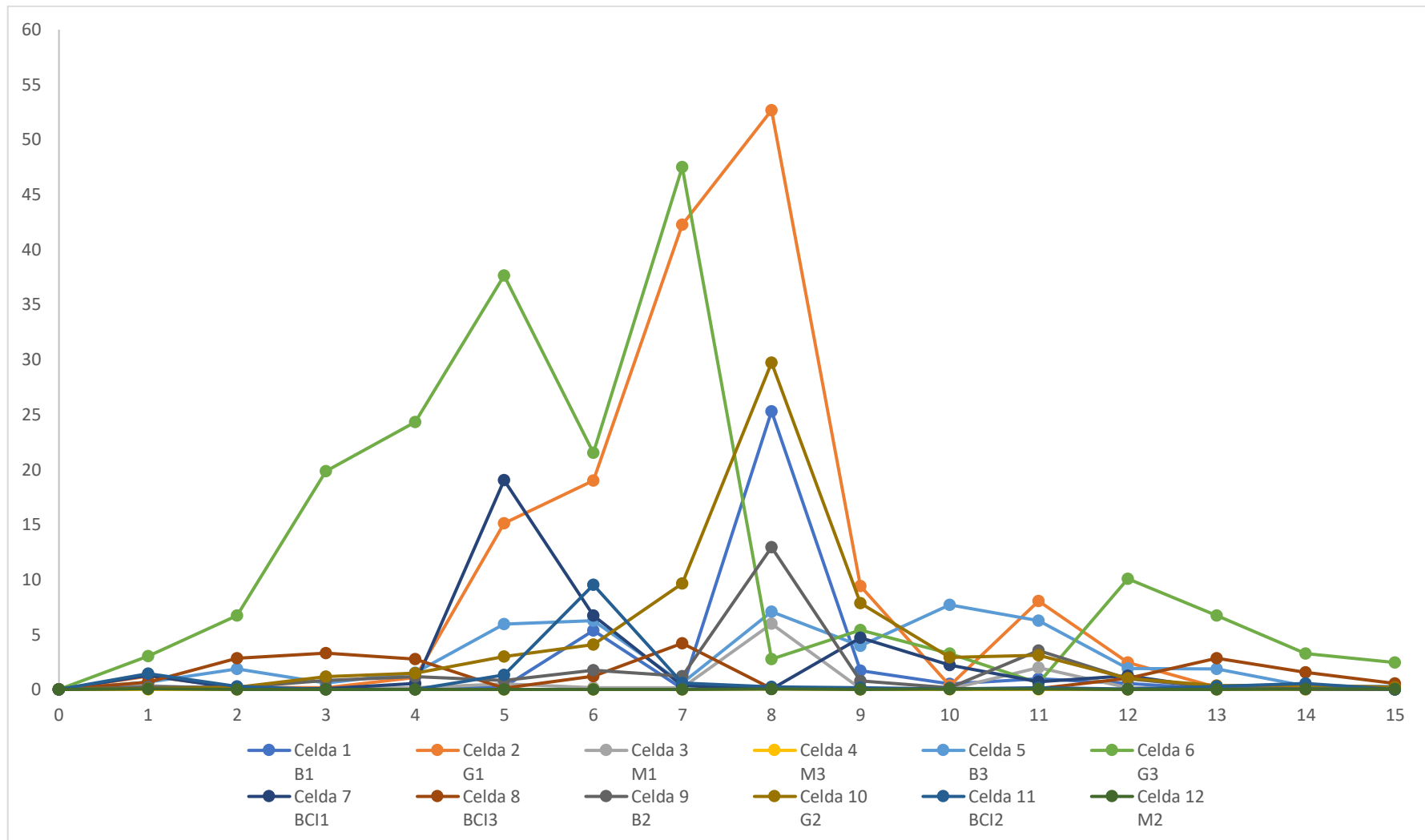


Gráfico 5-3. Densidad de Potencia

Realizado por: Pérez, M. 2019

Los valores de densidad de potencia obtenidos guardan relación con los datos de voltaje e intensidad, debido a que matemáticamente estos son directamente proporcionales entre sí. Los valores más altos se registraron por las celdas: dos, cuyo pico máximo fue el día 8 con un dato cercano a $52,675\text{mW/m}^2$; y seis, la cual registró su valor más elevado en el séptimo día de monitoreo siendo igual a $47,50\text{mW/m}^2$.

Las celdas tres, cuatro y doce correspondientes a los tratamientos con magnetita marcaron los valores más bajos de densidad de potencia, debido a que son también las con menor producción de bioelectricidad de acuerdo al voltaje generado por estas. Sus valores de DP máximos son de $5,96\text{mW/m}^2$, $0,0491\text{mW/m}^2$ y $0,0518\text{mW/m}^2$ respectivamente, todo esto de acuerdo al Anexo C, junto con el gráfico 5-3.

3.7. Análisis Elemental de sustratos empleados

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Protección Ambiental, usando el Equipo FLASH 2000, los elementos bajo análisis se organizan en la tabla 5-3.

Tabla 5-3: Análisis Elemental de Sustratos

Tratamiento	Peso de muestra (mg)	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)
G1	14,1	3,90	8,27	33,86	0,25
G2	13,7	4,05	7,97	29,66	0,27
G3	13,7	3,86	8,01	33,87	0,28
B1	14,4	4,00	9,27	36,11	0,28
B2	13,6	4,04	8,92	32,17	0,27
B3	13,7	4,04	9,21	32,99	0,26
M1	14,2	4,09	9,87	37,58	0,28
M2	14,6	3,95	8,91	33,19	0,26
M3	14,4	4,05	9,68	33,68	0,26
BCI1	13,8	4,00	9,14	33,54	0,27
BCI2	14,6	4,11	9,57	33,88	0,26
BCI3	13,8	3,93	9,39	33,86	0,27
SI	15,5	4,31	12,49	42,99	0,30

Realizado por: Pérez, M. 2019

3.8. pH

Tabla 6-3: pH de CCM's al final del monitoreo

Tratamiento	Celda	pH
B1	Celda 1	6,4
G1	Celda 2	7,2
M1	Celda 3	5,1
M3	Celda 4	4,8
B3	Celda 5	6,6
G3	Celda 6	6,9
MB1	Celda 7	7,2
MB3	Celda 8	6,8
B2	Celda 9	6,9
G2	Celda 10	7,5
MB2	Celda 11	6,7
M2	Celda 12	5,08

Realizado por: Pérez, M, 2019

3.9. Comprobación de Hipótesis

3.9.1. Pruebas de Normalidad

Para sustentar estadísticamente el presente trabajo, fue necesario realizar la comprobación de hipótesis, para esto se realizó, como primer paso, una prueba de normalidad de los datos de voltaje arrojados por las CCMs durante el periodo de monitoreo, esto se refleja en la tabla 7-3.

Tabla 7-3: Pruebas de Normalidad

		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Voltaje	BlancoCI	0,162	45	0,005	0,819	45	0,000
	Blanco	0,190	45	0,000	0,830	45	0,000
	Grafeno	0,190	45	0,000	0,869	45	0,000
	Magnetita	0,308	45	0,000	0,462	45	0,000

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

De acuerdo a lo plasmado en la tabla 7-3, se puede decir que en todos los casos los datos no siguen una distribución normal, esto debido a que el p-valor fue menor a 0,05 y con un nivel de confianza del 95% brindaron suficiente evidencia estadística para esa decisión.

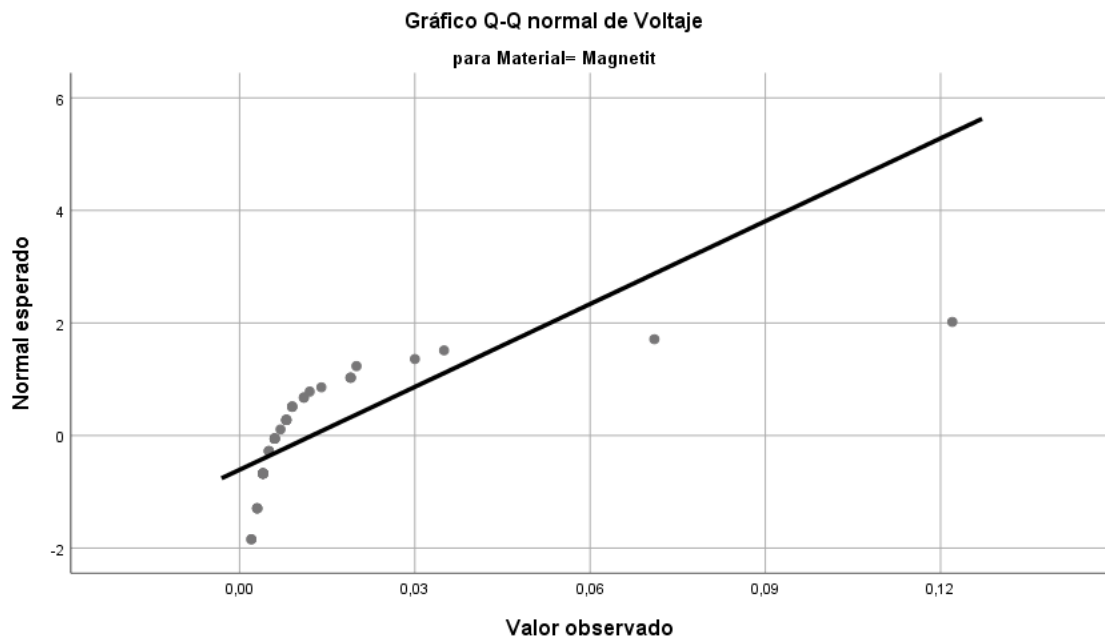


Gráfico 6-3: Representación de la normalidad de CCMs con magnetita

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

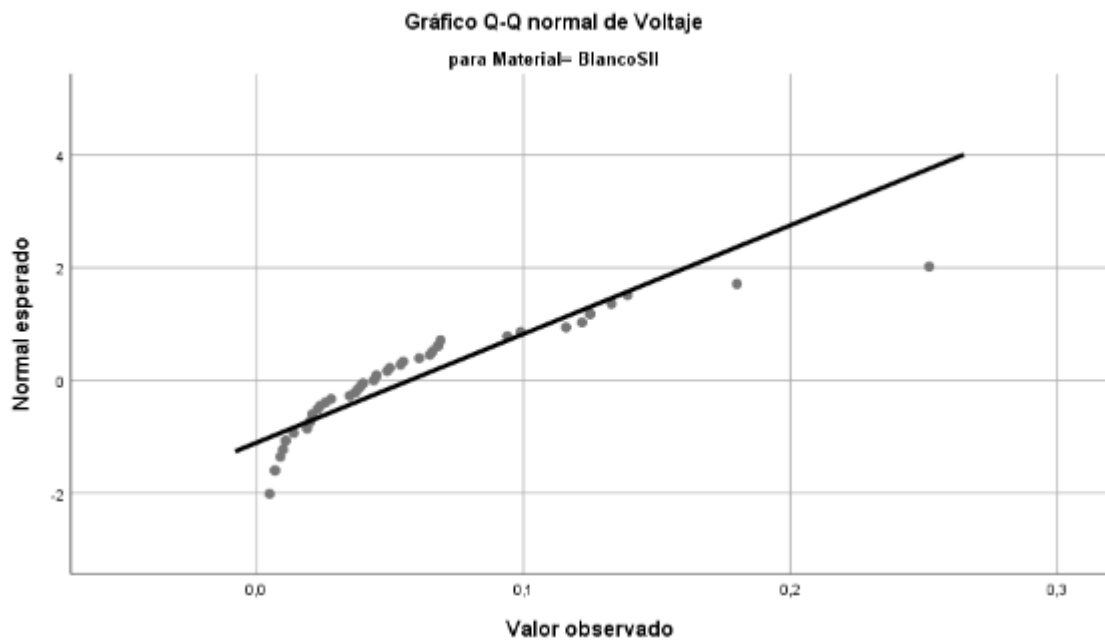


Gráfico 7-3: Representación de la normalidad de CCMs blancos

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

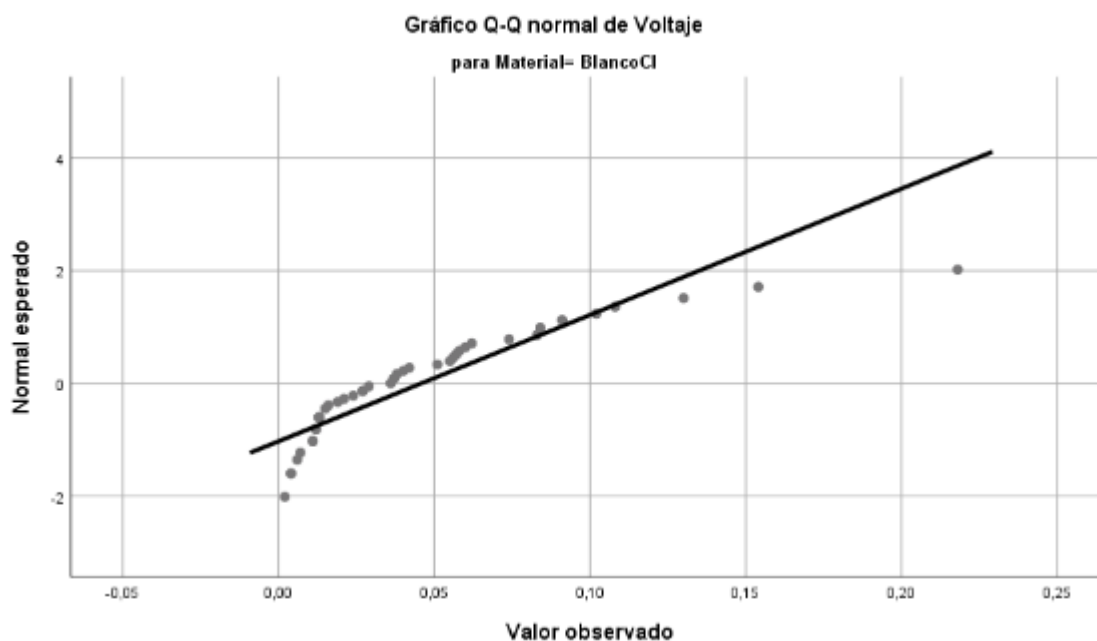


Gráfico 8-3: Representación de la normalidad de CCMs blancos con imán

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

3.9.2. Comparación de tratamientos

A causa de que los datos obtenidos no siguieron una distribución normal, se debió realizar pruebas no paramétricas para la comparación de tratamientos. En este caso se escogió la prueba de Kruskal-Wallis, por su versatilidad en este tipo de casos, donde se compara muestras independientes. Los valores obtenidos se registran en la tabla 8-3.

Tabla 8-3: Prueba de Kruskal-Wallis

Rangos				Estadísticos de prueba	
	N_Material	N	Rango promedio	Voltaje	
Voltaje	1.Grafeno	45	132,91	H de Kruskal-Wallis	81,021
	2.Magnetita	45	36,23		gl
	3.Blanco	45	102,41	Sig. asintótica	0,000
	4.BlancoCI	45	90,44		
	Total	180			

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Región de Rechazo

$$p \text{ valor} \leq \alpha \text{ Rechazar de la hipótesis nula}$$

Con un nivel de confianza del 95% y debido a que el p-valor fue inferior a 0,05 se tiene suficiente certeza para rechazar la hipótesis nula y aceptar que al menos uno de los materiales añadidos causa un rendimiento diferente en la producción de voltaje en CCMs.

3.9.3. Comparación de tratamientos en pares

La prueba de Kruskal-Wallis permitió conocer la diferencia de los tratamientos, entonces fue necesario realizar una comparación en pares donde se determinó cuáles de estos tiene diferencias significativas entre sí, para ello se emplearon las pruebas de Wilcoxon y Mann-Whitney.

3.9.3.1. Relación entre grafeno y magnetita

Planteamiento de Hipótesis

$$H_0: \mu_{G1} = \mu_{G2} = \mu_{G3} = \mu_{M1} = \mu_{M2} = \mu_{M3}$$

$$H_1: \text{Al menos 1 de las medias es diferente}$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Estadístico de Prueba

Prueba de Mann-Whitney y Wilcoxon

Tabla 9-3: Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitman para Grafeno y Magnetita.

Rangos					Estadístico de prueba	
Voltaje	N_Material	N	Rango promedio	Suma de rangos	Voltaje	
	1.Grafeno	45	66,40	2988,00	U de Mann-Whitney	72,000
	2.Magnetita	45	24,60	1107,00	W de Wilcoxon	1107,00
	Total	90			Z	-7,597
					Sig. asintótica(bilateral)	0,000

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Región de Rechazo

$Valor\ p \leq \alpha$ Rechazar de la hipótesis nula

La tabla 9-3 mostro un p-valor p de 0,00 menor a nivel de significancia (0,05) por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que al menos una de las medias de los tratamientos de Grafeno1, Grafeno 2, Grafeno 3, Magnetita 1, Magnetita 2 y Magnetita 3 fue a causa de un rendimiento diferente.

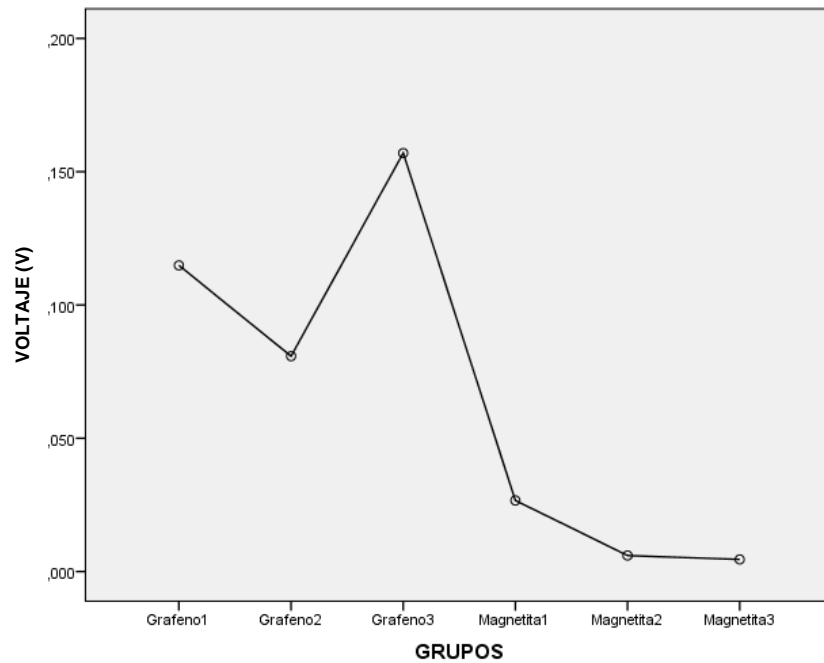


Gráfico 9-3. Voltaje promedio generado por los materiales de la membrana

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

El gráfico 9-3 de medias mostró que el tratamiento Grafeno 3 fue el más efectivo para obtener el voltaje; mientras que el tratamiento Magnetita 2 y Magnetita 3 fueron los menos efectivo.

3.9.3.2. Relación entre grafeno y blanco

Planteamiento de Hipótesis

$$H_0: \mu_{B1} = \mu_{B2} = \mu_{B3} = \mu_{G1} = \mu_{G2} = \mu_{G3}$$

H_1 : Al menos 1 de las medias es diferente

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Estadístico de Prueba

Prueba de Mann-Whitney y Wilcoxon

Tabla 10-3: Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitman para Grafeno y Blanco.

Rangos					Estadístico de prueba	
Voltaje	N_Material	N	Rango promedio	Suma de rangos	Voltaje	
	1.Grafeno	45	54,96	2473,00	U de Mann-Whitney	587,00
	3.Blanco	45	36,04	1622,00	W de Wilcoxon	1622,00
	Total	90			Z	-3,434
					Sig. asintótica(bilateral)	,001

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Región de Rechazo

$$p \text{ Valor} \leq \alpha \text{ Rechazar de la hipótesis nula}$$

Decisión

El valor de significancia de la prueba de Wilcoxon (0,001) de la tabla 10-3 mostró que es inferior al nivel de significancia (5%), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que al menos uno de los tratamientos compuestos de Blanco 1, Blanco 2, Blanco 3, Grafeno1, Grafeno 2 y Grafeno 3 tras el paso del tiempo, fue diferente.

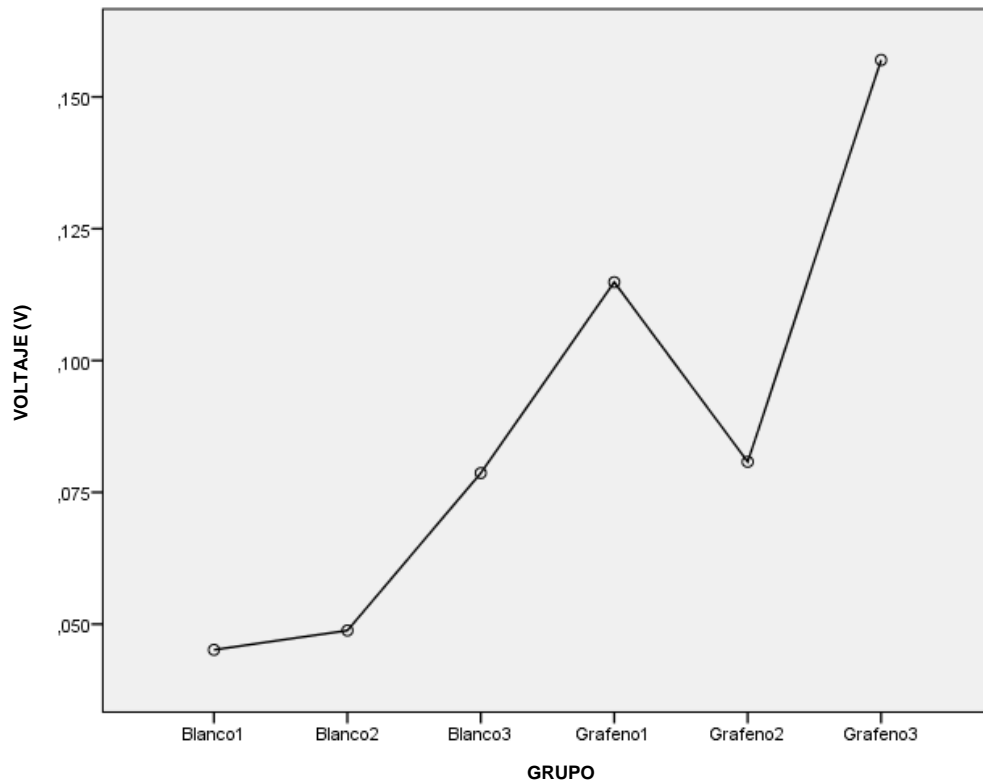


Gráfico 10-3: Comparación de medias de tratamientos

Realizado por: Pérez, M. 2019

El gráfico 10-3 mostró que el tratamiento de Grafeno 3 siguió siendo el más efectivo para obtener el voltaje; mientras que el Blanco 1 utilizado en la investigación presentó resultados inferiores

3.9.3.3. Relación entre grafeno y blanco con imán

Planteamiento de Hipótesis

$$H_0: \mu_{BC11} = \mu_{BC12} = \mu_{BC13} = \mu_{G1} = \mu_{G2} = \mu_{G3}$$

H_1 : Al menos 1 de las medias es diferente

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Estadístico de Prueba

Prueba de Mann-Whitney y Wilcoxon

Tabla 11-3: Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitman para Grafeno y Blanco con imán.

Rangos					Estadístico de prueba	
Voltaje	N_Material	N	Rango promedio	Suma de rangos	Voltaje	
	1.Grafeno	45	57,56	2590,00	U de Mann-Whitney	470,00
	3.BlancoCI	45	33,44	1505,00	W de Wilcoxon	1505,00
	Total	90			Z	-4,378
					Sig. asintótica(bilateral)	0,000

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Región de Rechazo

$$p \text{ Valor} \leq \alpha \text{ Rechazar de la hipótesis nula}$$

El p-valor de la tabla 11-3 mostró que es inferior al nivel de significancia (5%), por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que al menos uno de los tratamientos compuestos de Blanco con imán 1, Blanco con imán 2, Blanco con imán 3, Grafeno1, Grafeno 2 y Grafeno 3 tras el paso del tiempo, fue diferente.

3.9.3.4. Relación entre blanco y blanco con imán

Planteamiento de Hipótesis

$$H_0: \mu_{B1} = \mu_{B2} = \mu_{B3} = \mu_{BCI1} = \mu_{BCI2} = \mu_{BCI3}$$

$$H_1: \text{Al menos 1 de las medias es diferente}$$

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Estadístico de prueba

Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney

Tabla 12-3: Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney para blanco y blanco con imán

Rangos					Estadístico de prueba	
Voltaje	N_Material	N	Rango promedio	Suma de rangos	Voltaje	
	3.Blanco	45	48,90	2200,50	U de Mann-Whitney	859,500
	4.BlancoCI	45	42,10	1894,50	W de Wilcoxon	1894,500
	Total	90			Z	-1,235
					Sig. asintótica(bilateral)	0,217

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Región de Rechazo

$$Valor p \leq \alpha \text{ Rechazar de la hipótesis nula}$$

Decisión

El valor de significancia de la prueba señalada en la tabla 12-3 mostró que es superior al nivel de significancia (5%), por lo tanto, no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los tratamientos compuestos de Blanco 1, Blanco 2, Blanco 3, Blanco con Imán1, Blanco con Imán 2 y Blanco con Imán 3 no presento diferencia para obtener el voltaje.

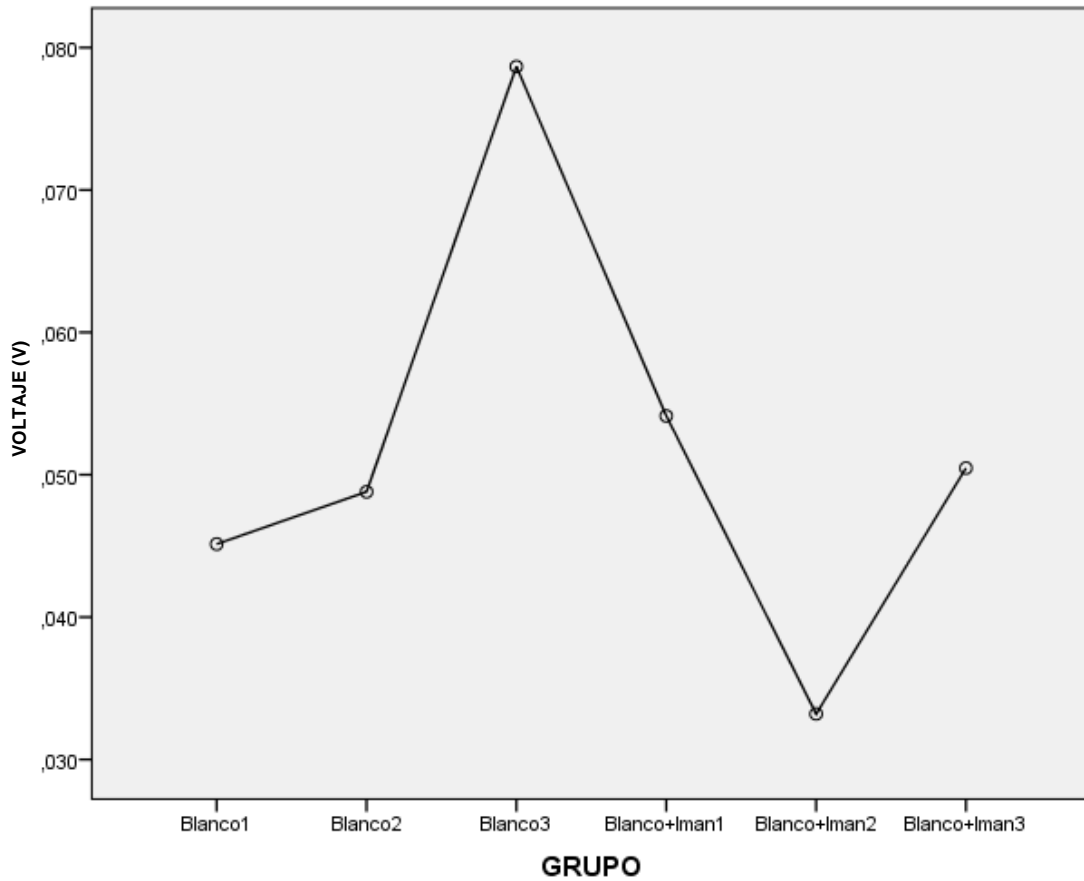


Gráfico 11-3. Comparación de medias de tratamientos

Realizado por: Pérez, M. 2019

El gráfico 11-3 mostró que el tratamiento de Blanco 3 es el más efectivo para obtener el voltaje; mientras que el tratamiento Blanco con Imán 3 presentó resultados inferiores.

3.9.3.5. Relación entre magnetita y blanco con imán

Planteamiento de Hipótesis

$$H_0: \mu_{M1} = \mu_{M2} = \mu_{M3} = \mu_{BCI1} = \mu_{BCI2} = \mu_{BCI3}$$

H_1 : Al menos 1 de las medias es diferente

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Estadístico de Prueba

Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney

Tabla 13-3: Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney para magnetita y blanco con imán

Rangos					Estadístico de prueba	
Voltaje	N_Material	N	Rango promedio	Suma de rangos	Voltaje	
	2.Magnetita	45	30,10	1354,50	U de Mann-Whitney	319,500
	4.BlancoCI	45	60,90	2740,50	W de Wilcoxon	1354,500
	Total	90			Z	-5,602
					Sig. asintótica(bilateral)	0,000

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

La tabla 13-3 mostró un p-valor de 0,00 menor a nivel de significancia (0,05), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que al menos una de las medias de los tratamientos de Magnetita 1, Magnetita 2, Magnetita 3, Blanco con Imán1, Blanco con Imán 2 y Blanco con Imán 3 fue diferente para obtener el voltaje.

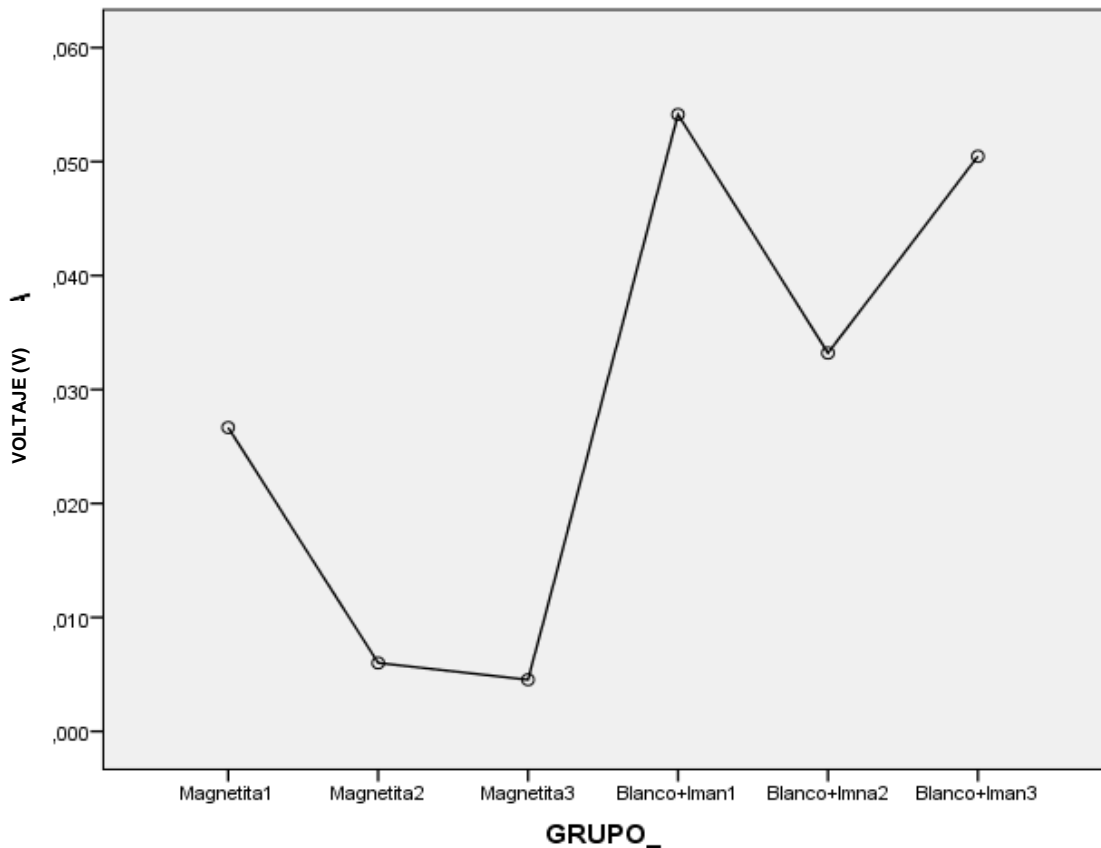


Gráfico 12-3. Comparación de medias de tratamientos

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

El gráfico 12-3 mostró que el tratamiento de Blanco con Imán 1 es el más efectivo para obtener el voltaje; mientras que el tratamiento Magnetita 3 presentó resultados inferiores.

3.9.3.6. Relación entre magnetita y blanco

Planteamiento de Hipótesis

$$H_0: \mu_{M1} = \mu_{M2} = \mu_{M3} = \mu_{B1} = \mu_{B2} = \mu_{B3}$$

H_1 : Al menos 1 de las medias es diferente

Nivel de significancia

$$\alpha = 0,05$$

Estadístico de Prueba

Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney

Tabla 14-3: Prueba de Wilcoxon y Mann-Whitney para magnetita y blanco

Rangos					Estadístico de prueba	
Voltaje	N_Material	N	Rango promedio	Suma de rangos	Voltaje	
	2.Magnetita	45	27,53	1239,00	U de Mann-Whitney	204,000
	3.Blanco	45	63,47	2856,00	W de Wilcoxon	1239,000
	Total	90			Z	-6,532
					Sig. asintótica(bilateral)	0,000

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

La tabla 14-3 mostró un p-valor de 0,00 menor a nivel de significancia (0,05), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que al menos una de las medias de los tratamientos de Magnetita 1, Magnetita 2, Magnetita 3, Blanco 1, Blanco 2 y Blanco 3 fue diferente para obtener el voltaje.

3.10. Discusión

Varios parámetros, tales como condiciones de operación, configuración del reactor, material del electrodo, tipo de membrana, el área de superficie del electrodo y la resistencia externa son determinantes para mejorar la producción y la estabilidad de bioelectricidad en una CCM (Kim et al., 2015a, p.5; Kim et al., 2015b, p.6)

Así, grandes esfuerzos se han dedicado a mejorar la generación de energía de MFC mediante la optimización de las configuraciones del sistema y los materiales (Franks & Nevin, 2010, p.902) y un progreso significativo ha sido hecho en los últimos años. Sin embargo, la salida de potencia de una CCM alcanzada actualmente es todavía insuficiente para una aplicación práctica. Por eso, los estudios sobre la recolección de energía todavía se están centrando a escalas pilotos de CCMs debido a que la energía de salida es demasiado pequeña para conducir electricidad a aparatos electrónicos que funciona con corriente directa, debido a que su requerimiento representa una alta potencia.

Y es potencialmente una posibilidad muy interesante, el mejorar densidades de potencia, por lo tanto, en este trabajo, el objetivo principal ha sido estudiar la relación entre la CCM influenciada por partículas de dos materiales altamente conductores y la densidad de potencia de salida en conjunto con la degradación de sus biomoléculas debido que, al tener un peso atómico bajo, esto los convierte en muy electronegativos, formando enlaces covalentes estables fuertes y de alta energía. De igual forma estas se unen entre sí para formar parte de las biomoléculas orgánicas como proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos, siendo requerimientos nutricionales esenciales como combustible para la generación de bioenergía.

En el presente estudio, la densidad de potencia media de las celdas que cuya membrana estuvo constituida por grafeno fue de $9,18\text{mW}/\text{m}^2$ con un voltaje promedio de 131mV , esto a comparación con los estudios de Yu (2018) en donde la densidad de potencia obtenida fue de $5\text{mW}/\text{m}^2$ en celdas en las cuales la configuración del ánodo fue de grafeno tridimensional, donde la membrana de intercambio fue de 30cm^2 , además que la cantidad de voltaje arrojada fue de 488mV . La densidad de potencia varía por la superficie de la membrana de intercambio, mientras que el voltaje por el modo de operación de las celdas.

El rendimiento de una CCM está determinado en términos de eficiencia de tratamiento y producción de electricidad, el propósito para la operación de las celdas es siempre obtener valores altos para ambos parámetros, sin embargo, este propósito resulta ser complicado alcanzar, porque si bien la eficacia del tratamiento depende de la población total de los microorganismos, la

producción de electricidad depende solo del porcentaje de microorganismos electrogénicos dentro de esta población total. Estos microorganismos electrogénicos están en competencia directa con microorganismos anaerobios facultativos y un aumento del volumen de la celda no siempre puede tener un efecto positivo sobre su predominio (W. N. Logroño, et al. 2015, p.6). De hecho, la formación de biopelículas de microorganismos electrogénicos en la superficie del ánodo; considerando que es el sitio donde ocurre un auge y transporte de electrones; puede verse afectado negativamente por esta competencia, especialmente si los microorganismos contenidos en la materia orgánica triunfan en la pugna por el sustrato. Tomando en cuenta este comentario, la Grafica 6-3 muestra los valores de voltaje producidos por cada uno de los tratamientos evaluados en función de los porcentajes de degradación de C, H, N y S medido antes y después del proceso de monitoreo y construcción de una CCM, considerando que no existió ciclos de alimentación en el transcurso del experimento, llevando a cabo una alimentación a modo Bach, sin embargo se puede establecer el cumplimiento de con lo expresado por Rahimnejad (2011) sobre la relación entre la degradación de sustratos y producción de voltaje.

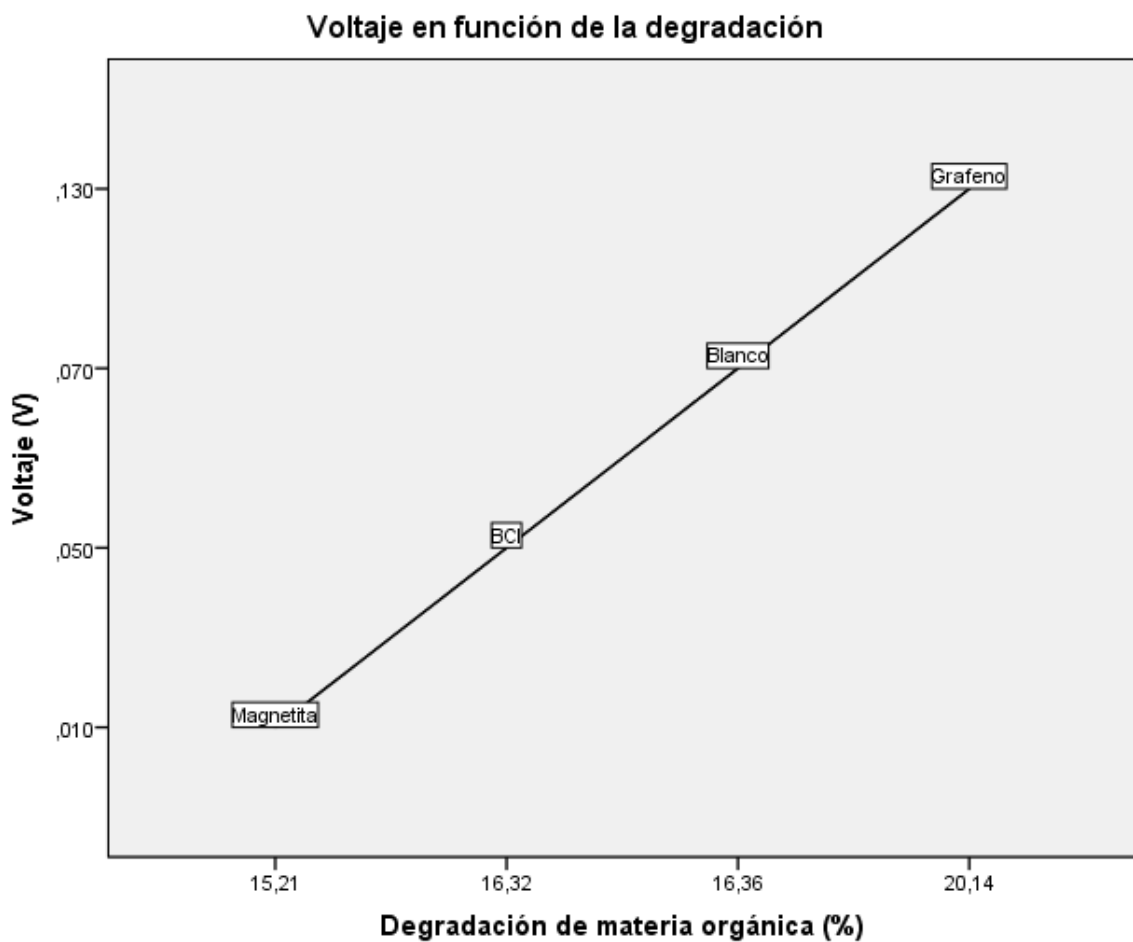


Gráfico 13-3: Voltaje en función de la degradación

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Como era de esperar, las tasas de eliminación de materia orgánica y la producción de voltaje muestran un mismo comportamiento. Los materiales sobreexposados sobre el compartimento anódico indican una mayor producción de voltaje. En el caso de grafeno, una degradación mayoritaria de la materia orgánica en comparación a sus grupos control. Esto de acuerdo a las investigaciones de Sun (2016), en donde resalta el uso de nuevas configuraciones de membranas en la cámara anódica; así entonces las celdas en las que se añadió grafeno presentaron una densidad de potencia 3,8 veces mayor a las que no poseían este material.

Las doce pruebas muestran las mismas tendencias con un aumento en el voltaje de salida desde la etapa de inicio hasta un estado estable y de declinación, esta fluctuación es característica de los procesos biológicos y puede ser explicada de acuerdo a un efecto de crecimiento microbiano donde se puede apreciar que la fase de latencia duró aproximadamente 4 días en donde las celdas tuvieron un crecimiento discreto en su mayoría, para luego de esto experimentar una fase exponencial donde los picos máximos alcanzados fluctuaban entre los 7 y 10 días de monitoreo, posterior, se evidenció una ligera etapa estacionaria de hasta 2 días de duración, para luego descender abruptamente con valores de voltaje cercanos a cero, marcando así presumiblemente la fase de muerte celular.

Así cuando las CCMs con grafeno generaba una densidad de potencia de salida máxima de 52.67mW/m^2 : sus parámetros químicos mostraban una reducción promedio de 8.60% de N, 35.29% de C, 24.49% de H y 12.16% de S. La tasa de consumo promedio para las CCMs de magnetita fue de 6.44% de N, 24.05% de C, 19.02% de H y 11.35% de S; mientras que su densidad de potencia en su máxima expresión presentaba valores de 5.96mW/m^2 . Al comparar las diferentes Pruebas, hay una clara influencia del compartimento anódico en el caso donde se utilizó grafeno tanto para una eficiencia de tratamiento y producción de bioelectricidad.

Probado en este trabajo, el voltaje de celda promedio más alto fue de 169mV operado con grafeno. Se alcanzó un pico máximo de 362mV y los más bajo fueron aquellas CCMs que funcionaba con magnetita (2mV). Conforme a los estudios de Liu (2018), en el cual se empleó magnetita en la cámara anódica, se alcanzaron valores de 642mV y 22mW/m^2 de densidad de potencia, esto difiere ampliamente con las celdas analizadas en el presente estudio donde la densidad de potencia media fue de 0.22mW/m^2 , presumiblemente debido al modo de operación y a la configuración de cámara de la celda. También es importante señalar que hay diferencias entre la celda operada con grafeno con respecto a la magnetita en relación a sus biomoléculas de sustratos analizadas entre que se aprecia una mayor degradación de C,H,N,S, sugiriendo un papel muy importante de los microorganismos fijados en el compartimento anódico. Por otra parte, la síntesis de las nanopartículas de magnetita, sin una adecuada purificación, conlleva a la presencia de ácidos en

su estructura lo que afecta al desarrollo del inóculo bacteriano en la cámara anódica, además que acidifica el medio (Nakamura et al., 2009, p.509).

Este concepto de electronegatividad por parte de los elementos analizados a nivel de traza por cada uno de los tratamientos propuestos es útil para discernir en una estructura que en ciertas regiones son posiblemente más ricas en electrones, a razón de mencionar que compuesto es significativamente iónico o no y en este caso en especial determinar si el requerimiento nutricional fue el más adecuado.

Se encontró que la fracción de C,H,N,S consumida por los microorganismos electrogénicos disminuyen 35.29, 24.49, 8.60 y 12.16% respectivamente en las pruebas con Grafeno. Esto claramente indica una mayor población asociada al electrodo de superficie promovida por el uso del material esparcido como tal en el que otros organismos puedan competir por el sustrato. Es importante señalar que la prueba realizada con Grafeno da un mejor rendimiento que la prueba realizada con la magnetita, una baja carga de N y S conduce a un aumento de significativo de densidad de potencia, además que las densidades máximas de potencia de grafeno fueron 42 veces más altas que la alcanzada con Magnetita.

Por lo tanto, los resultados mostrados en este trabajo demuestran que hay una clara influencia del material espolvoreado en la membrana anódica en la producción de electricidad y en el consumo de sus elementos químicos más básicos. De esta manera se asemeja a lo mencionado por Guo (2015) donde resalta la biocompatibilidad del grafeno con las celdas de combustible microbiano y la facilidad de descomposición del sustrato.

De acuerdo a (Kuroda et al., 1996, p.103) la mayor degradación de sustratos en este tipo de condiciones puede darse bajo una relación C/N menor a 2.8, lo que contrasta con (Wang et al., 2015, p.8) en cuyo estudio se determinó una degradación cercana al 60% con una relación C/N de 31.4. Por otra parte, en este estudio, todas las celdas fueron inicialmente constituidas con una relación C/N de 2.89.

CONCLUSIONES

- La membrana de intercambio de la cámara anódica con grafeno añadido presenta una densidad de potencia mayor 42 veces mayor que la obtenida con su similar de magnetita, por su parte la degradación de los sustratos es 1,34 veces superior en las celdas con el material compuesto de carbono a relación al material obtenido a partir de óxidos de hierro, además que con un nivel de confianza del 95% y con suficiente evidencia estadística se determina mayores niveles de voltaje en celdas con membranas de grafeno en relación a las de magnetita, por lo tanto, se comprueba un mayor rendimiento de grafeno contrastado con magnetita como membranas de intercambio de electrones.
- Las celdas de combustible microbianas empleadas en esta investigación fueron elaboradas a partir de acrílico de 3mm de espesor, de configuración simple, cuyos cátodos estuvieron expuestos parcialmente al aire, éstas fueron monitoreadas satisfactoriamente alcanzando valores de voltaje de 66mV y una densidad de potencia de 2,37 mW/m² lo que se demuestra que estas son capaces de producir de bioelectricidad.
- Las celdas de combustible microbianas que poseían grafeno añadido en la membrana de la cámara anódica produjeron mayor cantidad de voltaje promedio (131mV), lo que incurrió también en valores superiores de densidad de potencia (9,17mW/m²), además lograron una mejor degradación de los sustratos a comparación de las celdas que presentaron magnetita en el bioánodo, las cuales, además, mostraron una inferior generación de voltaje (14mV) por consecuencia su densidad de potencia también fue menor cercana a 0,22mW/m².
- El voltaje producido por las CCMs se incrementó a medida que la degradación de los sustratos fue mayor, aproximadamente 14mV por cada punto porcentual de degradación, por ende, la remoción de la mezcla 50:50 (frutas-verduras) a causa de los microorganismos electrogénicos presentes en el interior de la cámara anódica, permitió la liberación de electrones, los cuales establecieron un flujo a través de las membranas de las estructuras de las celdas dando paso a la transformación electroquímica de material orgánico a bioelectricidad.

RECOMENDACIONES

- Evaluar nuevas combinaciones de materiales en el electrodo como grafeno/polyester, paladio/grafeno, nanopartículas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ entre otros, los cuales beneficien en la aplicabilidad de las CCMs como fuente de energía.
- Utilizar soluciones buffer alcalinas para mantener los niveles de pH óptimos dentro de las CCMs
- Elaborar ánodos de siliceno debido a sus propiedades semejantes al grafeno como material conductor y biocompatible.
- Indagar en la búsqueda de nuevas configuraciones de celdas de combustible que potencien la captación de electrones en la cámara anódica para una mayor producción de bioelectricidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. **ALCOLEA, C.**, *Obtención de grafeno mediante métodos químicos de exfoliación*. [en línea]. Universidad Pontificia ICAI ICADE, Madrid: España, 2013: [Consulta: 1 febrero 2019]. Disponible en: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/519351c82d4a7.pdf>.
2. **BRUTINEL, E.D. y GRALNICK, J.A.** "Shuttling happens: soluble flavin mediators of extracellular electron transfer in *Shewanella*". *Applied Microbiology and Biotechnology* [en línea], 2012, 93(1), pp. 41-48. [Consulta: 7 febrero 2019]. ISSN 0175-7598. DOI 10.1007/s00253-011-3653-0. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s00253-011-3653-0>.
3. **BUSALMEN, J.P., ESTEVE-NUÑEZ, A. y FELIU, J.M.** "Whole Cell Electrochemistry of Electricity-Producing Microorganisms Evidence an Adaptation for Optimal Exocellular Electron Transport". *Environmental Science & Technology* [en línea], 2008, 42(7), pp. 2445-2450. [Consulta: 15 febrero 2019]. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es702569y. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es702569y>.
4. **CALLISTER, W.**, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Reverté, S. Barcelona: España, 2007.
5. **DEEPIKA, J., MEIGNANALAKSHMI, S. y RICHARD THILAGARAJ, W.** "A study on bioelectricity production by the synergistic action of *Bacillus tequilensis* DMR-5 and *Pseudomonas aeruginosa* DMR-3 isolated from rumen fluid". *American Journal of Environmental Sciences* [en línea], 2013, 9(5), pp. 424-430. ISSN 1553345X. DOI 10.3844/ajessp.2013.424.430.
6. **DORFNER, K.** *Ion exchangers*. 1991. S.l.: Walter de Gruyter. ISBN 9783110103410.
7. **DU, Z., LI, H. y GU, T.** A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances* [en línea], 2007, 25(5), pp. 464-482. [Consulta: 7 febrero 2019]. ISSN 07349750. DOI 10.1016/j.biotechadv.2007.05.004. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975007000547>.

8. **FALCÓN, A., LOZANO, E. y JUÁREZ, K.** "Bioelectricidad". *BioTecnología* [en línea], 2009, 13(1), pp. 62-78. [Consulta: 15 febrero 2019]. Disponible en: <https://studylib.es/doc/6945601/bioelectricidad>.
9. **FENG, Y., et.al.** "Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells". *Journal of Power Sources* [en línea], 2010, 195(7), pp. 1841-1844. [Consulta: 29 abril 2019]. ISSN 0378-7753. DOI 10.1016/J.JPOWSOUR.2009.10.030. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775309018321>.
10. **FRANKS, A.E. y NEVIN, K.P.** "Microbial fuel cells, a current review". *Energies* [en línea], 2010, 3(5), pp. 899-919. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en3050899.
11. **GÁMEZ GALICIA, E.,** Evaluación De La Eficiencia De Operación De Una Celda Microbiana De Biocombustible Utilizando Sistemas Electrónicos (Tesis) (Maestría) [en línea]. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México. 2016. [Consulta: 23 enero 2019]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/9981/3/Tesis.pdf>.
12. **GEIM, A.K. y NOVOSELOV, K.S.** "The rise of graphene". *Nature Materials* [en línea], 2007, 6(3), pp. 183-191. [Consulta: 1 febrero 2019]. ISSN 1476-1122. DOI 10.1038/nmat1849. Disponible en: <http://www.nature.com/articles/nmat1849>.
13. **GHASEMI, M., et.al.** "New generation of carbon nanocomposite proton exchange membranes in microbial fuel cell systems". *Chemical Engineering Journal* [en línea], 2012, 184(1), pp. 82-89. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 1385-8947. DOI 10.1016/J.CEJ.2012.01.001. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894712000046>.
14. **GUO, K., et.al.** "Heat-treated stainless steel felt as scalable anode material for bioelectrochemical systems". *Bioresour. Technol.* [en línea], 2015, 195(1), pp. 46-50. ISSN 18732976. DOI 10.1016/j.biortech.2015.06.060. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.060>.
15. **HERNÁNDEZ, R., et..al.** "Obtención A Nivel Laboratorio De Cloruro Ferroso A Partir De Residuos De Hierro". *Conciencia Tecnológica*, 2003

16. **HOLMES, D.E., et.al.** "Potential role of a novel psychrotolerant member of the family Geobacteraceae, *Geopsychrobacter electrophilus* gen. nov., sp. nov., in electricity production by a marine sediment fuel cell". *Applied and environmental microbiology* [en línea], 2004, 70(10), pp. 6023-6030. [Consulta: 31 enero 2019]. ISSN 0099-2240. DOI 10.1128/AEM.70.10.6023-6030.2004. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15466546>.
17. **HOSKINS, D.L., et.al.** "Spray-on polyvinyl alcohol separators and impact on power production in air-cathode microbial fuel cells with different solution conductivities". *Bioresource Technology* [en línea], 2014, 172(1), pp. 156-161. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 0960-8524. DOI 10.1016/J.BIORTECH.2014.09.004. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414012553>.
18. **HOU, L., WANG, L., ROYER, S. y ZHANG, H.** "Ultrasound-assisted heterogeneous Fenton-like degradation of tetracycline over a magnetite catalyst". *Journal of Hazardous Materials* [en línea], 2016, 302(1), pp. 458-467. [Consulta: 31 enero 2019]. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2015.09.033. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26521091>.
19. **JAFARY, T., et.al.** "Assessment of bioelectricity production in microbial fuel cells through series and parallel connections". *Energy Conversion and Management* [en línea], 2013, 75, pp. 256-262. [Consulta: 14 febrero 2019]. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2013.06.032. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890413003440>.
20. **JIANG, Y., et.al.** "Periodic polarity reversal for stabilizing the pH in two-chamber microbial electrolysis cells". *Applied Energy* [en línea], 2016, 165, pp. 670-675. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.01.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.001>.
21. **KALATHIL, S., PATIL, S.A. y PANT, D.** "Microbial Fuel Cells: Electrode Materials". *Reference Module in Chemistry Molecular Sciences and Chemical Engineering* [en línea], 2017, S.I:Elsevier, [Consulta: 14 febrero 2019].
22. **KATSNELSON, M.I.** "Graphene: carbon in two dimensions". *Materials Today* [en línea],

- 2007, 10(1-2), pp. 20-27. [Consulta: 1 febrero 2019]. ISSN 1369-7021. DOI 10.1016/S1369-7021(06)71788-6. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702106717886>.
23. **KHAN M. REZA, ASW KURNY y FAHMIDA G.** "Photocatalytic Degradation of Methylene Blue by Magnetite+H₂O₂+UV Process". *International Journal of Environmental Science and Development* [en línea], 2016, vol. 7, pp. 325-329. [Consulta: 31 enero 2019]. DOI 10.7763/IJESD.2016.V7.793. Disponible en: <http://www.ijesd.org/vol7/793-M0010.pdf>.
24. **KIM, H., KIM, B. y YU, J.** "Power generation response to readily biodegradable COD in single-chamber microbial fuel cells". *Bioresource Technology* [en línea], 2015, 186(1), pp. 136-140. [Consulta: 2 septiembre 2019]. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2015.03.066. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852415003983>.
25. **KIM, K.-Y., YANG, W. y LOGAN, B.** "Impact of electrode configurations on retention time and domestic wastewater treatment efficiency using microbial fuel cells". *Water Research* [en línea], 2015, 80(1), pp. 41-46. [Consulta: 2 septiembre 2019]. ISSN 0043-1354. DOI 10.1016/J.WATRES.2015.05.021. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135415003000>.
26. **KUMAR, P., et.al.** "Polymer Electrolyte Membranes for Microbial Fuel Cells: Part A. Nafion-Based Membranes". *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells* [en línea], 2018, pp. 47-72. DOI 10.1016/B978-0-444-64017-8.00004-X. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978044464017800004X>.
27. **KUMAR, R., SINGH, L. y ZULARISAM, A.** "Microbial Fuel Cells: Types and Applications". *Waste Biomass Management – A Holistic Approach* [en línea], 2017, pp. 367-384. [Consulta: 25 enero 2019]. DOI 10.1007/978-3-319-49595-8_16. Disponible en: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-49595-8_16.
28. **KURODA, M., WATANABE, T. y UMEDU, Y.** "Simultaneous oxidation and reduction treatments of polluted water by a bio-electro reactor". *Water Science and Technology* [en línea], 1996, 34(9), pp. 101-108. [Consulta: 11 julio 2019]. ISSN 0273-1223. DOI 10.1016/S0273-1223(96)00792-5. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273122396007925>.

29. **LI, S., CHENG, C. y THOMAS, A.** "Carbon-Based Microbial-Fuel-Cell Electrodes: From Conductive Supports to Active Catalysts". *Advanced Materials* [en línea], 2017, 29(8), pp. 1602547. [Consulta: 14 febrero 2019]. ISSN 09359648. DOI 10.1002/adma.201602547. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201602547>.
30. **LIU, H. y LOGAN, B.** "Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane". *Environmental Science & Technology* [en línea], 2004, 38(14), pp. 4040-4046. [Consulta: 25 enero 2019]. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es0499344. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0499344>.
31. **LIU, L. y CHOI, S.** "Self-sustaining, solar-driven bioelectricity generation in micro-sized microbial fuel cell using co-culture of heterotrophic and photosynthetic bacteria". *Journal of Power Sources* [en línea], 2017, 348 (1), pp. 138-144. [Consulta: 7 febrero 2019]. ISSN 0378-7753. DOI 10.1016/J.JPOWSOUR.2017.03.014. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775317302987>.
32. **LIU, P., et.al.** "Stimulated electron transfer inside electroactive biofilm by magnetite for increased performance microbial fuel cell". *Applied Energy* [en línea], 2018, 216(1), pp. 382-388. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2018.01.073. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.073>.
33. **LLAMBÍ, L.D., et.al.** *Ecología, Hidrología y Suelos del Páramo*[en línea]. Quito-Ecuador: FONAG, 2012. [Consulta: 23 enero 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/263280481>.
34. **LOGAN, B.E., et.al.** "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology". *Environmental Science & Technology* [en línea], 2006, 40(17), pp. 5181-5192. [Consulta: 25 enero 2019]. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es0605016. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0605016>.
35. **LOGROÑO, W., et.al.**"A terrestrial single chamber microbial fuel cell-based biosensor for biochemical oxygen demand of synthetic ricewashed wastewater". *Sensors* [en línea], 2016, (Switzerland) 16(1). ISSN 14248220. DOI 10.3390/s16010101.
36. **LOGROÑO, W., et.al.** "Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic

microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater". *Chemosphere*, vol. 176, 2017, pp. 378-388. ISSN 18791298. DOI 10.1016/j.chemosphere.2017.02.099.

37. **LOGROÑO, W.N., et.al.** "Bioconversion of organic solid wastes with soils from the Amazonian and high Andean regions of Ecuador in single chamber microbial fuel cells | Bioconversión de residuos sólidos orgánicos con suelos de la región Amazónica y alto andina del Ecuador en celdas". *Informacion Tecnologica*, vol. 26, no. 2(2015), pp. 61-68. ISSN 07180764 07168756. DOI 10.4067/S0718-07642015000200008.
38. **LOVLEY, D.** "Extracellular electron transfer: wires, capacitors, iron lungs, and more". *Geobiology* [en línea], 2008, 6(3), pp. 225-231. [Consulta: 15 febrero 2019]. ISSN 1472-4677. DOI 10.1111/j.1472-4669.2008.00148.x. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1472-4669.2008.00148.x>.
39. **MASSAZZA, D., et.al.** "New ceramic electrodes allow reaching the target current density in bioelectrochemical systems". *Energy & Environmental Science* [en línea], 2015, 8(9), pp. 2707-2712. [Consulta: 14 febrero 2019]. ISSN 1754-5692. DOI 10.1039/C5EE01498K. Disponible en: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5EE01498K>.
40. **MEHTA, V. y COOPER, J.S.** "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing". *Journal of Power Sources* [en línea], 2003, 114(1), pp. 32-53. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 0378-7753. DOI 10.1016/S0378-7753(02)00542-6. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775302005426>.
41. **MENA VÁZCONEZ, P.** "Los páramos ecuatorianos: Paisajes diversos, frágiles y estratégicos" [en línea], 2010, pp. 97-122. [Consulta: 23 enero 2019]. Disponible en: <https://afese.com/img/revistas/revista54/paramos.pdf>.
42. **MINISTERIO DE ELECTRICIDAD Y ENERGÍA RENOVABLE.** *Balance Energético Nacional 2016* [en línea], 2017, Disponible en: https://issuu.com/sectoresestrategicos/docs/balance_energetico_2016.
43. **NAKAMURA, R., et.al.** "Self-Constructed Electrically Conductive Bacterial Networks". *Angew. Chem. Int.* [en línea], 2009, 48(1), pp. 508-511. [Consulta: 1 febrero 2019]. DOI

10.1002/anie.200804750. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/anie.200804750>.

44. **NANDY, A. y KUNDU, P.P.** "Configurations of Microbial Fuel Cells". *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells* [en línea], 2018, Elsevier, pp. 25-45. [Consulta: 7 febrero 2019]. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444640178000038>.
45. **NOVAL, V.E., et.al.** "Magnetita (Fe₃O₄): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea". [en línea]. 2015, [Consulta: 30 enero 2019]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v46n1/0120-2804-rcq-46-01-00042.pdf>.
46. **ORTIZ, G., MORENO, L. y JIMÉNEZ, J.** "Bacterias Eléctricas". *UPO* [en línea]. 2017. [Consulta: 24 enero 2019]. Disponible en: https://www.upo.es/moleq1a/export/sites/moleq1a/documentos/Articulo_destacado_numero_4.pdf.
47. **PANT, D., et.al.** "A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production". *Bioresource Technology* [en línea], 2010, 101(6), pp. 1533-1543. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2009.10.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>.
48. **PARK, J.-D. y REN, Z.** "Efficient energy harvester for microbial fuel cells using DC/DC converters". *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* [en línea]. 2011a, pp. 3852-3858. [Consulta: 1 febrero 2019]. ISBN 978-1-4577-0542-7. DOI 10.1109/ECCE.2011.6064292. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6064292/>.
49. **PARK, J.-D. y REN, Z.** "Efficient energy harvester for microbial fuel cells using DC/DC converters". *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* [en línea], 2011b, pp. 3852-3858. [Consulta: 25 enero 2019]. ISBN 978-1-4577-0542-7. DOI 10.1109/ECCE.2011.6064292. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6064292/>.
50. **PHUNG, N.T., et.al.** "Analysis of microbial diversity in oligotrophic microbial fuel cells using 16S rDNA sequences". *FEMS Microbiology Letters* [en línea], 2004, 24(1), pp. 77-82. [Consulta: 14 febrero 2019]. ISSN 03781097. DOI 10.1016/j.femsle.2004.01.041. Disponible en: <https://academic.oup.com/femsle/article-lookup/doi/10.1016/j.femsle.2004.01.041>.

51. **POCAZNOI, D., et.al.** "Stainless steel is a promising electrode material for anodes of microbial fuel cells". *Energy & Environmental Science* [en línea], 2012, 5(11), pp. 9645-9652. [Consulta: 14 febrero 2019]. DOI 10.1039/C2EE22429A. Disponible en: http://oatao.univ-toulouse.fr/7885/1/Erable_7855.pdf.
52. **PODWOJEWSKI, PASCAL y POULENARD.** "Los suelos de los paramos del Ecuador". [en línea], 2000. [Consulta: 23 enero 2019]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/282170002>.
53. **POGGI, H.M., et.al.** "Effect of inoculum type on the performance of a microbial fuel cell fed with spent organic extracts from hydrogenogenic fermentation of organic solid wastes". *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*, 2009, 12(1), pp. 49-54. ISSN 14802422.
54. **RABAEY, K. y VERSTRAETE, W.** "Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation". *Trends in Biotechnology*, 2005, 23(6), pp. 291-298. ISSN 01677799. DOI 10.1016/j.tibtech.2005.04.008.
55. **RAHIMNEJAD, et.al.** "Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review". *Alexandria Engineering Journal* [en línea], 2015, 54(3), pp. 745-756. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 1110-0168. DOI 10.1016/J.AEJ.2015.03.031. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815000484>.
56. **RAHIMNEJAD, M., et.al.** "Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations". *Applied Energy* [en línea], 2011, 88(11), pp. 3999-4004. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2011.04.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.017>.
57. **REVELO, D.M., HURTADO, N.H. y RUIZ, J.** "Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica". *Información tecnológica* [en línea], 2013, 24(6), pp. 7-8. [Consulta: 24 enero 2019]. ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642013000600004. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S071807642013000600004&lng=en&nrm=iso&tlng=en.
58. **RODRÍGUEZ, A.** "Grafeno: Síntesis, Propiedades Y Aplicaciones Biomédicas" [en línea]. 2016. [Consulta: 25 enero 2019]. Disponible en:

<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/ALBA RODRIGUEZ VILLALON.pdf>.

59. **ROGERS, K.R.** *Biosensors for environmental applications*. [en línea], vol. 10, 1995.pp. 533-541.
60. **SALWAN, S., et.al.** "Review of the membrane and bipolar plates materials for conventional and unitized regenerative fuel cells". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2009, 13(6-7), pp. 1663-1668. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/J.RSER.2008.09.029. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001676>.
61. **SCOTT, K., MURANO, C. y RIMBU, G.** "A tubular microbial fuel cell". *Journal of Applied Electrochemistry* [en línea], 2007, 37(9), pp. 1063-1068. [Consulta: 7 febrero 2019]. ISSN 0021-891X. DOI 10.1007/s10800-007-9355-8. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s10800-007-9355-8>.
62. **STANKOVICH, S., et.al.** "Graphene-based composite materials". *Nature* [en línea], 2006, 442(7100), pp. 282-286. [Consulta: 1 febrero 2019]. ISSN 0028-0836. DOI 10.1038/nature04969. Disponible en: <http://www.nature.com/articles/nature04969>.
63. **STARBIRD, R.** "Síntesis de nanopartículas magnéticas de óxido de hierro para la remoción de arsénico del agua de consumo humano Synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles toward arsenic removal from drinking water". [en línea], 2015. [Consulta: 31 enero 2019]. Disponible en: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00045.pdf>.
64. **SUN, H., et.al.** "Performance and recent improvement in microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal: A review". *Journal of Environmental Sciences* [en línea], 2016a, (China) 39(1), pp. 242-248. ISSN 10010742. DOI 10.1016/j.jes.2015.12.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.006>.
65. **SUN, H., et.al.** "Performance and recent improvement in microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal: A review". *Journal of Environmental Sciences* [en línea], 2016b, vol. 39, pp. 242-248. [Consulta: 4 julio 2019]. ISSN 1001-0742. DOI 10.1016/J.JES.2015.12.006. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100107421500474X>.

66. **TINNESAND, M.** El Grafeno. El próximo material maravilloso. *Chematters*, 2012, pp. 1-3.
67. **VANEGAS, M.E., et.al.** "Síntesis y caracterización de nanopartículas magnéticas del tipo Fe₃O₄/TiO₂, efecto del pH en la dispersión y estabilización en soluciones acuosas". *Maskana* [en línea], 2014. [Consulta: 31 enero 2019]. Disponible en: [http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5584/1/MASKANA 5104.pdf](http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5584/1/MASKANA%205104.pdf).
68. **VENKATA MOHAN, S., et.al.** "Microbial fuel cell: Critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], 2014, 40(1), pp. 779-797. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2014.07.109. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114005619>.
69. **WANG, C.-T., et.al.** "Effect of Composting Parameters on the Power Performance of Solid Microbial Fuel Cells". *Sustainability* [en línea], 2015, 7(9), pp. 12634-12643. [Consulta: 4 julio 2019]. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su70912634. Disponible en: <http://www.mdpi.com/2071-1050/7/9/12634>.
70. **YONG, X.-Y., et.al.** "Enhancement of bioelectricity generation by cofactor manipulation in microbial fuel cell". *Biosensors & bioelectronics* [en línea], 2014, 56(1), pp. 19-25. [Consulta: 14 febrero 2019]. ISSN 1873-4235. DOI 10.1016/j.bios.2013.12.058. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24445069>.
71. **YU, F., WANG, C. y MA, J.** "Capacitance-enhanced 3D graphene anode for microbial fuel cell with long-time electricity generation stability". *Electrochimica Acta* [en línea], 2018, vol. 259, pp. 1059-1067. ISSN 00134686. DOI 10.1016/j.electacta.2017.11.038. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.11.038>.
72. **ZHOU, M., et.al.** "An overview of electrode materials in microbial fuel cells". *Journal of Power Sources* [en línea], 2011, 196(10), pp. 4427-4435. [Consulta: 14 febrero 2019]. ISSN 0378-7753. DOI 10.1016/J.JPOWSOUR.2011.01.012. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877531100084X>.
73. **ZHOU, M., et.al.** "Recent advances in microbial fuel cells (MFCs) and microbial electrolysis cells (MECs) for wastewater treatment, bioenergy and bioproducts". *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* [en línea], 2013, 88(4), pp. 508-518. [Consulta:

7 febrero 2019]. ISSN 02682575. DOI 10.1002/jctb.4004. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/jctb.4004>.

74. **ZHUANG, L., et.al.** "Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment". *Bioresource Technology* [en línea], 2012, vol. 106, pp. 82-88. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2011.11.019. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22197329>.

75. **ZUO, Y., CHENG, S. y LOGAN, B.** "Ion Exchange Membrane Cathodes for Scalable Microbial Fuel Cells". *Environmental Science & Technology* [en línea], 2008, 42(18), pp. 6967-6972. [Consulta: 8 febrero 2019]. ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/es801055r. Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es801055r>.

ANEXOS

Anexo A. Valores de diferencia de potencial generados por las celdas al cabo de 15 días de monitoreo medido en Voltios (V)

Tiempo (d) Celda		Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
		B1	Celda 1	0	0,011	0,007	0,010	0,011	0,024	0,116	0,014	0,252	0,005	0,005	0,149	0,037	0,007
G1	Celda 2	0	0,055	0,023	0,019	0,052	0,194	0,218	0,325	0,363	0,153	0,030	0,142	0,078	0,023	0,026	0,022
M1	Celda 3	0	0,030	0,009	0,009	0,019	0,035	0,019	0,020	0,122	0,014	0,011	0,071	0,019	0,009	0,007	0,006
M3	Celda 4	0	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,011	0,004	0,004	0,005	0,004	0,004	0,003	0,006
B3	Celda 5	0	0,040	0,068	0,039	0,061	0,122	0,125	0,038	0,133	0,099	0,139	0,125	0,069	0,068	0,028	0,026
G3	Celda 6	0	0,087	0,130	0,223	0,247	0,307	0,232	0,345	0,083	0,116	0,090	0,038	0,159	0,130	0,090	0,078
BCI1	Celda 7	0	0,057	0,013	0,013	0,037	0,218	0,130	0,029	0,011	0,108	0,074	0,042	0,056	0,013	0,007	0,004
BCI3	Celda 8	0	0,040	0,084	0,091	0,083	0,016	0,055	0,102	0,015	0,012	0,012	0,013	0,051	0,084	0,037	0,062
B2	Celda 9	0	0,023	0,021	0,045	0,054	0,045	0,066	0,055	0,180	0,044	0,020	0,094	0,050	0,021	0,009	0,035
G2	Celda 10	0	0,014	0,023	0,054	0,061	0,086	0,101	0,155	0,273	0,140	0,015	0,088	0,050	0,030	0,031	0,021
BCI2	Celda 11	0	0,060	0,027	0,002	0,006	0,058	0,154	0,038	0,024	0,021	0,011	0,019	0,011	0,027	0,036	0,004
M2	Celda 12	0	0,012	0,006	0,006	0,003	0,005	0,003	0,002	0,008	0,005	0,008	0,008	0,002	0,006	0,008	0,008

Realizado por: Pérez, M. 2019

Anexo B. Intensidad de corriente de CCM's medida en amperios (A)

Celda \ Tiempo (d)		0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
		0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
B1	Celda 1	0	1,1E-05	7,3E-06	9,6E-06	1,1E-05	2,4E-05	1,2E-04	1,4E-05	2,5E-04	6,5E-05	3,5E-05	4,9E-05	3,7E-05	7,3E-06	2,0E-05	1,9E-05
G1	Celda 2	0	5,5E-05	2,3E-05	1,9E-05	5,2E-05	1,9E-04	2,2E-04	3,3E-04	3,6E-04	1,5E-04	3,0E-05	1,4E-04	7,8E-05	2,3E-05	2,6E-05	2,2E-05
M1	Celda 3	0	3,0E-05	9,1E-06	8,6E-06	1,9E-05	3,5E-05	1,9E-05	2,0E-05	1,2E-04	1,4E-05	1,1E-05	7,1E-05	1,9E-05	9,1E-06	6,8E-06	6,0E-06
M3	Celda 4	0	3,8E-06	3,6E-06	3,5E-06	3,6E-06	3,5E-06	3,9E-06	4,0E-06	1,1E-05	3,9E-06	3,6E-06	5,3E-06	3,7E-06	3,6E-06	3,2E-06	6,1E-06
B3	Celda 5	0	4,0E-05	6,8E-05	3,9E-05	6,1E-05	1,2E-04	1,2E-04	3,8E-05	1,3E-04	9,9E-05	1,4E-04	1,3E-04	6,9E-05	6,8E-05	2,8E-05	2,6E-05
G3	Celda 6	0	8,7E-05	1,3E-04	2,2E-04	2,5E-04	3,1E-04	2,3E-04	3,4E-04	8,3E-05	1,2E-04	9,0E-05	3,8E-05	1,6E-04	1,3E-04	9,0E-05	7,8E-05
BCI1	Celda 7	0	5,7E-05	1,3E-05	1,3E-05	3,7E-05	2,2E-04	1,3E-04	2,9E-05	1,1E-05	1,1E-04	7,4E-05	4,2E-05	5,6E-05	1,3E-05	7,0E-06	4,0E-06
BCI3	Celda 8	0	4,0E-05	8,4E-05	9,1E-05	8,3E-05	1,6E-05	5,5E-05	1,0E-04	1,5E-05	1,2E-05	1,2E-05	1,3E-05	5,1E-05	8,4E-05	6,2E-05	3,7E-05
B2	Celda 9	0	2,3E-05	2,1E-05	4,5E-05	5,4E-05	4,5E-05	6,6E-05	5,5E-05	1,8E-04	4,4E-05	2,0E-05	9,4E-05	5,0E-05	2,1E-05	9,4E-06	4,6E-06
G2	Celda 10	0	1,4E-05	2,3E-05	5,4E-05	6,1E-05	8,6E-05	1,0E-04	1,6E-04	2,7E-04	1,4E-04	8,5E-05	8,8E-05	5,0E-05	3,0E-05	3,1E-05	2,1E-05
BCI2	Celda 11	0	6,0E-05	2,7E-05	2,0E-06	5,7E-06	5,8E-05	1,5E-04	3,8E-05	2,4E-05	2,1E-05	1,1E-05	1,9E-05	1,1E-05	2,7E-05	3,6E-05	4,2E-06
M2	Celda 12	0	1,2E-05	6,2E-06	5,7E-06	3,4E-06	4,7E-06	3,5E-06	1,7E-06	8,0E-06	4,6E-06	7,8E-06	7,9E-06	1,9E-06	6,2E-06	8,0E-06	7,9E-06

Realizado por: Pérez, Miguel, 2019

Anexo C. Densidad de Potencia en CCM's medidas en mW/m²





		Tiempo (días)															
		Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Día 11	Día 12	Día 13	Día 14	Día 15
B1	Celda 1	0	0,045	0,021	0,037	0,050	0,234	5,377	0,078	25,303	1,703	0,493	0,958	0,558	0,021	0,156	0,146
G1	Celda 2	0	1,207	0,207	0,151	1,086	15,128	18,984	42,251	52,675	9,412	0,351	8,055	2,441	0,207	0,273	0,197
M1	Celda 3	0	0,367	0,033	0,029	0,138	0,503	0,150	0,156	5,964	0,075	0,046	1,990	0,146	0,033	0,019	0,015
M3	Celda 4	0	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,049	0,006	0,005	0,011	0,005	0,005	0,004	0,015
B3	Celda 5	0	0,645	1,875	0,594	1,498	5,939	6,249	0,584	7,076	3,946	7,691	6,265	1,885	1,875	0,305	0,279
G3	Celda 6	0	3,020	6,729	19,841	24,327	37,644	21,530	47,501	2,763	5,415	3,255	0,592	10,073	6,729	3,248	2,453
BCI1	Celda 7	0	1,292	0,063	0,071	0,561	19,025	6,731	0,339	0,051	4,694	2,212	0,705	1,241	0,063	0,020	0,007
BCI3	Celda 8	0	0,646	2,825	3,293	2,750	0,098	1,214	4,197	0,096	0,061	0,060	0,073	1,022	2,825	1,538	0,548
B2	Celda 9	0	0,216	0,177	0,823	1,157	0,827	1,767	1,204	12,931	0,780	0,153	3,534	0,986	0,177	0,036	0,009
G2	Celda 10	0	0,079	0,212	1,150	1,469	2,989	4,082	9,617	29,718	7,862	2,901	3,124	1,019	0,362	0,396	0,175
BCI2	Celda 11	0	1,441	0,282	0,002	0,013	1,327	9,508	0,583	0,225	0,170	0,050	0,144	0,048	0,282	0,527	0,007
M2	Celda 12	0	0,055	0,015	0,013	0,005	0,009	0,005	0,001	0,026	0,008	0,024	0,025	0,001	0,015	0,026	0,025

Realizado por: Pérez, M. 2019

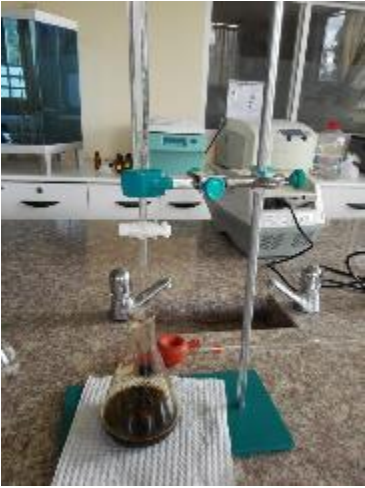



Anexo D. Evidencias Fotográficas del desarrollo del trabajo.

<p>a)</p> 	<p>b)</p> 	<p>c)</p> 	<p>d)</p> 
<p>Descripción</p> <p>a) Análisis en el equipo Flash 2000</p> <p>b) Preparación de muestras previo análisis de sustratos.</p> <p>c) CCMs monitoreadas</p> <p>d) Fibra de carbono en el Microscopio electrónico</p>	<p>TRABAJO DE TITULACIÓN</p> <p>TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN</p> <p>“EVALUACIÓN DE GRAFENO Y MAGNETITA COMO MEMBRANAS DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”</p>	<p>ESPOCH</p> <p>FACUTAD DE CIENCIAS</p> <p>ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS</p> <p>ING. EN BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL.</p>	
		<p>Lámina</p> <p>1</p>	<p>Fecha</p> <p>09/09/2019</p>

Realizado por: Pérez, M. 2019

<p>e)</p> 	<p>f)</p> 	<p>g)</p> 	<p>h)</p> 
<p>Descripción</p> <p>e) Magnetita Sintetizada f) Esterilización de componentes de CCMs g) Exfoliación de grafeno h) Análisis de pH de la cámara anódica</p>	<p>TRABAJO DE TITULACIÓN TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “EVALUACIÓN DE GRAFENO Y MAGNETITA COMO MEMBRANAS DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”</p>	<p>ESPOCH FACUTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS ING. EN BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL.</p>	
		<p>Lámina 2</p>	<p>Fecha 09/09/2019</p>

Realizado por: Pérez, M. 2019

<p>i)</p> 	<p>j)</p> 	<p>k)</p> 	<p>l)</p> 
<p>Descripción</p> <p>i) Síntesis de Magnetita j) Monitoreo inicial de CCMs k) Construcción de CCMs l) Preparación de la muestra de suelo de paramo</p>	<p>TRABAJO DE TITULACIÓN TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN “EVALUACIÓN DE GRAFENO Y MAGNETITA COMO MEMBRANAS DE INTERCAMBIO DE ELECTRONES EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS”</p>	<p>ESPOCH FACUTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS ING. EN BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL.</p>	
		<p>Lámina 3</p>	<p>Fecha 09/09/2019</p>

Realizado por: Pérez, M. 2019