

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

## **INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL VALLE DE MORELIA**

**“DESARROLLO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO COMO  
BIOSENSORES ELECTROQUÍMICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD  
DEL SUELO.”**

### **TESIS**

QUE PRESENTA:

**MARÍA DE JESÚS ABELLANEDA ATANACIO  
LISSET JACOBO GAMIÑO**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

ASESOR:

**JOSÉ DIEGO BÁRCENAS TORRES**

MORELIA, MICHOACÁN, OCTUBRE DE 2022





**ANEXO III**  
**FORMATO DE LIBERACIÓN DEL PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL**

Morelia, Mich., a **28/septiembre/2022**

Área: Ingenierías  
Oficio: Ding/142/2022  
Expediente: Titulación

Asunto: Liberación de Proyecto  
para Titulación Integral

**MARÍA ELENA GALLEGOS GARCÍA**  
**JEFA DE DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**  
**PRESENTE**

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del Estudiante:	María de Jesús Abellaneda Atanacio
Carrera:	Ingeniería Ambiental
N° de Control:	14850381
Nombre del Proyecto:	"DESARROLLO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO COMO BIOSENSORES ELECTROQUÍMICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO."
Producto:	Tesis

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica  
"Hombre, Tierra y Ciencia hacia el progreso"



**ALEJANDRO ROMERO BAUTISTA**  
**JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍAS**

<b>JOSÉ DIEGO BÁRCENAS TORRES</b>	<b>CLAUDIA PALOMARES RODRÍGUEZ</b>	<b>ALEJANDRO ROMERO BAUTISTA</b>
NOMBRE Y FIRMA ASESOR	NOMBRE Y FIRMA REVISOR	NOMBRE Y FIRMA REVISOR





**ANEXO III**  
**FORMATO DE LIBERACIÓN DEL PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL**

Morelia, Mich., a **28/septiembre/2022**

Área: Ingenierías  
Oficio: Ding/143/2022  
Expediente: Titulación

Asunto: Liberación de Proyecto  
para Titulación Integral

**MARÍA ELENA GALLEGOS GARCÍA**  
**JEFA DE DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES**  
**PRESENTE**

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del Estudiante:	Lisset Jacobo Gamiño
Carrera:	Ingeniería Ambiental
N° de Control:	14850284
Nombre del Proyecto:	"DESARROLLO DE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANO COMO BIOSENSORES ELECTROQUÍMICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL SUELO."
Producto:	Tesis

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica  
"Hombre, Tierra y Ciencia hacia el progreso"



**ALEJANDRO ROMERO BAUTISTA**  
**JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍAS**

<b>JOSÉ DIEGO BARCENÁS TORRES</b>	<b>CLAUDIA PALOMARES RODRÍGUEZ</b>	<b>ALEJANDRO ROMERO BAUTISTA</b>
NOMBRE Y FIRMA ASESOR	NOMBRE Y FIRMA REVISOR	NOMBRE Y FIRMA REVISOR



## DEDICATORIA

A mis padres: Blas Avellaneda y Octaviana Atanacio (+), mi padre por darme la fuerza y coraje para alcanzar mis metas y seguir adelante en este largo camino llamado vida, A mi madre por ser mi mayor inspiración y mi fortaleza para seguir y luchar por mis sueños, por estar conmigo a cada instante y ser parte de este gran logro, por ser mi estrella más bonita e iluminarme en los momentos más oscuros que parecían no tener salida, con la esperanza de reencontrarnos algún día y poder darte un abrazo eternamente hasta el cielo.

A mis hermanos: Leonardo, Estefanía, Justino, Inés, Israel, Blas, Demetria y Roque, por ser mi motor de vida, por estar para mí siempre cuando he necesitado, por darme la fuerza para seguir avanzando en este largo recorrido, por ser mi apoyo incondicional y ser mi mejor ejemplo. Gracias por ser los mejores hermanos y mis grandes inspiraciones para seguir creciendo como persona, dando valor a la educación que nos dieron nuestros hermanos mayores Estefana y Leonardo, por ser el amor incondicional de hermanos.

A mis abuelos: Cesario Atanacio (+) y M. Espirita Herrera, por ser mi mejor motivación, por ser mis mejores ejemplos de vida, por estar presentes en mis mejores recuerdos de mi niñez, por sus consejos que fueron los mejores, A mi abuelo que siempre será mi mejor compañía, donde sea que te encuentres este logro lo celebramos juntos un abrazo infinito hasta el cielo. A mi abuelita, por ser mi mejor reflejo, por su amor incondicional, por sus oraciones y por ser mi más grande amor de madre.

A mis tíos: Francisco, Úrsula, Mónica, Heriberto, Lucila, Arnulfo, Octaviano, Eloísa, Marcelo, Noelia, Alejandro y Jacinto, por ser parte de mi vida, por sus consejos y apoyo que me han brindado a lo largo de mi carrera, por su cariño, por sus enseñanzas, gracias por ser parte de este logro.

A mis sobrinos: Esmeralda, David, Valentina, Diego, Leonardo, Jesús, Amairani, Vanesa y said, gracias por ser la mejor bendición de mi vida y mi mejor inspiración para seguir adelante.

A mis cuñadas: Berenice, Roció, y Eva, por el apoyo que me han brindado durante mi carrera, gracias por ser parte de este logro.

## DEDICATORIA

A mi madre Rosa María Gamiño con mucho amor y cariño le dedico todo mi esfuerzo y mi trabajo de tesis como ofrenda de agradecimiento. A quien le debo todo lo que soy, mis valores, mi perseverancia, mi empeño, por apoyarme a construir mis sueños y por ser una mujer excepcional de gran corazón y un ejemplo de la mujer que quiero ser. Tus esfuerzos y tu amor para mí son invaluable, me has proporcionado todo y cada cosa que he necesitado.

A mi abuelo J. Piedad Gamiño por ser un pilar fundamental en mi formación académica y en mi vida, por procurarme siempre desde mi infancia. Todas tus enseñanzas y cariño los llevo siempre en mi corazón y que desde el cielo sé que me bendices y cuidas en cada paso que doy.

A mi hermana Lizbeth por ser mi confidente en cada paso que doy, por estar ahí cada que la necesito, por alentarme a superarme cada día y apoyarme a lograr todas mis metas, eres una mujer extraordinaria, mi alegría y mi ejemplo a seguir. A mi hermana Montserrat por todo ese cariño que nos da y apoyo incondicional en todo momento. A mi hermana Sofía por ser siempre tan noble y una niña con un gran corazón espero ser siempre un ejemplo para ti y puedas lograr cada cosa que te propongas. A mi hermano Francisco por su apoyo incondicional y siempre alentarme en los momentos indicados.

A mis tíos Enrique Gamiño e Isabel Duarte, por estar siempre en los momentos más importantes de mi vida, por su constante apoyo, calidez y muestras de cariño, por estar siempre pendiente en cada paso que doy y brindarme sus consejos cada que lo necesito les extendo un gran cariño por estar siempre conmigo.

A mi novio Daniel, por estar siempre a mi lado, por ser mi mejor amigo y un gran apoyo para sacar adelante este proyecto y por alentarme incondicionalmente, sé que siempre contaré contigo y tu amor para luchar en cada desafío que se me presente.

A mis amigos Maximiliano, Ángeles, Polet y Rigoberto, por su amistad, cariño y los momentos vividos durante todos estos años, por estar siempre conmigo dándome todo el apoyo y fortaleza para continuar, son un ejemplo para mí como los profesionistas que son, y unos seres humanos extraordinarios.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, agradecer a Dios por ser nuestra fortaleza en este camino de lucha y obstáculos que se nos han presentado en este reto, por su infinita bondad y sus bendiciones dadas a lo largo de nuestro camino, por siempre acompañarnos y guiarnos en cada paso que damos.

Agradecemos a nuestra alma mater, el Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, por abrirnos las puertas para nuestra preparación académica como profesionales en el ámbito ambiental, a los encargados de los laboratorios, ambiental y suelos donde realizamos nuestro proyecto de tesis Y al apoyo brindado por sus Administrativos y Docentes que nos dieron las herramientas y conocimiento para la elaboración de este trabajo y las facilidades para nuestro trámite de titulación.

Agradecemos a nuestro director de tesis José Diego Bárcenas Torres, por habernos guiado en este proyecto con base en su experiencia y conocimiento, por haber puesto su confianza en nosotras para el desarrollo de este trabajo.

A la maestra Adriana, por el apoyo y las facilidades para ingresar al laboratorio de suelos y por su paciencia para recibirnos y resolver cualquier duda surgida en laboratorio. Así como también al maestro Isaac, por guiarnos en la etapa de experimentación y brindarnos todo su conocimiento, son parte fundamental para la elaboración de este proyecto.

A nuestra sinodal la Dra. Claudia Palomares por su paciencia, dedicación y tiempo para la revisión de tesis, por recibirnos siempre con una sonrisa y tener la mejor disposición para resolver todas nuestras dudas y ser nuestro apoyo para no rendirnos, así como, motivarnos para seguir preparándonos académicamente.

Al Dr. Guillermo Andrade Espinoza por el apoyo que nos brindó en el laboratorio de ambiental durante nuestro proyecto.

A nuestro sinodal Alejandro Romero Bautista, por la atención brindada en nuestro trámite de titulación y por la disponibilidad para revisar nuestro trabajo de tesis.

A nuestro sinodal Dra. Verónica Cedeño, por su paciencia, dedicación y tiempo para la revisión de tesis.

A mi compañera de tesis María de Jesús Abellaneda, por ser mi cómplice, mejor amiga y confidente, por decidir acompañarme en esta última aventura, por ser una parte fundamental de mi formación, compartiéndome todo su conocimiento y dedicación, ahora eres una parte fundamental de mi vida.

Agradecer a quien ha sido parte de este gran logro, mi mejor amiga Lisset Jacobo Gamiño, gracias por ser parte de esta gran batalla, por estar siempre apoyándome, por formar parte de mi preparación académica, gracias por los buenos y malos momentos que nos ha tocado vivir juntas, y sobre todo gracias por ser la persona que eres, con una humildad que siempre voy almiar de ti, con esas ganas de salir adelante y crecer como persona, gracias por formar parte de mi vida.

A nuestros compañeros y amigos, Juan José, Mayra y Atziri, gracias por ser parte importante de nuestra preparación como profesionistas, por los momentos vividos, por el apoyo brindado en nuestro trabajo, por su compañía y por ser parte de nuestra historia de estudiantes.

## RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la eficiencia energética de las celdas de combustible microbiano (CCM) y su capacidad como biosensores en el crecimiento de las plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y zarzamora (*Rubus ssp*) correlacionando la generación de carga con el desarrollo de la planta. La evaluación para el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum*) se llevó a cabo en cuatro tipos de suelo arenoso, limoso, arcilloso, de turba a cuatro diferentes soluciones de materia orgánica (10, 15, 25 y 50 ml). Los electrodos anódicos se colocaron en la rizósfera de plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y zarzamora (*Rubus ssp*), mientras que los electrodos catódicos se colocaron en la superficie del suelo. Se evaluó la diferencia de potencial a circuito abierto y la longitud de plantas durante cuatro semanas. Los resultados mostraron que el suelo limoso exhibió una generación mayor de voltaje a circuito abierto 0.235 volts y valor alto de potencia con 9.659  $\mu\text{W}$  con resistencia interna de 820  $\Omega$ , seguido por el suelo arenoso que tuvo una potencia 5.162  $\mu\text{W}$  con una resistencia interna 1500  $\Omega$  y un voltaje de 0.214 volts, el suelo arcilloso 3.689  $\mu\text{W}$  con una resistencia interna 2400  $\Omega$  y voltaje a circuito abierto de 0.201 volts; por último, en el suelo de turba una generación de potencia 1.232  $\mu\text{W}$  con una resistencia interna de 1500  $\Omega$  y un voltaje 0.187 volts. Por otro parte, las celdas de combustible microbiano de zarzamora alcanzaron un voltaje a circuito abierto con 0.712 volts y 0.713 volts, con una resistencia interna de 8200  $\Omega$  y una densidad de potencia 1.9  $\text{W}/\text{m}^3$  y 2.4  $\text{W}/\text{m}^3$ . Los valores de la generación de potencia y voltaje mostraron una tendencia positiva cuando se presentó crecimiento en las plantas lo que permitió la correlación existente entre la generación de carga y desarrollo de las plantas de zarzamora como biosensores electroquímicos.

|

**Palabras clave:** Generación de potencia, celda de combustible microbiano fotosintética, suelo, rizósfera biosensores.

## ABSTRACT

The present work evaluated the energetic efficiency of microbial fuel cells (MFC) as well as their working ability as biosensors during plant growth of tomato (*Solanum lycopersicum*) and blackberry (*Rubus ssp*) crops, correlating charge generation with plant growth development. The evaluation for tomato (*Solanum lycopersicum*) crops was carried out on four diverse crop types of soil (sandy, loamy, clay and peat soil) with four different concentrations (10, 15, 25 and 50 ml) of organic matter (OM). The anodic electrodes were placed on the rhizosphere of tomato (*Solanum lycopersicum*) as well with the blackberry (*Rubus ssp*) crops, meanwhile the cathodic electrodes were placed on the soil's surface. The evaluation between open circuit potency and plant growth longitude took place during four weeks. The results showed the greatest open circuit voltage generation of 0.235 volts and, at the same time, a high value of 9.659  $\mu\text{W}$  of power with an internal resistance of 820  $\Omega$  on the loamy soil, following with the sandy soil which showed a power of 5.162  $\mu\text{W}$  with a 1500  $\Omega$  internal resistance and a voltage generation of 0.214 volts, while the clay soil had a power of 3.689  $\mu\text{W}$  with an internal resistance of 2400  $\Omega$  and a voltage generation of 0.187 volts, lastly, the peat soil showed a 1.232  $\mu\text{W}$  of power with an internal resistance of 1500  $\Omega$  and a generation of 0.187 volts. On the other hand, the blackberry's microbial fuel cells reached an open circuit voltage of 0.712 volts as well as 0.713 volts with the internal resistance of 8200  $\Omega$  and a power density of 1.9  $\text{W}/\text{m}^3$  and 2.4  $\text{W}/\text{m}^3$ . Power generation as well as voltage generation values showed a positive tendency during plant growth, which positively proved the existing correlation between charge generation and plant growth development of blackberry crops as electrochemical biosensors.

**Key words:** Power generation, photosynthetic microbial fuel cells, soil, rhizosphere, biosensors.

## ÍNDICE GENERAL

1. <b>INTRODUCCIÓN</b> .....	19
2. <b>ANTECEDENTES</b> .....	21
2.1 Estado de la técnica .....	24
3. <b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	30
3.1 Celdas de combustible microbiano (CCM) .....	31
3.2 Celdas de Combustible Microbianas Fotosintéticas .....	36
3.2.1 Bioprocesos que conforman una CCM para la generación energía .....	37
3.3 Biosensores .....	43
3.3.1 Interpretación de los biosensores electroquímicos como celdas de combustible microbiano .....	46
4. <b>HIPÓTESIS</b> .....	50
5. <b>OBJETIVOS</b> .....	51
6. <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	52
6.1 Selección y muestreo de suelo. ....	52
6.1.1 Obtención de las muestras. ....	53
6.2 Análisis de las muestras de suelos.....	55
6.3 Construcción de celdas de combustible microbiano con semilla de jitomate. .	56
6.4 Elaboración de las celdas de combustible microbiano con planta de zarzamora. ....	58
6.4.1 Configuración de la CCM con planta de zarzamora. ....	59
6.5 Diseño experimental.....	61
7. <b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	65

7.1 Caracterización nutrimental del suelo.....	65
7.1.1 Suelo limoso .....	65
7.1.2 Suelo arenoso.....	67
7.1.3 Suelo arcilloso.....	69
7.1.4 Suelo de turba.....	70
7.1.5 Lixiviado de lombricomposta .....	72
7.2 Evaluación del comportamiento electroquímico de generación de energía eléctrica y sensado de señales de carga eléctrica (voltaje-corriente) sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) en diferente tipo de suelo .....	74
7.3 Relación crecimiento- voltaje de las diferentes celdas comustible microbiano .....	76
7.3.1 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo limoso .....	76
7.3.2 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo arenoso.....	78
7.3.3 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo arcilloso .....	80
7.3.4 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo de turba .....	82
7.4 Evaluación del comportamiento electroquímico en censado de señales de carga eléctrica con respecto a la materia orgánica.....	85
7.4.1 Suelo limoso .....	85
7.4.2 Suelo arenoso.....	86
7.4.3 Suelo arcilloso.....	87
7.4.4 Suelo de turba.....	89
7.5 Correlación eléctricamente de las CCM (voltaje-corriente) en los diferentes tipos de suelos .....	90
7.6 Correlación existente entre la generación de carga y desarrollo de las plantas de zarzamora ( <i>Rubus ssp</i> ). .....	93

7.6.1 Caracterización eléctrica de las CCM para suelos con plantas de zarzamora..	95
7.6.2 Resistencias internas de las CCM de zarzamora.....	96
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>9. REFERENCIAS.....</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Patentes de dispositivos semejantes .....	24
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de los biosensores según su tipo de interacción, elemento de biorreconocimiento y sistema transductor.....	44
<b>Tabla 3:</b> Diseño experimental para la elaboración de las dieciséis celdas microbianas con aplicación en suelo, con distintas soluciones de materia orgánica en cuatro tipos de suelo.....	63
<b>Tabla 4:</b> Diseño experimental para la elaboración de las celdas microbianas con aplicación en suelo con plantas de zarzamora ( <i>Rubus ssp</i> ).....	62
<b>Tabla 5:</b> Análisis nutrimental del suelo limoso .....	66
<b>Tabla 6:</b> Análisis nutrimental del suelo arenoso .....	68
<b>Tabla 7:</b> Análisis nutrimental del suelo arcilloso .....	70
<b>Tabla 8:</b> Análisis nutrimental del suelo turba .....	72
<b>Tabla 9:</b> Análisis nutrimental del lixiviado de lombricomposta .....	73
<b>Tabla 10:</b> Generación de voltaje de la CCM con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) con relación al tipo de suelo y a la concentración de materia orgánica .....	74
<b>Tabla 11:</b> Generación de voltaje de la CCM con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) con relación al tipo de suelo y concentración de materia orgánica a partir del día 10.....	75
<b>Tabla 12:</b> Generación de voltaje de la CCM con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) con relación al tipo de suelo y concentración de materia orgánica a partir del día 15 .....	75
<b>Tabla 13:</b> Relación voltaje en los cuatro tipos de suelos con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) como biosensores bioelectroquímicos.....	90
<b>Tabla 14:</b> Relación de voltajes en las primeras cuatro cámaras de planta de zarzamora ( <i>Rubus ssp</i> ) como biosensores bioelectroquímicos.....	93
<b>Tabla 15 :</b> Valores de Resistencias internas arrojados de los cuatros CCM de planta de zarzamora .....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Celda de combustible Microbiana.....	32
<b>Figura 2:</b> Diagrama de Celda de Combustible Microbiana de planta P-MFC.....	37
<b>Figura 3:</b> Ilustración de la interacción de los sustratos y la comunidad microbiana para la generación de energía.....	38
<b>Figura 4:</b> Esquema de una celda de combustible microbiano fotosintética de modelo tubular. ....	42
<b>Figura 5:</b> Esquema de los principales componentes que conforman un biosensor.....	43
<b>Figura 6:</b> Curva de polarización del potencial en función a la densidad de corriente, donde se aprecia las existencias de las tres regiones.....	47
<b>Figura 7:</b> Puntos de muestreo dentro del Instituto Tecnológico del Valle de Morelia. ....	52
<b>Figura 8:</b> Obtención de muestras A) suelo extraído B) identificación y resguardo de la muestra.....	53
<b>Figura 9:</b> Pretratamiento de las muestras de suelo A) secado de las muestras recolectadas B) muestras tamizada.....	54
<b>Figura 10:</b> Equipo y muestras utilizadas para la preparación de la muestra de suelo A) Mufla Caisa B) muestras calcinadas.....	55
<b>Figura 11:</b> Distribución de las CMM de Jitomate con respecto a la solución materia orgánica añadida (ml).....	56
<b>Figura 12:</b> Configuración de la CCM con semilla de jitomate.....	57
<b>Figura 13:</b> Monitoreos de las CCM de jitomate A) toma de la generación de carga B) germinación de las semillas de jitomate.....	58

<b>Figura 14:</b> Elaboración de electrodos A) barra de grafitos perforas B) diseño de cátodo y ánodo para su incorporación en la CCM, C) coloción del ánodo en la rizosfera, D) colocación del cátodo en la superficie de la planta.....	59
<b>Figura 15:</b> Configuración de la CCM de zarzamora A) imagen exterior de la celda terminada, B) configuración interna de la CCM.....	60
<b>Figura 16:</b> Representación de la toma de voltaje de las CCM de zarzamora.....	61
<b>Figura 17:</b> Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) en suelo limoso en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml.....	77
<b>Figura 18:</b> Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) en suelo arenoso en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml .....	79
<b>Figura 19:</b> Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) en suelo arcilloso en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml .....	81
<b>Figura 20:</b> Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ) en suelo de turba en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml .....	83
<b>Figura 21:</b> Relación voltaje- materia orgánica en las cuatro celdas de combustible microbiano suelo limoso .....	85
<b>Figura 22:</b> Relación voltaje- materia orgánica en las cuatro celdas de combustible microbiano suelo arenoso .....	87
<b>Figura 23:</b> Relación voltaje- materia orgánica en las cuatro celdas de combustible microbiano suelo arcilloso .....	88
<b>Figura 24:</b> Relación voltaje- materia orgánica en las cuatro celdas de combustible microbiano suelo de turba.....	89
<b>Figura 25:</b> Generación de voltaje por tipo de suelo en la primera fase de experimentación con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ).....	91

<b>Figura 26:</b> Tendencias de las curvas de corriente en los cuatro tipos de suelos con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ).....	92
<b>Figura 27:</b> Tendencias de las curvas de potencia en los cuatro tipos de suelos con plantas de jitomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> ).....	92
<b>Figura 28:</b> Media de voltajes de las cámaras 1-4 de planta de Zarzamora ( <i>Rubus ssp</i> ) como biosensores bioelectroquímicos .....	94
<b>Figura 29:</b> Seguimiento de generación en las plantas de zarzamora ( <i>Rubus ssp</i> ) mediante curva de polarización de Voltaje en función de la intensidad de corriente.....	95
<b>Figura 30:</b> Curvas de polarización de (A) Curva de densidad de Corriente (B) Curva de densidad Potencia en función con el voltaje de las diferentes CCM con plantas de zarzamora .....	96

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### Abreviatura

<b>CCM</b>	Celda de combustible Microbiano
<b>cm</b>	Centímetro
<b>V</b>	Voltio
<b>mV</b>	Milivoltio
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>mW</b>	Megavatio
<b>LED</b>	Diodo emisor de luz
<b>mW/m<sup>2</sup></b>	Megavatio por metro cuadrado
<b>μW</b>	Microvatio
<b>W</b>	Vatio
<b>PET</b>	Plástico tereftalato de polietileno
<b>C/N</b>	Relación Carbono – nitrógeno
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>g</b>	Gramo
<b>mΩ</b>	Miliohmios
<b>Ω</b>	Ohmio
<b>W/m<sup>3</sup></b>	Densidad de potencia
<b>A/m<sup>2</sup></b>	Densidad de corriente
<b>P</b>	Fósforo
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	Magnesio
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	Calcio
<b>K</b>	Potasio
<b>Na</b>	Sodio
<b>MO</b>	Materia Orgánica

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de los combustibles fósiles y los impactos ambientales generados a causa de la producción de energía ha llevado a la necesidad de búsqueda de nuevas energías que sean renovables y sostenibles, que se caracterizan por utilizar recursos naturales capaces de renovarse ilimitadamente. Un ejemplo claro, es la bioenergía que se produce a partir del aprovechamiento de la materia orgánica o industrial generada en algún proceso biológico. Los procesos actuales para su producción como el bioetanol o el biodiésel, a menudo compiten con la producción de alimentos (Ruud et al., 2010). Ya que la mayor parte de las tierras productivas disponibles son de uso agrícola, que luchan constantemente con la demanda de tierras para cultivos energéticos. Lo que trae como consecuencia la presión sobre los bosques, aumentando los incentivos para la deforestación, siendo este último la segunda fuente más importante de emisiones de gases de efecto invernadero por qué contribuye al cambio climático.

Por lo que una tecnología que diseñe la producción de cultivos junto con la generación de energía para mitigar el efecto en el cambio climático sería un candidato adecuado.

Esta energía es conocida como la celda de combustible microbiana fotosintética, que es una celda biológica que convierte la energía solar en bioelectricidad con ayuda de los microbios en la región de la rizósfera de la planta (Chiranjeevi, 2019). Las plantas y las bacterias del suelo colaboran juntas para convertir la energía solar en electricidad. Las plantas terrestres son responsables de fijar el 15% del CO<sub>2</sub> utilizando energía solar durante los procesos fotosintéticos, y anualmente se fijan 450 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a nivel mundial en forma de carbono entre la tierra y la atmósfera (Christian et al., 2010).

Por otro lado, el suelo juega un papel fundamental dentro de esta tecnología, debido a que una buena salud del suelo tiene influencia en el crecimiento de las raíces y por consecuencia en la planta. El suelo se define desde el punto de vista medioambiental, como la fina capa superior de la corteza terrestre (litosfera), situada entre el lecho rocoso y la superficie. Está compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos

(Gonzales et al., 2014). Uno de sus principales usos del suelo hoy en día, es el agrícola, que es una de las principales actividades productivas en que se desarrolla, por lo que los requerimientos nutricionales del suelo deben ser los adecuados para cada tipo de cultivo. Los tipos de suelo existentes para cultivo son de tipo arenoso, limoso, arcilloso y de turba (Guitian, 2010).

A pesar de lo antes expuesto, se presentan pocos trabajos sobre los factores que afectan la generación de energía en la celda de combustible microbiana fotosintética que utiliza la materia orgánica del suelo como combustible, y su interrelación con el crecimiento de la planta y la generación de voltaje. Por lo que el objetivo de estudio fue valorar la capacidad de una celda de combustible microbiano como dispositivo electroquímico en su función como biosensores del crecimiento de las plantas para los cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y zarzamora (*Rubus ssp*). Los biosensores basados en las celdas de combustible microbiano (CCM) son considerados la próxima generación de tecnología en biosensores para la monitorización ambiental, debido a su alimentación propia con un gran potencial a largo plazo (Jian et al., 2015). El empleo de una CCM como biosensor para el monitoreo de la producción de alimentos sería una aplicación prometedora e innovadora para conocer los factores que intervienen en el crecimiento de la planta, con respecto a los nutrientes presentes en el suelo y la generación de energía.

## 2. ANTECEDENTES

La conversión de energía química en eléctrica se hace posible en dispositivos como CCM, donde la electricidad se obtiene a partir de una fuente externa de combustible que puede ser transformando en hidrógeno o etanol mediante la acción de microorganismos. En 1910 Potter recurrió a cultivos de *E. coli* y electrodos de platino para generar corrientes eléctricas que, por su pequeña magnitud, en la década de los ochenta se despertó el interés con la utilización de medidores redox solubles que aumentaban la producción de corriente y la potencia de estos sistemas. Los medidores redox son compuestos solubles que actúan transportando los electrones desde la bacteria hasta el electrodo, reoxidándose y quedando disponibles de nuevo para ser reducidos por los microorganismos. La CCM son biorreactores que albergan la oxidación de un combustible orgánico catalizada por microorganismos. Como en cualquier otro proceso, existen distintos diseños que se adaptan a la naturaleza del combustible y a la finalidad del ensayo, las CCM más sencillas usadas a escala de laboratorio, suelen ser de dos compartimentos y tener forma de H, pero también las hay planas y tubulares (Du *et al.*,2007).

CCM en suelos:

Es posible configurar una CCM incrustando un electrodo que sirve como ánodo en el suelo y colocando un electrodo de cátodo en la superficie del suelo (Makoto et al., 2018). La CCM incluye un electrodo de ánodo que incluye como catalizador bacterias generadoras de corriente suministrada desde tierra o lodo, y oxida un combustible orgánico suministrado desde tierra o lodo; y un electrodo de cátodo que reduce el oxígeno suministrado desde el aire o el agua, teniendo la celda de combustible microbiana una capa que restringe (es una capa formada por un hidrogel) la permeación de oxígeno entre el electrodo de ánodo y el electrodo de cátodo uno frente al otro. Booki Min (2010) realizó una invención con CCM comprendida en un electrodo de ánodo y una cámara de cátodo en la que tanto el electrodo de ánodo como la cámara de cátodo deben sumergirse en un entorno anaerobio para generar electricidad a partir de la materia orgánica. Comprende un electrodo de ánodo, una cámara de cátodo, comprendiendo dicha cámara de cátodo una entrada a través de la cual un efluente ingresa a la cámara de cátodo, una salida a través de la cual un efluente sale

de la cámara de cátodo, un electrodo de cátodo y una membrana permeable al electrolito (Booki, 2010) el modelo da a conocer un dispositivo de pila de combustible microbiano a base de materia orgánica del suelo, comprende una cámara anódica, un electrodo anódico, un circuito externo, una membrana y un sistema de extracción de materia orgánica del suelo, este último comprende un medidor de efusión, un dispositivo de recolección de líquido y una bomba peristáltica que está conectada con la cámara de ánodo del sistema CCM y la parte superior del dispositivo de recogida del líquido está conectado con una bomba. El agua que contiene materia orgánica en el suelo ingresa al medidor de efusión, se almacena en el dispositivo de recolección de líquidos y se transporta cuantitativamente a la cámara del ánodo a través de la bomba peristáltica para realizar la generación de energía de las celdas de combustible microbianas, evitando así la resistencia a la transferencia de masa de materia orgánica. Patente CN202308173U. En el presente trabajo se analizó la estructura microbiana, el rendimiento de CCM y las características del suelo en diferentes microhábitats en suelo a granel, ánodo y cátodo, usando suelos agrícolas y forestales, usando madera dura en Harvard Forest Petershan, se analizaron las características del suelo como polifenoles, ácidos grasos de cadena corta, C y N orgánico totales, minerales macronutrientes abióticos, N, P, CO<sub>2</sub>. La estructura de la comunidad microbiana de los ánodos, cátodos y suelo a granel se determina con métodos de huellas digitales moleculares, que incluyen análisis de polimorfismo de longitud de restricción terminal (T-RFLP) y análisis de secuenciación del gen 16srRNA. indicando que las CCM construidos del suelo agrícola tenía una producción de energía 17 veces mayor que la de las CCM basados en el suelo forestal y tasas de respiración aproximadamente 10 veces más altas que en suelo forestal.

En los últimos años, la investigación tecnológica sobre las CCM ha ampliado el alcance de una variedad de aplicaciones, como son los biosensores. Andrea Schievano (2015) presentó una de las primeras aplicaciones de esta tecnología donde se llevó a cabo un tipo de celda de combustible microbiano flotante para el suministro de energía de transmisión de datos de sensores ambientales remotos. La producción de energía alcanzó un máximo alrededor de 3-3.5 mW (densidad de potencia de cátodo de 22-28 mW/m<sup>2</sup>), después de 20–30 días

de iniciada la experimentación, mediante simples convertidores DC/DC para señales de detección, donde la frecuencia de adquisición de datos pudo ser obtenida pocas veces al día. La energía generada fue suministrada a luces LED intermitentes y un dispositivo de transmisión de datos remotos de baja velocidad a través de la tecnología SIGFOX. Por otro lado, Brunelli (2016) presentó un prototipo de CCM como fuente de energía y un biosensor para monitorear la salud de las plantas, con un nodo sensor inalámbrico incorporado. Donde la tasa de generación de energía se utilizó como retroalimentación sobre el estado de la salud de la planta. El rendimiento eléctrico de la CCM mostraba una potencia máxima de aproximadamente 300  $\mu\text{W}$  con una resistencia de carga de 800 $\Omega$ . La potencia máxima generada aumentaba simultáneamente con el crecimiento de la planta, demostrando la asociación con el estado de salud de la misma y la cantidad de energía generada. Más tarde Natilia F. (2017) llevó a cabo la aplicación de una CCM para el monitoreo del contenido de agua en techos verdes. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de los sistemas CCM como biosensores para el control del contenido de agua en techos verdes en climas semiáridos. El estudio se hizo en siete plantas tolerantes a la sequía, de las especies de *sedum*. Estas presentaron una relación positiva entre la generación de energía y el contenido de agua en el sustrato. Los reactores con mayor contenido de agua presentaron de 27 % vs. 17.5 % mostrando una mayor densidad de potencia (114.6 y 82.3  $\mu\text{Wm}^{-2}$  frente a 32.5  $\mu\text{Wm}^{-2}$ ), donde se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.95 ( $\pm 0.01$ ) entre la densidad de corriente y el contenido de agua. En ese mismo año el investigador Maurizio (2017) desarrolló un dispositivo de potencia ultra baja autosostenible (suministrada por una celda de combustible microbiana fotosintética) de detección inteligente y de largo alcance de comunicación, generando una potencia máxima de 400  $\mu\text{W}$ . Este trabajo demostró que una CCM en combinación de opciones de diseño consciente de energía, puede ser autosostenible para activar sensores remotos.

## 2.1 Estado de la técnica

El estado de la técnica nos permite conocer el estado último del conocimiento sobre la investigación y el desarrollo de invenciones en un campo determinado. Por lo que en la Tabla 1 se describen las invenciones existentes sobre las celdas de combustible microbiano y su aplicación como biosensores en el monitoreo de la calidad del suelo a fines a este tema, con la finalidad de conocer las innovaciones presentadas en este campo.

**Tabla 1:** *Patentes de dispositivos semejantes*

Patente	Aplicación	Descripción
<b>US20170077541A1</b>  PILA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA  <b>Autores:</b> Makoto Togo Hidekazu Shima	Alternativas para obtener energía a un menor costo y eliminar la necesidad de una costosa membrana de intercambio iónico.	Incluye un electrodo de ánodo que incluye como catalizador, bacterias generadoras de corriente suministrada desde el suelo, y oxida un combustible orgánico suministrado desde el suelo; y un electrodo de cátodo que reduce el oxígeno suministrado por el agua o el aire. Construcción: los cables de plomo se conectan eléctricamente respectivamente al electrodo de ánodo y al electrodo de cátodo de modo que la electricidad generada por la generación de energía microbiana se puede extraer externamente. Los cables conductores pueden estar conectados eléctricamente por un circuito de control.

<p><b>US20100178530A1</b></p> <p>PILA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA</p> <p><b>Autores:</b> Booki min Irimi Angelidaki</p>	<p>Generación de energía eléctrica a partir de materia orgánica.</p>	<p>La CCM comprende un electrodo de ánodo, una cámara de cátodo, comprendiendo dicha cámara de cátodo, una entrada a través de la cual un efluente ingresa a la cámara de cátodo, una salida a través de la cual un efluente sale de la cámara de cátodo, un electrodo de cátodo y una membrana permeable a los electrolitos, en la que tanto el electrodo del ánodo como la cámara del cátodo deben sumergirse en un entorno anaeróbico para generar energía eléctrica.</p>
<p><b>WO2009013370A1</b></p> <p>BIOSENSORES BASADOS EN MICROALGAS PARA LA DETECCIÓN DE CONTAMINANTES MEDIOAMBIENTALES.</p> <p><b>Autores:</b> Guillermo Moraleda Victoria Rodas. Eduardo Costas David Flórez Emilia Pampín.</p>	<p>Se basa en la determinación de la presencia de compuestos tóxicos en una muestra, mediante la inhibición de la actividad fotosintética de las microalgas y de la producción de oxígeno molecular en presencia del compuesto tóxico usando un compuesto luminiscente cuya emisión depende de la cantidad de oxígeno en el medio.</p>	<p>La invención del biosensor menciona: la obtención de microalgas resistentes a un compuesto tóxico. Mediante dos etapas, la primera se da por análisis de fluctuación se busca obtener mutantes espontáneos viables en presencia de dicho compuesto tóxico y una segunda selección a partir de los mutantes afectados en la primera etapa, que tiene una sensibilidad aumentada a dicho compuesto tóxico mediante al menos un ciclo triquete. Cada una de las poblaciones de las se algas se encuentra inmovilizada en un soporte y están separadas por un medio acuoso el que realiza la medida de una membrana porosa impermeable a las microalgas, pero</p>

		<p>permeables al oxígeno molecular. En el cual el compuesto de las propiedades ópticas se encuentra impregnado en una membrana. El biosensor contiene dos cepas de microalgas que fueron seleccionadas por su resistencia y sensibilidad al analito diana, por lo cual el agente toxico afectara la actividad fotosintética de la cepa sensible y en presencia de otro agente tóxico afectara las dos cepas.</p>
<p><b>JP2006242933A</b></p> <p>BIOSENSOR PARA DIAGNOSTICAR EL SUELO Y MÉTODO DE DIAGNÓSTICO DEL SUELO UTILIZANDO EL MISMO.</p> <p><b>Autores:</b> Goto Masao Karube Masao Nakamura Hideaki</p>	<p>Diagnosticar los tipos de cantidades de microorganismo existentes en el suelo. Con el objetivo de incorporar microorganismos adecuados para el crecimiento de cultivos objetivos para mejorar el suelo.</p>	<p>La invención hace mención la creación de un biosensor que diagnostica el suelo, se dispone de un sustrato aislante superior provisto de al menos dos electrodos, de un electrodo de trabajo y un contra electrodo mediante un espaciador en el sustrato aislante inferior, y una capa medidora o una capa de mezcla de microorganismos mediador se forma el electrodo de trabajo y/o en la periferia del mismo. El suelo se evalúa / diagnostica comparando la respuesta del sensor obtenida de un tipo de microorganismos o las respuestas de sensor individual obtenidas de al menos dos tipos de microorganismos que difieren en propiedades, utilizando el biosensor para diagnosticar el suelo.</p>

<p><b>CN101869040A</b></p> <p>DISPOSITIVO DE CULTIVO DE PLANTAS INTELIGENTE.</p> <p><b>Autores:</b> Weicong Huang</p>	<p>Monitorear de forma exhaustiva un entorno de crecimiento de plantas empleando un dispositivo de cultivo de plantas inteligentes.</p>	<p>La invención describe un dispositivo de cultivo de plantas inteligente, que comprende un contenedor, un controlador y una fuente de alimentación, un sensor y un dispositivo de salida de información que estén conectados eléctricamente con el controlador respectivamente, en el que la fuente de alimentación suministra energía y transmite la energía al sensor y el dispositivo de salida de información respectivamente por el controlador, el resultado de la detección del sensor es transmitido al dispositivo de salida de información por el controlador; El sensor comprende al menos uno entre el sensor del valor de pH (es un sensor de potencial), un sensor de sequedad del suelo, un el sensor de nutrientes o sensor de iones, dispuestos en la parte, cerca de la raíz de la planta en el contenedor. El cultivo de plantas puede monitorear cada índice de suelo en tiempo real para completar oportunamente el agua y la nutrición de la planta.</p>
<p><b>US2007148725A1</b></p> <p>BIOSENSORES QUE ALBERGAN MICROORGANISMOS DEL SUELO Y SUS USOS.</p>	<p>Se enfoca al uso de métodos para evaluar de forma rápida y sencilla el potencial de crecimiento de los microorganismos del suelo y así como también evaluar el</p>	<p>Un método para medir el potencial de crecimiento de un microorganismo del suelo en el suelo, que comprende las etapas de poner en contacto una suspensión de suelo a medir múltiples sensores, cada uno</p>

<p><b>Autores:</b> Hashimoto Yoshiro Karube Isao</p>	<p>riesgo de aparición de enfermedades causadas por microorganismos fitopatógenos transmitidos por el suelo y evaluar los efectos de biocontrol. Esto empleando biosensores de microorganismo para el suelo.</p>	<p>comprende un electrodo de oxígeno, una sección de alojamiento que almacena un microorganismo del suelo y un miembro inmovilizador, donde la sección de alojamiento de cada sensor almacena un microorganismo del suelo diferente; y medir las diferencias en una disminución o tasa de disminución de la corriente eléctrica de salida para cada uno de los sensores. Un método para evaluar el riesgo de aparición de o propagación de una enfermedad del suelo causada por un microorganismo fitopatógeno transmitido por el suelo, comprende las etapas de: poner en contacto una suspensión de suelo a medir con un sensor que comprende una unidad un electrodo de oxígeno, una sección de alojamiento que almacena un microorganismo general del suelo y un miembro inmovilizador, un sensor que comprende una unidad que comprende un electrodo de oxígeno, una sección de alojamiento que almacena un microorganismo fitopatógeno del suelo y un miembro inmovilizador y medir las diferencias en una disminución de la corriente eléctrica de salida para cada uno de los sensores</p>
--------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

En la búsqueda de patentes se utilizaron las palabras “*microbial fuel cell*” y “*Biosensors for monitoring soil*” la búsqueda se realizó en las páginas Google patents, OMPI, USPTO Y WIPO. Las invenciones presentadas demuestran el interés por el por el monitoreo del suelo, haciendo uso de las celdas de combustible microbianas en conjunto con los sensores de detección rápida y sencilla dirigido a mejorar cultivos de plantas agrícolas conociendo el consorcio microbiano que las habita y evitar enfermedades, ya que la salud del suelo define su calidad por ser un ecosistema que permite el crecimiento de las plantas, almacena agua y retiene nutrientes. La aplicación de biosensores electroquímicos como dispositivos de rápida sencilla detección a bajo costo. A continuación, se presentan algunas aportaciones que pueden tener el uso de una CCM como biosensor para la calidad del suelo.

-El diseño apartado en un recipiente cilíndrico de PET con medidas de 15 cm de longitud y 5 cm de diámetro, tiene dos electrodos un ánodo y un cátodo de grafito, separados por capas de un mismo suelo y una planta que suministra continuamente nutrientes.

- El diseño de celda es tabular simple que puede ser fácilmente replicado debido a su fácil construcción y funcionamiento lo que reduce sus costos de fabricación.

-Los exudados de la raíz de la planta proporcionan el sustrato para la generación de bioelectricidad, lo que permite su funcionamiento como un dispositivo autónomo y continuo.

- La generación de voltaje y su interrelación con la materia orgánica presente en el suelo permite conocer su salud y la colonia de bacterias electrogénicas que lo habitan.

### 3. FUNDAMENTO TEÓRICO

#### -Descripción del suelo

El suelo es la porción superficial de la corteza terrestre, constituida en su mayoría por residuos de roca provenientes de procesos erosivos y otras alteraciones físicas y químicas, así como de materia orgánica fruto de la actividad biológica que se desarrolla en la superficie. Los suelos se forman por la destrucción de rocas y la acumulación de materiales distintos a lo largo de los siglos, en un proceso que involucra numerosas variantes físicas, químicas y biológicas, que da como resultado una disposición en capas bien diferenciadas, observables en los puntos de falla o fractura de la corteza terrestre.

Los suelos arenosos, como son más sueltos son fáciles de trabajar, pero tienen pocas reservas de nutrientes aprovechables por las plantas. Los suelos limosos tienen gránulos de tamaño intermedio son fértiles y fáciles de trabajar, forman terrones fáciles de desagregar cuando están secos. La arcilla son partículas muy finas y forman barro cuando están saturadas de agua, los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes, son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.

Se sabe que para crezcan las plantas precisan agua y determinados minerales. Los absorben del suelo por medio de sus raíces. Un suelo es fértil cuando tiene los nutrientes necesarios, es decir, las sustancias indispensables para que las plantas se desarrollen bien.

Para Albrecht el suelo ideal debe tener:

45% de minerales

5% de humus

25% agua

25% aire

Para lograr este equilibrio en el suelo es necesario trabajar sobre el balance del 45% de los minerales (Albrecht, 1974). La proporción de los nutrientes en el suelo dependerá de los

cationes adsorbidos en la capa arcillo-húmica que son Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K) y Sodio (Na) que en proporciones correctas el suelo puede hacer crecer cualquier cultivo. Los suelos arcillosos tienen una composición de partículas menores a un diámetro de 0,002 mm, presentan una alta densidad. Las arcillas tienen la capacidad de retención de minerales y humedad. Las arcillas presentan propiedades como, la alta capacidad de intercambio catiónico, tamaño pequeño de poros, carga eléctrica negativa, conductividad eléctrica. Presenta baja permeabilidad, alta capacidad de retención de agua y de almacenamiento de nutrientes. Si la arcilla y la materia orgánica no retienen los cationes, estos serán arrastrados por el agua hacia el horizonte inferior (lixiviación).

La capacidad de intercambio catiónico es debida a las cargas eléctricas negativas que poseen tanto el humus como las arcillas del suelo. El pH del suelo puede afectar a la capacidad del intercambio catiónico.

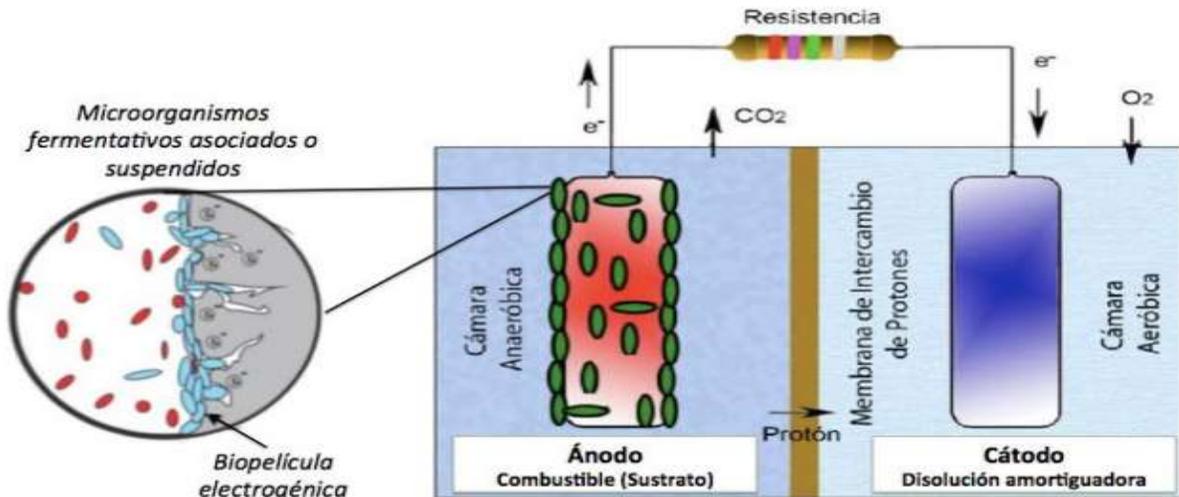
### **3.1 Celdas de combustible microbiano (CCM)**

-Descripción y funcionamiento:

Las celdas de combustible microbiano CCM son dispositivos que utilizan los microorganismos que transforman la energía química contenida en compuestos orgánicos en energía eléctrica (De Schamphelaire et al., 2008).

Una CCM generalmente está conformada por una cámara anódica y catódica, que se encuentran separadas por una película o membrana sintética que contiene grupos funcionales ionizables, que es una membrana de intercambio protónico. Los microorganismos en el ánodo oxidan la materia orgánica generando protones ( $H^+$ ) y electrones ( $e^-$ ) (Pineda et al., 2016). La estructura básica de un CCM para la producción de electricidad hace su funcionamiento mediante dos cámaras, una aeróbica y anaeróbica. Donde los microorganismos transfieren los electrones al ánodo, luego los electrones pasan a través de una resistencia u otra carga hacia el cátodo, los electrones generados en la reacción serán aprovechados para ser convertidos directamente en energía eléctrica. Los protones finalmente, migran hacia el cátodo en aerobiosis donde se combinan con el

oxígeno y se forma agua (Buitrón, 2011). El diagrama esquemático de una CCM se aprecia en la Figura 1.



**Figura 1:** Celda de combustible Microbiana.  
**Fuente:** (Dolly, 2013).

-Partes de una Celda de Combustible Microbiano.

La estructura habitual de una CCM está conformada por una cámara anaeróbica y una aeróbica, donde se encuentran los dos electrodos (ánodo y cátodo), las dos cámaras a su vez están divididas por una membrana de intercambio protónico y en el exterior cuenta con un circuito externo. A continuación, se describen brevemente estos componentes:

- **Ánodo:** es el electrodo con carga positiva, es aquí donde las bacterias catalizan la oxidación del sustrato y liberan electrones como resultado de la respiración. La zona donde se encuentra este electrodo ha de estar libre de oxígeno para evitar o minimizar la inhibición de la generación de energía eléctrica (Yongiin et al., 2009). Los electrones generados son transportados mediante un circuito externo hasta el cátodo.
- **Cátodo:** es el electrodo con carga negativa que recibe los electrones y protones liberados desde la cámara anódica, mediante un circuito externo y a través de la membrana de intercambio de iones u otro material que permita el paso de protones respectivamente. Este

último permite al cátodo se desarrollen las reacciones mediante las cuales un aceptor final de electrones sea reducido en presencia de  $e^-$  y  $H^+$  para formar un producto (López, 2014).

- Membrana Intercambiadora de Protones: la membrana es un componente esencial del sistema de la CCM, ya que de este factor depende del rendimiento de la misma. Existen dos tipos de membranas de intercambio de protones: porosas y no porosas (Mayahi, 2013). Las membranas de intercambio de protones son utilizadas como separador del electrolito entre la cámara anódica y la catódica de la celda permitiendo el flujo de protones de una cámara a otra. En esta tecnología se utilizan membranas de intercambio catiónico y aniónico, membranas como la Nafion, Hyflon y Ultrex han sido utilizadas durante mucho tiempo debido a que pueden transferir fácilmente los protones generados en la cámara del ánodo hacia la del cátodo (Leong, 2013).

- Sustrato que se utilizan en una Celda de Combustible Microbiano: para el rendimiento de una CCM es fundamental el tipo de sustrato que sea empleado, ya que su contenido orgánico puede mejorar o inhibir producción de electricidad (Enrique, 2017). Cualquier fuente de carbono biodegradable puede ser utilizada en una CCM para generación de energía. Existe una gran variedad de sustratos que van desde compuestos puros a mezclas complejas algunos ejemplos son:

- Acetato
- Glucosa
- Biomasa lignocelulósica
- Aguas residual sintética

Otros combustibles metabólicos son los carbohidratos, ácidos grasos y los aminoácidos. La concentración del sustrato también es otro factor a considerar, ya que es el responsable de las reacciones enzimáticas que suceden en el interior de la celda (Enrique, 2017). En algunas investigaciones se ha observado que el incremento de la concentración del sustrato aumenta la velocidad de reacción resultando en una mayor generación de energía, mientras que en otros surge el efecto contrario al tener elevadas densidades de potencia a pequeñas concentraciones (Sharma, 2010).

- Microorganismos: los microorganismos juegan un papel fundamental para la generación de energía eléctrica dentro de las celdas, al fijar los electrones al ánodo resultado de la oxidación de la materia orgánica. Se ha identificado una gran variedad de géneros bacterianos asociados a las celdas de combustible microbiano, las cuales dependen de la naturaleza del inoculó, del combustible y del tipo de la CCM (Logan et al., 2016). Esta variedad de microorganismos agrupa aquellos que tienen la habilidad de transferir los electrones extracelularmente conocidos como bacterias electroquímicamente activas, bacterias con respiración anódica y electrógenas. Algunas bacterias activas electroquímicamente pertenecen a los géneros *Shewanella*, *Geobacter* y algunas especies de *Pseudomonas* (Magallón, 2012).

-Materiales utilizados para la elaboración de la Celda de combustible microbiano.

En la actualidad se encuentra una variedad de materiales y configuraciones para llevar a cabo el diseño de una CCM. Los materiales más comunes empleados para la elaboración de la celda suele ser el acrílico o el vidrio. Esto con el fin de que los electrodos empleados puedan ser de diferentes materiales. Algunos de ellos son de cobre, platino, fieltro de grafito, carbón, polímeros conductores o cerámicas conductoras. La membrana que impide el paso de electrones de la cámara anódica y deja pasar los protones, puede ser de diferentes tipos: membrana de intercambio de cationes (MIC), membrana de intercambio de aniones (MIA), bipolar, microfiltración, de ultrafiltración, fibra de vidrio, membranas porosas, entre otras (Li Wen-Wei, 2011). Aunque la comúnmente utilizada en la CCM es la membrana de Nafion<sup>®</sup> fabricada por DuPont.

Las configuraciones que podemos encontrar de una CCM son:

- Celdas de combustible de una sola cámara
- Celdas de combustible de dos cámaras
- Celdas de combustible de múltiples comportamientos
- Celdas de combustible microbiano tubulares
- Celdas de combustible microbiano acopladas

- Celdas de combustible microbiano a microescala
- Celdas de combustible microbiano apiladas

Sin importar la configuración elegida, el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo. Varios estudios han considerado la alternativa de involucrar nuevas tecnologías como sistemas acoplados a las celdas de combustible microbianas para aprovechar el beneficio energético que estas puedan generar. En dichas investigaciones podemos encontrar:

- Celdas para generación de energía y tratamiento de aguas.
- Celdas acopladas a sistemas de generación de biogás.
- Celdas de combustible microbiano fotosintéticas.

-Aplicaciones y ventajas de una CCM

La aplicación fundamental de las CCM es la generación de bioelectricidad empleando su producción de compuestos orgánicos fermentables y no fermentables. Las aplicaciones que han tenido las CCM es el tratamiento de aguas residuales municipales en la medición de DBO y de igual manera se han demostrado su capacidad de remoción de compuestos tóxicos recalcitrantes e incluso metales pesados (Pineda et al., 2016). A lo largo del tiempo, se hicieron muchos avances y modificaciones en las tecnologías de CCM. Las tecnologías que se han propuesto para CCM es incorporar una planta en la región anódica como la fuente de sustrato para las bacterias (Manohar et al., 2008). Esta tecnología comprende áreas multidisciplinarias que van desde el estudio de microbios, plantas, electroquímica y diferentes campos de la ingeniería (Rachnarin 2017). Una de las ventajas de esta nueva tecnología es la aplicación de biosensores para análisis, el seguimiento y control “in situ” de procesos, donde la capacidad de generación de energía de la celda permite el funcionamiento continuo y autónomo de estos dispositivos (Rodríguez, 2010).

### 3.2 Celdas de Combustible Microbianas Fotosintéticas

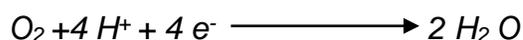
#### -Descripción y funcionamiento

Una de las tecnologías de las celdas de combustible microbiana es la incorporación de plantas dentro de su configuración. Esta tecnología es conocida como celda de combustible fotosintética. Las CCM transforman la energía solar en energía eléctrica a través de la oxidación de los rizodepósitos por bacterias electroquímicamente activas. Dentro de las CCM las bacterias electrogénicas presentes en el suelo y las plantas trabajan en cooperación natural para la generación de bioenergía (Figueredo, 2014). El sistema de celdas de combustible microbiana de planta está basado en dos bioprocesos:

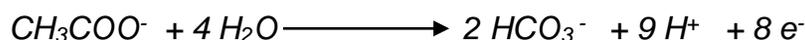
La primera etapa se lleva a cabo el biocontrol donde las plantas reciben energía externa como señal de entrada de la luz solar para obtener voltaje y potencial (Chiranjeevi, 2019). La rizodeposición de compuestos orgánicos por las plantas vivas son utilizados como sustratos por las bacterias para generar electricidad en la CCM.

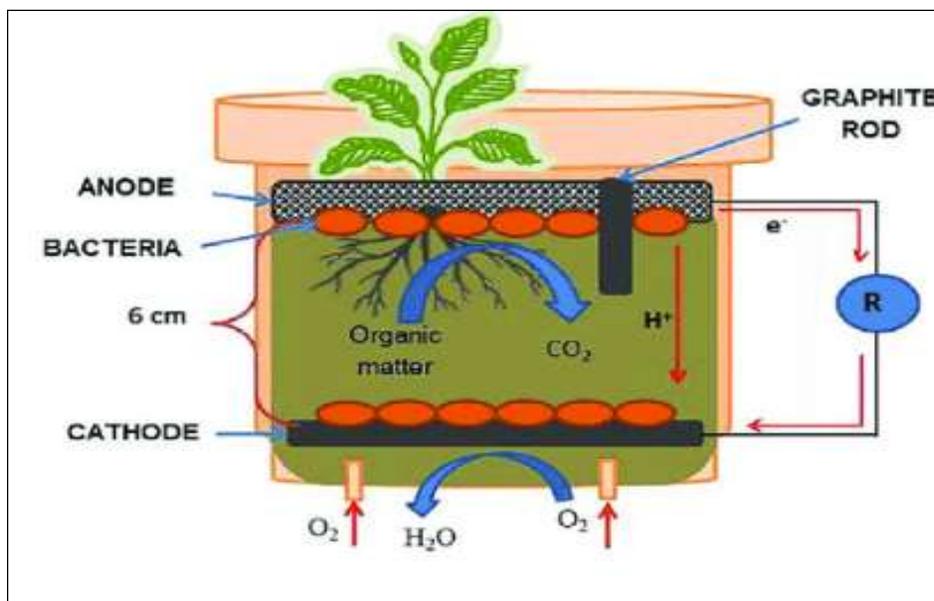
En la segunda etapa de bioproceso, las bacterias electroquímicamente activas oxidan la materia orgánica en los rizodepósitos lo que produce electrones, protones y CO<sub>2</sub> en el comportamiento anódico. Los electrones y protones se transfieren al cátodo, mientras que el CO<sub>2</sub> escapa a la atmósfera donde las plantas pueden volver a utilizarlo para la fotosíntesis. En el comportamiento catódico, los electrones, protones y el oxígeno, se consumen por reducción del oxígeno en agua (Strik et al., 2011). El consumo y la producción de electrones dan como resultado una diferencia potencial entre el ánodo y el cátodo que hace que los electrones fluyan a través del circuito eléctrico (Ruud, 2010). Como se observa en la Figura 2. Las reacciones habituales involucradas en una CCM son:

- *Reducción en el cátodo (rico en oxígeno):*



- Oxidación en el ánodo (oxidación acetato)





**Figura 2:** Diagrama de Celda de Combustible Microbiana de planta P-MFC.  
**Fuente:** (Robert, 2009)

### 3.2.1 Bioprocesos que conforman una CCM para la generación energía

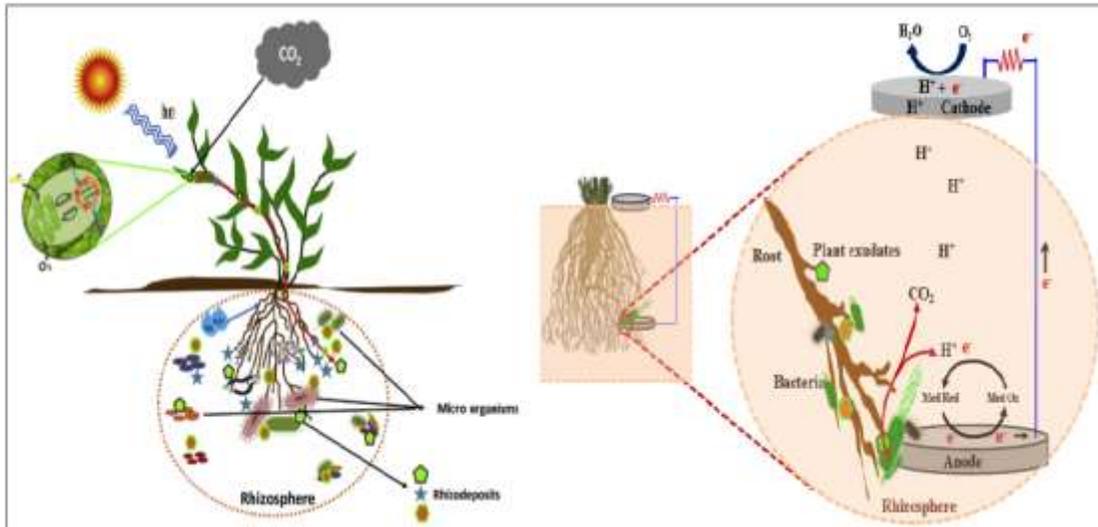
-Papel de las plantas en las CCM

Los productores primarios que llevan a cabo la fotosíntesis utilizando clorofila, y recolectan la energía luminosa para fijar el  $\text{CO}_2$  atmosférico en carbohidratos son las plantas (Beer et al., 2010). Las cuales durante el proceso de fotosíntesis fijan toneladas de carbono que son trasladadas a las raíces y finalmente se liberan en la rizósfera en forma de exudados (azúcares, ácidos orgánicos, etc.). La rizósfera proporciona la suplementación sustancial de carbono para la proliferación de rizobacterias que son benéficas al microorganismo del suelo (Mohán, 2011). Estas bacterias de la rizósfera facilitan los nutrientes en forma susceptible de ser absorbidos por las raíces de las plantas. Los exudados de la raíz también estimulan la quimiotaxis para promover los microbios de las raíces del suelo a la rizósfera y el aprovechamiento de la bioelectricidad (Mohán, 2010). La función principal de la planta es proporcionar los nutrientes esenciales a las bacterias mediante reacciones de fotosíntesis

para estimular colonias de bacterias y aprovechar la bioelectricidad que producen a través de un sistema electroquímico microbiano.

#### -Rizodeposición

La rizodeposición se da mediante la fijación de carbono ( $\text{CO}_2$ ) durante la fotosíntesis en las plantas, este se transloca en la rizosfera como exudados de la raíz, que son compuestos moleculares orgánicos que proporcionan sustratos para la proliferación de biomas en la rizósfera (Chiranjeevi, 2019). La rizodeposición como se ve en la Figura 3, proporciona sustratos para la producción de bioelectricidad en una CCM. En ella se encuentran una variedad de depósitos de raíces que son compuestos de bajo peso molecular, como los ácidos orgánicos, carbohidratos que se degradan fácilmente por microorganismos, y compuestos de alto peso molecular como celulosa, células muertas y desprendimiento de raíz. El rendimiento de una CCM depende de estas exudaciones y de la naturaleza de su descomposición microbiana (Nitisoravut, 2017).



**Figura 3:** Ilustración de la interacción de los sustratos y la comunidad microbiana para la generación de energía.

**Fuente:** (Schievano, 2015)

La potencia de salida de una CCM es una función de la cantidad de exudados de la raíz, su morfología, la relación planta-microbio y la eficiencia fotosintética (Chiranjeevi, 2012). La morfología general de la raíz tiene un efecto influyente en la exudación, los factores fundamentales que intervienen en ella son la edad de la planta, los microorganismos, el contenido de nitrógeno en el suelo y la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Además de estos factores también intervienen parámetros físicos que alteran los depósitos como lo son la intensidad de la luz, el fotoperíodo, el pH del suelo, la anoxia y la defoliación, este último puede cambiar la tendencia de los exudados de las raíces (Kuzyakov, 2002). Para el incremento de la salida de potencia se puede llevar cabo mediante una enmienda orgánica. La adición de compost en la rizósfera tiene una mejora sustancial en la densidad de potencia. Algunos estudios llevaron a cabo la adición de subproductos en forma de materiales triturados y paja, como sustratos para la operación de los CCM, este enriquecimiento mejora la cosecha de bioenergía. Sin embargo, el aumento de estos sustratos a veces alienta a las bacterias fermentadas, disminuyendo así la potencia de salida (Hassan, 2014). Si bien, existe una serie de factores que pueden intervenir o incrementar la rizodeposición, aún se necesitan más estudios para entender la relación de los sustratos de la rizósfera y su disponibilidad para la producción de bioenergía.

#### -Suelo como el sustrato en una CCM

El consorcio suelo-raíz es una vecindad que sostiene microbios y mantiene la relación entre microbios y plantas (Gobat, 2004). Por lo que es importante conocer esta matriz de soporte utilizada en la operación de una CCM en donde los electrodos y la planta viva estén enterrados. Los suelos son la fuente común de inóculo en sistemas de tratamiento biológico debido a la presencia de microbios naturales ricos, de ahí su uso como sustratos en la operación de CCM (Wolinska, 2014). El ecosistema microbiano en la raíz de una planta depende mucho de tipo de suelo que se utiliza. Los suelos más empleados en la operación de CCM incluyen suelo natural, agrícola, suelos forestales, suelos de jardín mezclado con estiércol de vaca, tierra para macetas, suelo inundado, suelo rojo, arena, limoso, arcilloso, suelo de turba. En algunos estudios se ha evidenciado que los suelos de agricultura poseen

un ecosistema microbiano más denso que el de suelo boscoso debido a las relaciones C/N más bajas y la riqueza de especies en el suelo agrícola (Hong, 2005). La estructura del suelo, textura, la disponibilidad de nitrógeno, y el pH del suelo son los conductores para dar forma a la comunidad bacteriana. Con una serie de variaciones los tipos de suelos es posible estudiar las correlaciones entre el voltaje y el crecimiento de las plantas de una CCM que utilizan la materia orgánica del suelo como combustible.

-Bacterias como biocatalizadores para la generación de energía

Los microbios donan electrones al ánodo mediante la utilización de los sustratos que se encuentra en la zona de la rizósfera a través de dos mecanismos, ya sea por transferencia directa de electrones o de transferencia de electrones mediada. Este último requiere de mediadores para la producción de energía eléctrica (Logan et al., 2006). Existe una relación única entre la zona de las raíces de las plantas y los microorganismos. Esta relación es la disponibilidad de alimento por la rizósfera a los microorganismos y el papel de los microorganismos para una mejor absorción de los nutrientes de las plantas (Mohán, 2011). Las comunidades microbianas dentro de una CCM dependen de la filogenia y la especie de la planta, material de electrodo y el tipo de suelo utilizado (queda forma a la comunidad bacteriana) (Berg, 2009). Cuanto mejor se adapta una comunidad microbiana a un sistema, tendrá una mayor posibilidad de un mejor rendimiento del mismo, ya que la comprensión de la población microbiana ayuda a comprender la competencia entre los donadores de electrones en la CCM (Rachnarin Nitorisravut, 2017). Dentro de estas comunidades bacterianas se encuentra una gran variedad, que son responsables de la generación de electricidad en una CCM como *Proteobacteria*, *Geobacteraceae*, *Ferricutes* y muchas clases desconocidas (Ruud, 2012). Un estudio sobre la diversidad filogenética bacteriana del suelo y la heterogeneidad del ADN revelaron que se observaron más de 4600 genomas distintos en 1g de suelo. Lo que hace difícil cuantificar la población microbiana que se encuentra en la rizósfera debido a su complejo microambiente (Rachnarin et al., 2017). Además de esto, muy pocos estudios están presentes en la interacción microbiana con las plantas, en particular para el intercambio de sustrato y nutrientes.

-Diseño de una Celda de combustible microbiano fotosintética.

La sostenibilidad y la practicidad de un sistema depende de una operación rentable y un diseño simple de construcción, facilidad de manejo y su funcionamiento a largo a plazo. Una celda de combustible microbiana fotosintética a diferencia de una CCM evita el uso de una membrana de intercambio de protones, ya que la bioelectricidad es impulsada por la rizodeposición de las plantas vivas (Chiranjeevi, 2019). Por lo que se busca al construir una celda de combustible microbiana fotosintética es un diseño con una configuración efectiva. Actualmente existen dos tipos de diseños:

-Modelo de placa plana

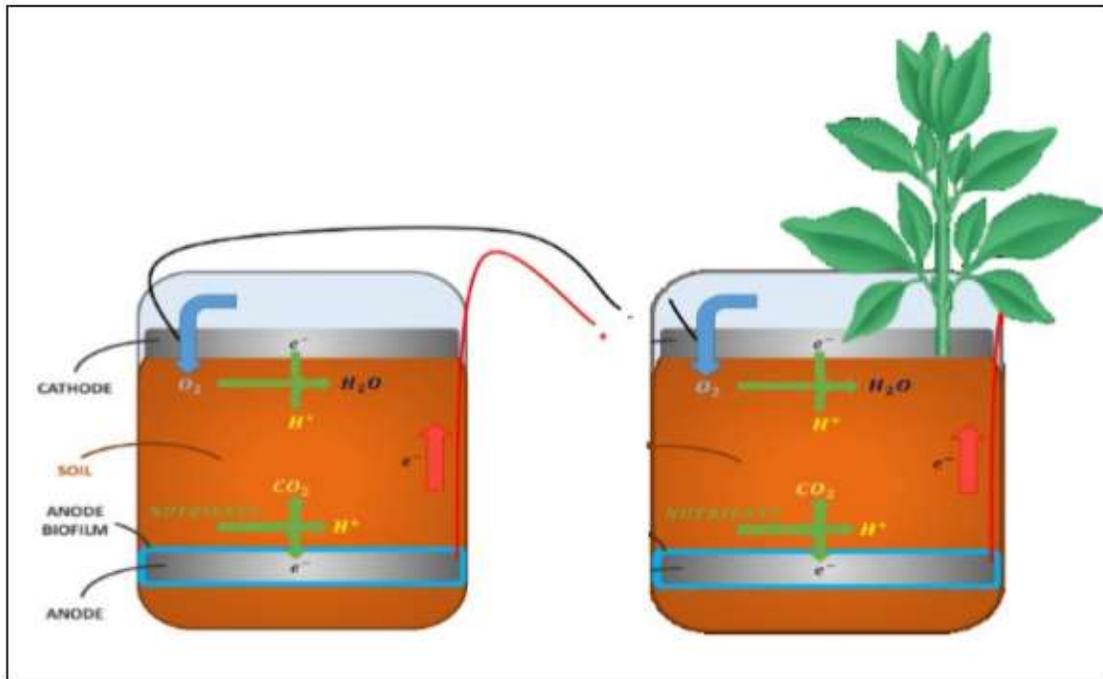
Se han informado muy pocos estudios sobre la PMFC de placa plana. Este diseño consiste en un ánodo y un cátodo, colocados uno al lado de los otros separados por una membrana vertical. Un estudio presentado por Helder Marjolein (2010) diseño dos PMFC de placa plana con el compartimiento del ánodo separado del compartimiento del cátodo por una membrana de intercambio catiónico operado en una cámara climática variando el material del ánodo. El material del electrodo similar mostró máxima potencia de salida en cambio en el ánodo los materiales de los electrodos mostraron un rendimiento más débil (Helder, 2013).

-Modelo Tubular

Este último diseño es el más aplicado dentro del estudio de las CCM. Consiste de un solo compartimiento que incluye un ánodo y el cátodo, donde se elimina la necesidad de la cámara catódica mediante la exposición del cátodo directamente al aire (Farías, 2016). Los electrones generados en la rizósfera se reciben en el ánodo y se desplazan hacia el cátodo cuando el circuito está cerrado (Kudke, 2008).

Para construir una CCM tubular se han empleado diferentes materiales, en algunos se han hecho el uso de un tubo de vidrio como el comportamiento de ánodo y un vaso de precipitado de vidrio como el comportamiento catódico con una membrana de intercambio catiónico en la parte inferior del tubo de vidrio del ánodo (De Schamphelaire et al., 2008).

Algunos otros son fabricados con recipientes de plástico llenos de tierra y se coloca un ánodo a diferentes profundidades en el reactor y el cátodo se coloca en parte superior como se muestra en la Figura 4 (Ruud et al., 2010). Este diseño de celda ofrece un diseño simple y rentable.



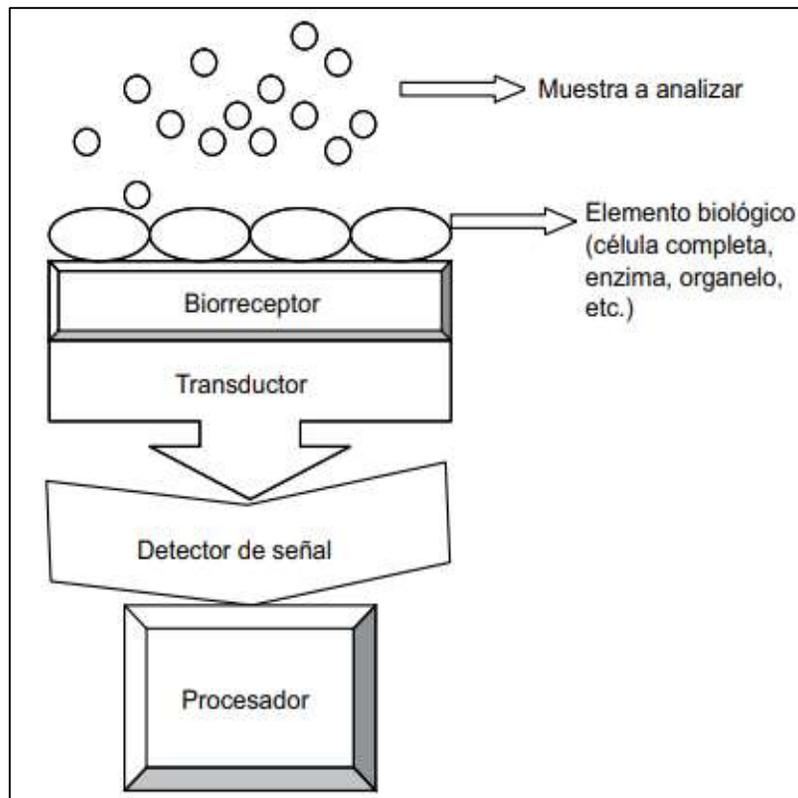
**Figura 4.** Esquema de una celda de combustible microbiano fotosintética de modelo tubular.  
**Fuente:** (Brunelli, 2016)

-Aplicaciones de la Celda de combustible fotosintética.

Las CCM tienen una gran diversidad de aplicaciones como un sistema verde en azoteas y el desarrollo para la producción de electricidad en combinación con la producción de alimentos (Helder, 2013). Así como la remediación de suelos, manejo de enfermedades de las plantas y otros procesos innovadores como los biosensores ambientales (Chiranjeevi, 2019). Los biosensores basados en una CCM son considerados como la próxima generación de tecnología de biosensores para la monitorización ambiental, debido a su alimentación propia con un gran potencial a largo plazo (Jian et al., 2015).

### 3.3 Biosensores

Un biosensor es un dispositivo analítico que transforma un proceso biológico en señales eléctricas que permitan su cuantificación. Consta de un componente biológico y componente transductor. El componente biológico es el elemento de reconocimiento que interacciona de forma selectiva con una sustancia determinada. El componente transductor es capaz de interpretar dicha interacción y transformarla en una señal medible. La unión de ambos componentes confiere las características de selectividad y sensibilidad a los biosensores como se observa en la figura 5 (Ruíz, 2011).



**Figura 5:** Esquema de los principales componentes que conforman un biosensor.  
**Fuente:** (Castro et al., 2007)

Cabe destacar que las características fisicoquímicas del analito de interés son las determinantes para la elección del material biológico, mientras que el tipo de elemento de reconocimiento es el que determina el sistema transductor (Castro et al., 2007). Los

biosensores cuentan con una clasificación atendiendo a las siguientes variables: tipo de interacción, elemento de biorreconocimiento y sistema transductor, véase en la Tabla 2

**Tabla 2:** Clasificación de los biosensores según su tipo de interacción, elemento de biorreconocimiento y sistema transductor.

Tipo de Interacción	Elemento de biorreconocimiento	Sistema Transductor
Bioafinidad	Enzima	Electroquímico: potencial redox, conductimétricas, amperométricos, etc.
	Orgánulo, tejido o célula completa.	Óptico: optoelectrónicos.
Biocatalítica	Receptor biológico	Piezoeléctrico: Cambios de frecuencia sobre una superficie cristalina; generalmente cuarzos
	Anticuerpo	Termométrico: detección de calor.
	Ácidos nucleicos PIM, PNA, aptámero	Nanomecánico: cambio en la tensión superficial de una placa de silicio sumergida en líquido, lo que ocasiona un cambio en la deflexión y/o frecuencia de resonancia.

-Clasificación por tipo de interacción.

- Biosensores Bioafinidad: estos biosensores se basan en la interacción del analito de interés con el elemento de reconocimiento, sin que haya transformación catalítica, pero produciendo una reacción de equilibrio en la que se forma un complejo analito-receptor (Marquéz, 2017).
- Biosensores Biocatalíticos: se basan en la utilización de biocatalizadores para favorecer una reacción química y obtener uno o varios productos conocidos, sin consumo de biocatalizador que se regenera y puede ser utilizado de nuevo (González, 2005).

## -Importancia y aplicación de los Biosensores

Los biosensores han sido desarrollados como métodos analíticos, cuantitativos o semicuantitativos para detectar determinados analitos o compuestos específicos. Estos pueden ofrecer dispositivos de detección de poco costo, fáciles de usar, sensibles y altamente exactos en una variedad de investigación y de usos comerciales (Mandal., 2019). Debido a lo anterior, hoy en día los biosensores han adquirido una gran importancia principalmente es diferentes campos como lo son:

- Usos médicos.
- Usos en la industria alimentaria.
- Usos ambientales: los biosensores ambientales se han desarrollado para la detención de efectos de contaminación por agentes químicos en el ambiente. Los dispositivos se pueden emplear para él monitoreando de calidad del aire, agua y suelo, implementados en sistemas de seguridad ambiental (Castro *et al*, 2007). Otros dispositivos innovadores son los biosensores basados en CCM, que con ayuda de organismos fotosintéticos empleados como biosensores se puede llevar a cabo la detención de contaminantes ambientales y algunas otras variables.

## -Biosensores basados en Celdas de Combustible Microbiano

Como se ha definido anteriormente un biosensor es un dispositivo que utiliza un biorreceptor, ya sea una enzima, un microbio o una molécula biológicamente activa que responde a un analito o cambio en su concentración y un transductor que convierte la respuesta en una salida medible (Liang, 2011). Por lo cual, una MFC al ser un dispositivo que usa las bacterias en la cámara anódica como el elemento de reconocimiento biológico y genera directamente una salida eléctrica en respuesta al analito añadido de forma exógena este podría considerarse como un biosensor (Jian et al., 2015).

Un biosensor basado en MFC, las bacterias pueden detectar el analito y luego dar una respuesta correspondiente en su corriente eléctrica de salida, en el que la etapa de

detección y la etapa de transición de la señal eléctrica se integran y se puede completar en una etapa sin una señal de transductor y una fuente alimentación externa. El biosensor basado en una CCM no necesita un transductor para convertir la salida a una señal eléctrica debido a que la señal medida es ya una corriente eléctrica (Peixoto, 2011)

Una CCM puede poseer una propiedad de inicio automático y funcionar como un biosensor independiente, esto debido a la población microbiana que se expande por la producción de los microbios en los volúmenes provistos, lo que produce una capacidad de autorregeneración. Dependiendo del volumen de la cámara del ánodo y las bacterias utilizadas, el rango de salida de corriente de las células está en el rango de mA- $\mu$ A. Por lo tanto, la señal de salida del MFC es simple leer e interpretar (Debrata, 2018).

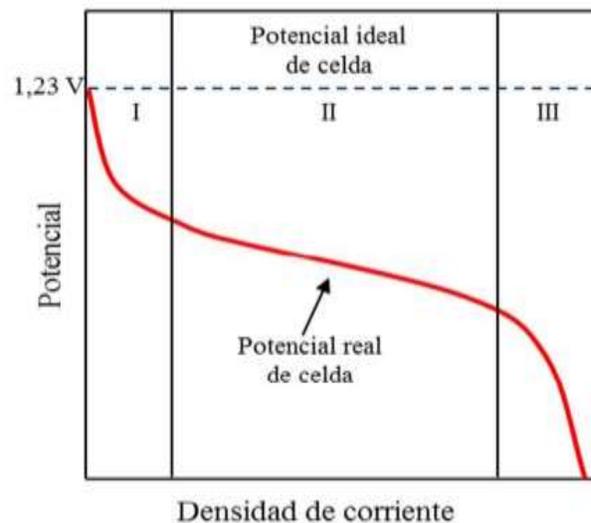
### **3.3.1 Interpretación de los biosensores electroquímicos como celdas de combustible microbiano**

Una forma de evaluar el desempeño del sistema de generación de energía es por medio de las curvas de polarización (véase en la Figura 6.) Éste expresa el voltaje de celda y la densidad de potencia en función de la densidad de corriente (Henjje, 2010). Estas curvas resultan realmente útiles para la determinación de la resistencia interna de una CCM, pues, el pico de la curva corresponderá al punto donde las resistencias internas y externas, son iguales (Heijne, 2010). Para ser caracterizados como biosensores bioelectroquímicos anticipadamente se deben tomar en cuenta las curvas de polarización que arroja gráficas de potencia y corrientes para las CCM que indican el comportamiento de cada una. Las curvas de polarización pueden ser generalmente divididas en tres zonas:

- **Región I de transferencia de carga:** A bajas densidades de corriente hay una caída brusca de la potencia con la densidad de corriente. En esta zona, el mecanismo dominante es las pérdidas (polarización) por activación, debido a la velocidad limitada de las reacciones electroquímicas.
- **Región II Óhmica:** A valores intermedios de la densidad de corriente, las pérdidas son debidas a las resistencias de los diferentes elementos de la celda, como puede deducirse de la relación lineal entre el potencial y la densidad de corriente, corresponde a un

comportamiento equivalente de la ley de Ohm. En esta zona predominan pérdidas óhmicas.

- **Región III de transporte de masa:** Nuevamente a altas densidades de corriente se produce una caída brusca de potencia con la densidad de corriente. En esta zona las pérdidas por concentración son dominantes (efectos de transporte de masa). Estas pérdidas son atribuidas a la falta de reactivos al alcance los centros activos del electrocatalizador en los electrodos.



**Figura 6:** Curva de polarización del potencial en función a la densidad de corriente, donde se aprecia las existencias de las tres regiones..

**Fuente:** (García-Villarrubia, 2015)

La interpretación de los resultados de los biosensores electroquímicos se guía por las técnicas electroquímicas:

- La técnica amperométrica mide a un potencial constante, la intensidad de corriente producida sobre la superficie del electrodo por una reacción de oxidación-reducción (Bonetto, 2013). La intensidad es directamente proporcional a la cantidad de especie electroactiva y podrá ser relacionada con la concentración de analito. Estos constan de un sistema de tres electrodos de referencia, auxiliar y de trabajo. Se aplica un potencial sobre el electrodo de trabajo, que se mantendrá constante gracias a un electrodo de referencia. El electrodo de trabajo registrará un cambio de corriente al producirse la reacción electroquímica (Martínez, 2020).

- Las técnicas amperométricas presentan numerosas ventajas para su uso en el área de los biosensores, entre ellos una relación lineal entre la concentración y la intensidad de corriente (Saavedra, 2018).

- La técnica conductimétrica miden cambios en la conductividad del medio. Al igual que en los biosensores potenciométricos, una reacción química o la formación de diversos complejos pueden variar la concentración de iones en el medio, cambio de movilidad de los mismos hacia el ánodo y cátodo (Martínez, 2020). Los cambios de movilidad iónica alteran las propiedades conductoras del medio, alterando también la transferencia de cargas por el sistema. Estos biosensores de este tipo son adecuados para la mini autorización y no requieren electrodos de referencia en el sistema (Lei Yu, 2006).

- La técnica potenciométrica mide la diferencia de potencial entre dos electrodos manteniendo la corriente constante. Esta diferencia de potencia es causada por una reacción química que varía la concentración de iones presentes en el medio. La concentración del analito sobre el electrodo evoluciona obligando a variar el potencial para mantener el valor de la corriente constante. La relación entre la señal analítica y potencial depende del logaritmo de la concentración (Saavedra, 2018). Las celdas de combustible microbiano son sistema bioelectroquímicos que proporcionan una corriente eléctrica mediante la capacidad de las especies de microorganismos electrogénicos.

Las técnicas mencionadas anteriormente explican cómo se puede emplear un biosensor para conocer la calidad del suelo en una CCM. La materia orgánica contenida en el suelo al ser utilizada como combustible para la generación de corriente, el cambio de concentración de la materia orgánica en la CCM puede afectar la generación de esta. La corriente hace la medición de la velocidad de oxidación de la materia orgánica por los microbios en la cámara anódica, por lo que se especula que una alta concentración de materia orgánica, aumentara la corriente. Por otro lado, la utilización del sustrato microbiano y la generación de corriente en la CCM, depende de la limitación de concentración de sustrato limitante en la ecuación

de Monod. Por lo que la tasa de utilización de sustrato microbiano puede alcanzar un nivel de saturación al aumentar la concentración del sustrato.

#### **4. HIPÓTESIS**

La aplicación de las celdas de combustible microbiano como dispositivos electroquímicos pueden determinar la calidad del suelo y actuar como biosensores en el crecimiento de las plantas para los cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y zarzamora (*Rubus ssp*).

## 5. OBJETIVOS

### Objetivo general:

Desarrollar dispositivos electroquímicos con función de biosensores del crecimiento de las plantas para los cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y zarzamora (*Rubus ssp*) para la determinación de los parámetros de la calidad del suelo.

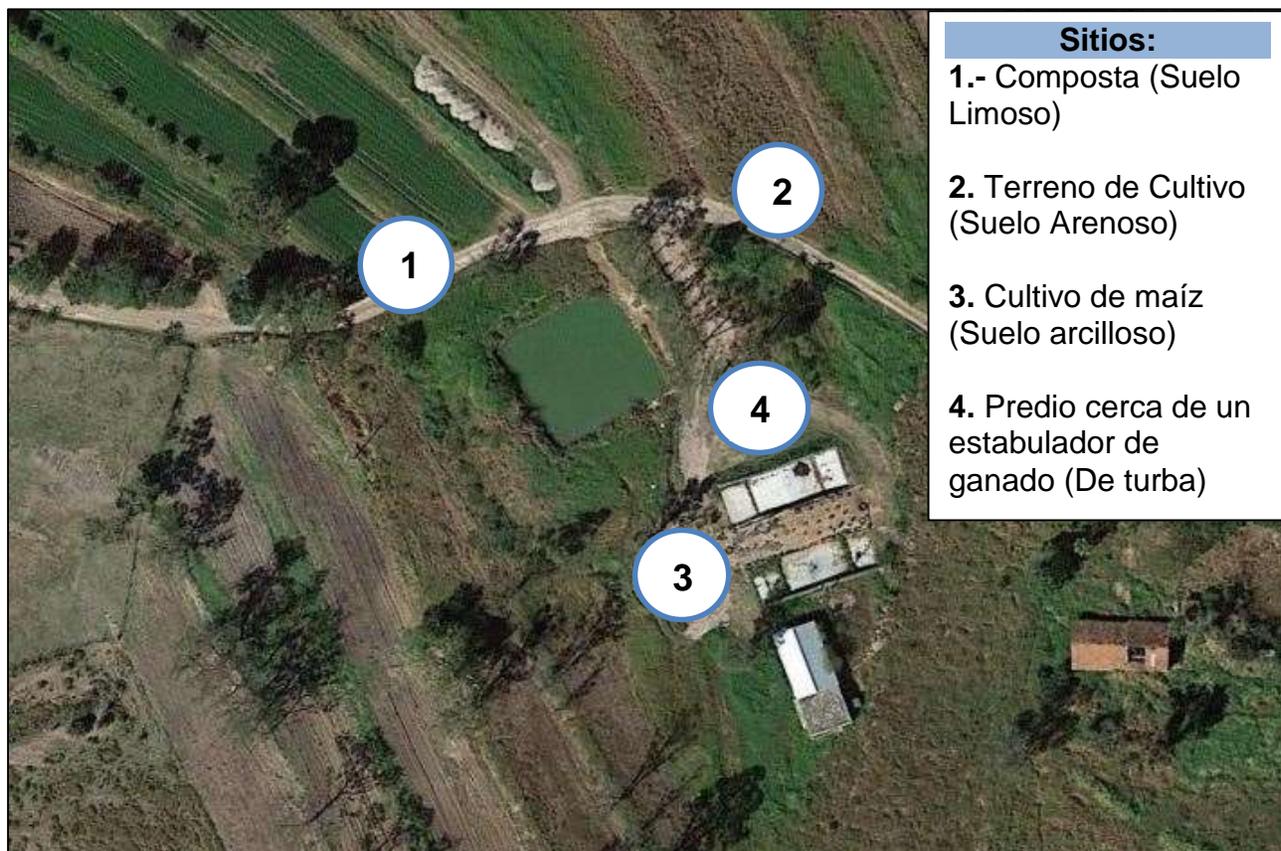
### Objetivos específicos:

- Evaluar el comportamiento electroquímico de generación de energía eléctrica y sensado de señales (voltaje-corriente) en el crecimiento y desarrollo de las plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*), en diferentes tipos de suelo.
- Evaluar la existencia de correlación entre el comportamiento de la generación de carga (voltaje) de los dispositivos electroquímicos, sobre las diferentes variaciones de enmiendas orgánicas para los cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum*).
- Probar la correlación existente entre la generación de carga y desarrollo de las plantas de zarzamora (*Rubus ssp*).

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Selección y muestreo de suelo.

Para la elaboración de las celdas microbianas, inicialmente se seleccionaron y muestrearon cuatro tipos de suelo: limoso, arenoso, arcilloso y de turba. La selección se realizó dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico del Valle de Morelia en la zona noroeste. Los puntos de muestreo como se muestra en Figura 7, se determinaron de acuerdo a las características de cada tipo de suelo.



**Figura 7:** Puntos de muestreo dentro del Instituto Tecnológico del Valle de Morelia.

**Fuente:** Google Earth, 2022

La primera muestra de suelo (Limoso) se selecciono de un suelo de composta de estiércol de vaca, el cual presentaba una textura fina con alto contenido en materia orgánica y un tono cafésoso. La segunda muestra (Arenoso) fue seleccionada de un terreno de cultivo de

textura arenosa y color oscuro. La tercera muestra seleccionada (Arcilloso), se adquirió de una área de cultivo de maíz, el suelo presentó un color gris y textura fina parecida al barro. Para la cuarta muestra se seleccionó un punto donde existe escurrimiento de lixiviado derivado del preparado del alimento para ganado que se encuentra en un establo dentro de la Institución, el suelo es rico en materia orgánica, con textura muy suave y de color cafésoso (De turba).

### 6.1.1 Obtención de las muestras.

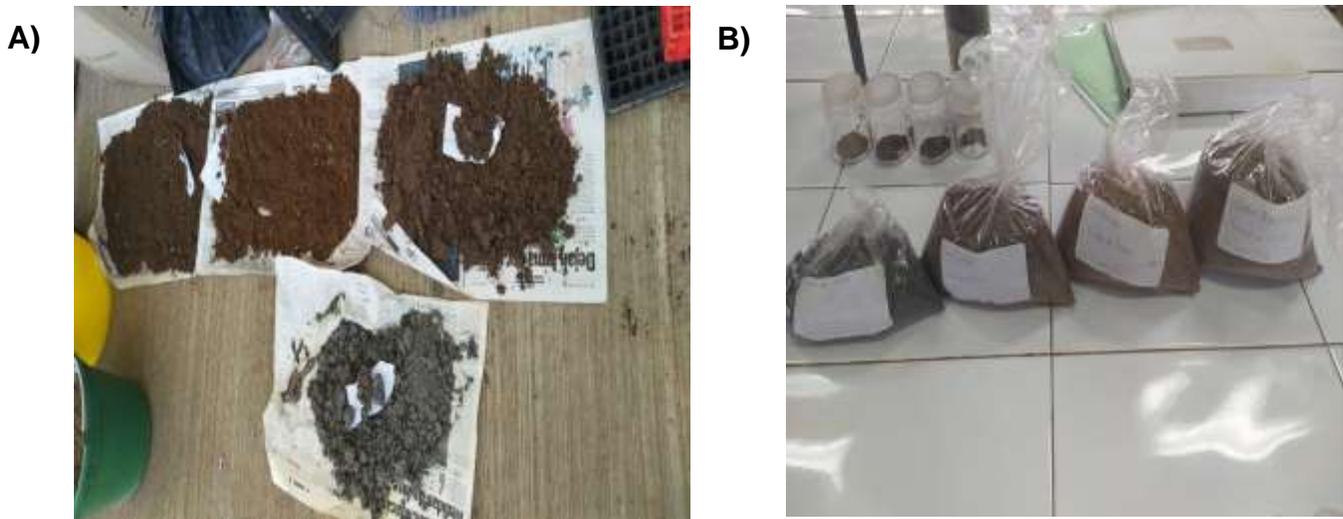
Para llevar a cabo la toma de muestra se emplearon como herramientas una pala recta, cubeta, regla, libreta, marcador, etiquetas y bolsas de plástico con capacidad de 2 kg. Se comenzó limpiando la superficie para remover cualquier residuo (hierbas o residuos de cultivo). Una vez limpia la superficie se enterró la pala recta a una profundidad de 30 cm (medida con ayuda de la regla). El suelo obtenido se colocó en una cubeta y después se trasladó a una bolsa de plástico, esta última se etiquetó con los datos correspondientes y se almacenó dentro de una hielera para su traslado al laboratorio. En cada muestra se extrajo un kilo de suelo como se muestra en la Figura 8.



**Figura 8:** Obtención de muestras **A)** suelo extraído **B)** identificación y resguardo de la muestra.

## -Preparación de las muestras de suelos

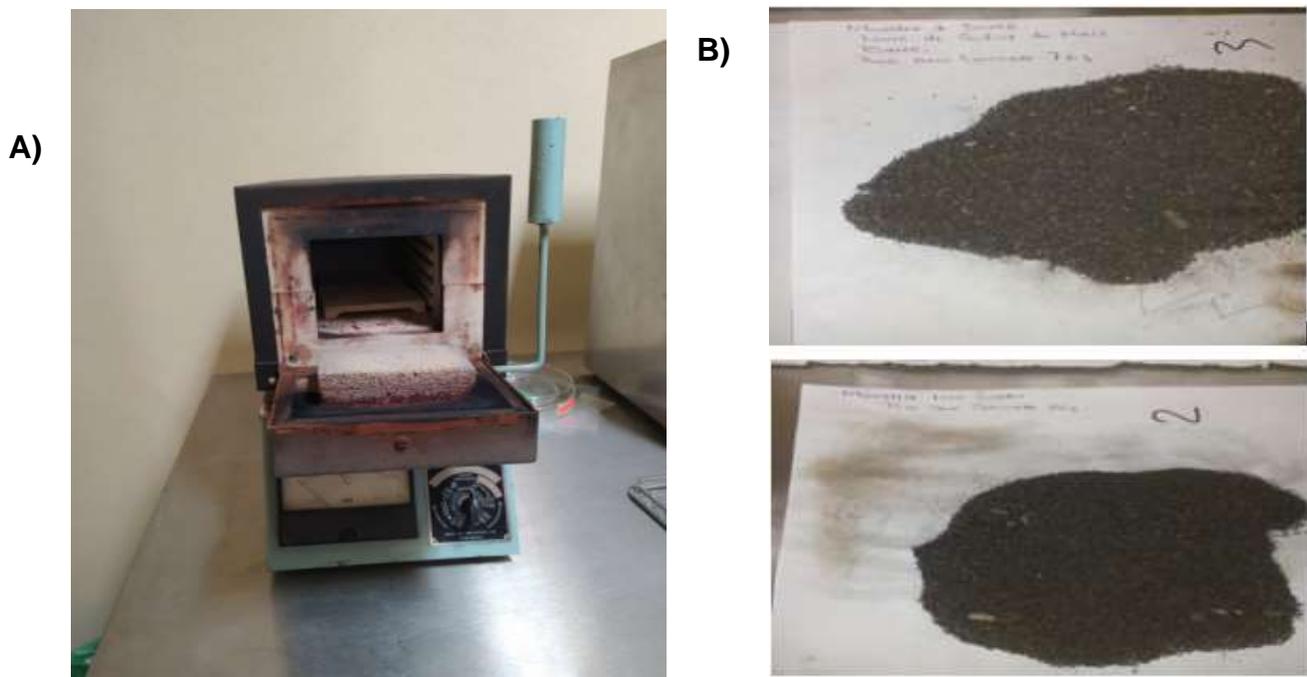
Una vez obtenidas las muestra de suelo, se colocaron sobre un papel periódico con el fin de secarlas al aire libre y bajo los rayos del sol para remover la humedad. Una vez secas las muestras se incorporaron dentro del tamiz de 6 mm para realizar la separación de los sólidos de grande tamaño y lograr partículas de la misma proporción. Así pues, terminado el tamizado de las muestras, se colocaron dentro bolsas y se identificaron para posteriormente trasladarse al laboratorio para el siguiente, tratamiento como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9:** *Pretratamiento de las muestras de suelo A) secado de las muestras recolectadas B) muestras tamizadas.*

Para el pretratamiento de las muestras se usó el siguiente equipo: horno que mantenga temperaturas de 110 °C, Balanza de 1200g, mufla que mantenga temperaturas de 445 °C, Crisoles, desecador de tamaño adecuado, tamiz N°10, guantes de asbesto, pinzas y espátula. De los cuatro tipos de suelos se tomarón 100 g de muestra representativa de porción pasante por el tamiz, esta muestra se colocó en un recipiente y se llevo al horno para retirar por completo la humedad que aun contenian a una temperatura 110 °C hasta llegar a un peso constante, una vez seca la muestra se saca del horno y se deja enfriar como se muestra en la Figura 10. Posteriormente, esta se coloca en los crisoles y se pesa

en la balanza, luego se colocan los crisoles dentro de la mufla durante 3 horas a una temperatura 400-450 °C. Una vez transcurridas las 3 horas, con ayuda de las pinzas se saca la muestra de la mufla con mucho cuidado y se llevo al desecador para dejarla enfriar, una vez enfriada la muestra se paso en la balanza para determinar los pesos y asi se calcúlo a materia orgánica (Crisol + suelo seco, después de la mufla).



**Figura 10:** Equipo y muestras utilizadas para la preparación de la muestra de suelo **A)** Mufla **B)** muestras calcinadas.

## 6.2 Análisis de las muestras de suelos.

Los análisis correspondientes se realizaron con base en la normatividad que existe para la caracterización de tipos de suelos que se encuentran establecidos por la Norma oficial mexicana **NOM-021-RECNAT-2000**: que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

La NOM también establece las siguientes técnicas para los siguientes análisis del suelo.

- AS-02 pH medio de agua.

- AS-23 pH en cloruro de calcio
- AS-03 Densidad aparente
- AS-04 Densidad real
- AS-07 Contenido de materia orgánica
- AS-18 Medición de conductividad eléctrica
- AS-19 Determinación de cationes solubles (calcio, magnesio, sodio y potasio).
- As-01 Preparación de la muestra de suelo.

### 6.3 Construcción de celdas de combustible microbiano con semilla de jitomate.

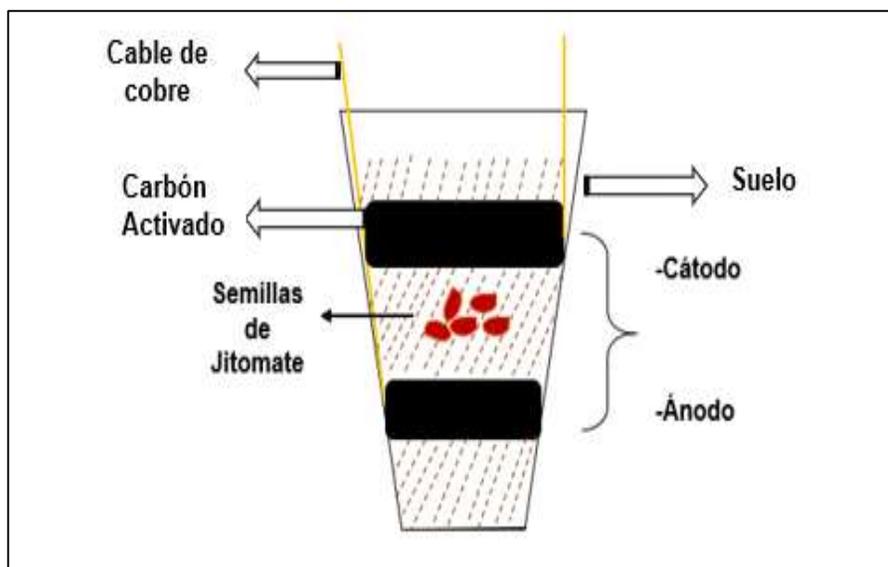
Para llevar a cabo la construcción de las celdas de combustible microbiano se tomó el diseño propuesto por Timmers (2010) que consiste en un modelo tubular y una configuración del cátodo en la parte superficial del suelo y el ánodo en la rizósfera de la planta.

Para la construcción de esta celda de combustible microbiano, las herramientas que se uso fue una charola de unigel para germinar con las medidas con 200 orificios, de los cuales se utilizaron 16 para la elaboración de las celdas y colocar los cuatro tipos de suelos como se ve la distribución en la Figura 11. Adicionalmente se empleó una solución de lixiviado de composta rica en materia orgánica para el enriquecimiento del suelo en diferentes soluciones 10, 15, 25 y 50 ml. Así como carbón activado y dos cables de cobre de 7 y 5 cm para la elaboración de los electrodos.

Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Solución	Tipo de Suelo
				10 ml	- M1 : Limoso
				15 ml	- M2 : Arenoso
				25 ml	- M3 : Arcilloso
				50 ml	- M4 : De turba

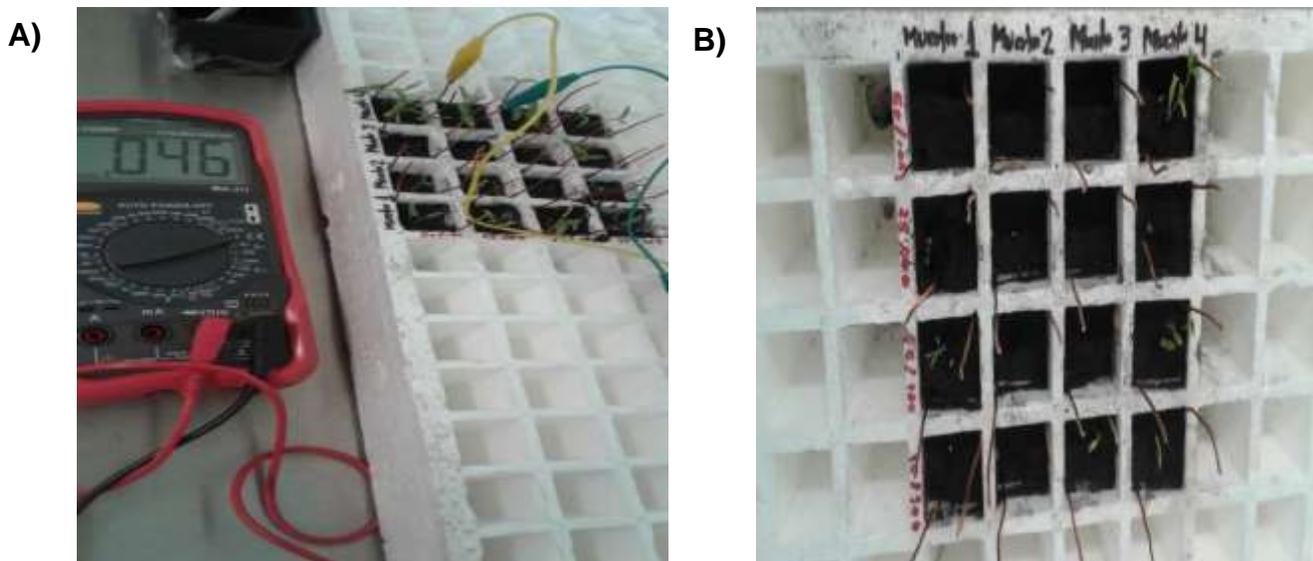
**Figura 11 :** Distribución de las CMM de Jitomate con respecto a la solución de materia orgánica añadida (ml).

En cada uno de los orificios de la charola de germinación, se agregaron 2 gramos de suelo, y 2g de carbón activado en polvo. En este último se inserto en cable de cobre de 7 cm que mantiene contacto con el carbón activado formando el electrodo ánodico. Enseguida se incorporaron 4g de suelo junto con 5 semillas de jitomate (esta capa intermedia de suelo con las semillas actúa como membrana entre el ánodo y el cátodo de la celda). Finalmente se colocaron 2g de carbón activado y se insertó un cable de cobre de 7 cm que mantubo intacto con el carbón formando el electrodo cátodico. En la Figura 12, se muestra la distribución de los componentes de la CCM. Este proceso se repitió para cada una de las 16 celdas.



**Figura 12:** Configuración de la CCM con semilla de jitomate.

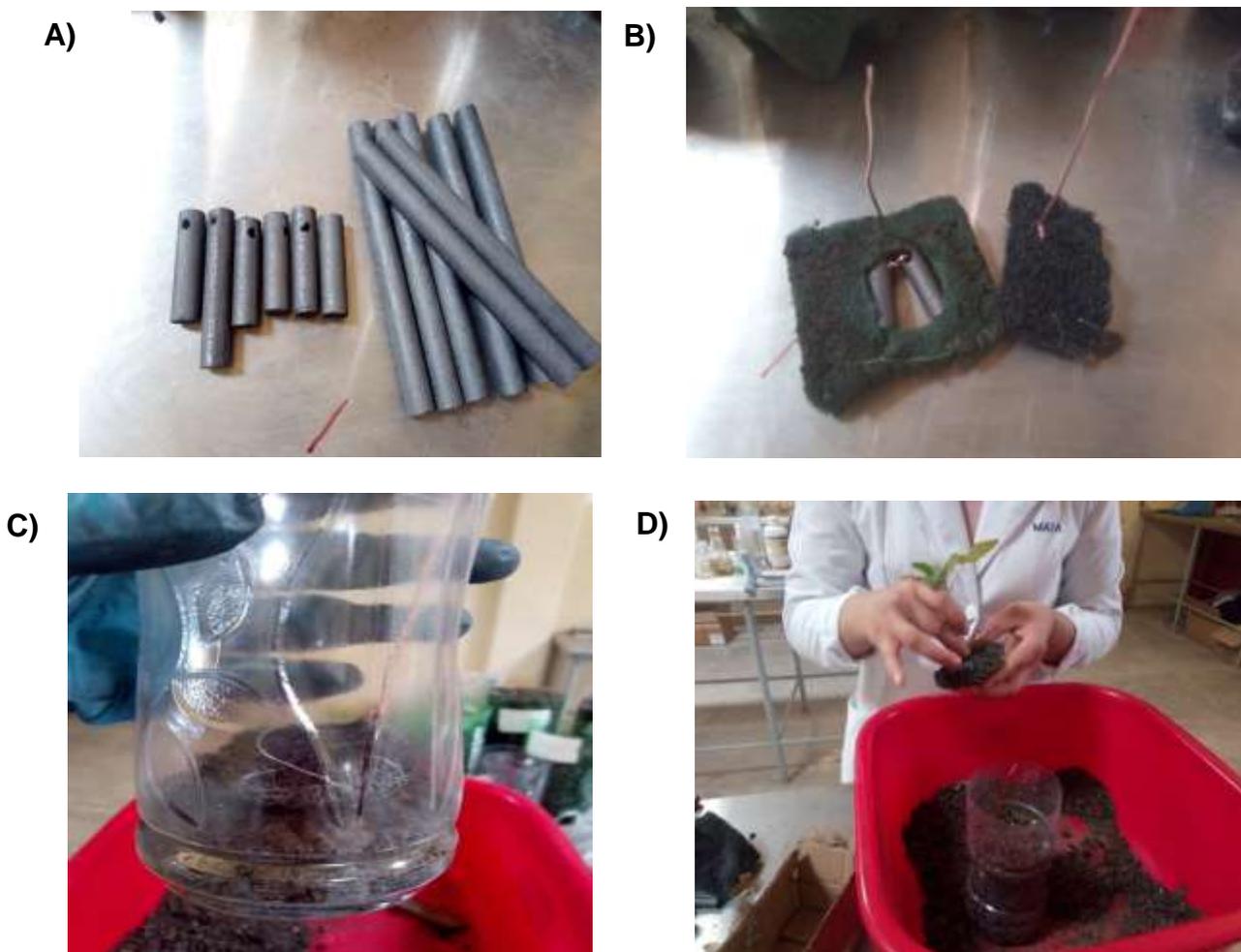
La experimentación y monitoreo de las Celdas de combustible microbiano con semilla de jitomate (*Solanum lycopersicum*) se llevó a cabo durante cuatro semanas, se tomó la generación de voltaje en cada una de las celdas con un multímetro modelo Mul 276 y con el apoyo de dos caimanes, como se aprecia en la Figura 13. Además, se registro el crecimiento de las plantas de jitomate con una regla, para probar la correlación entre la generación de carga y el desarrollo de las plantas de jitomate.



**Figura 13:** Monitoreos de las CCM de jitomate **A)** toma de la generación de carga **B)** germinación de las semillas de jitomate.

#### 6.4 Elaboración de las celdas de combustible microbiano con planta de zarzamora.

Para la elaboración de estas celdas se utilizó un recipiente cilíndrico de PET con medidas de 15 cm de longitud y 5 cm de diámetro. Para la construcción de los electrodos se utilizaron tres barras de grafito de 6 cm de largo por 3 cm de diámetro. Cada barra de grafito fue perforada en la parte superior con una aguja hasta obtener un orificio de 0.5 cm diámetro y 1.57 cm de circunferencia, después en este orificio se introdujo un cable de cobre de 17 cm. En este último, se tomaron 7 cm para unir las tres barras de grafito mientras que los 10 cm restantes de cable de cobre se dejaron libres con el objetivo de que llegara a la parte superior de la celda para la toma de corriente. Finalmente se incorporaron dentro de una esponja de textura porosa. El segundo electrodo se realizó con el mismo proceso a excepción que se realizó una abertura de 3 cm en la parte central de la esponja, con el objetivo de que la planta quedara en medio de este electrodo como se muestra la Figura 14. Los cables de cobre utilizados se distribuyeron en dirección contraria uno del otro dentro de la celda.



**Figura 14:** Elaboración de electrodos **A)** barra de grafitos perforadas **B)** diseño de cátodo y ánodo para su incorporación en la CCM, **C)** colocación del ánodo en la rizosfera, **D)** colocación del cátodo en la superficie de la planta.

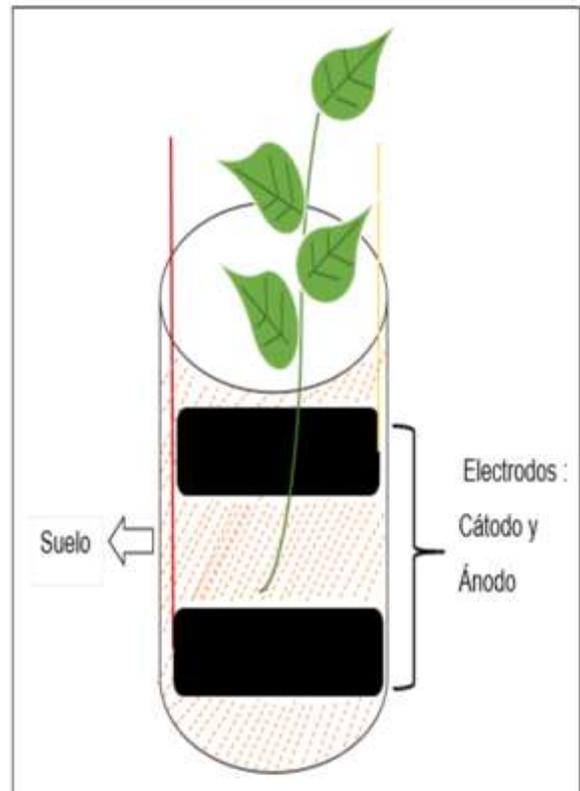
#### 6.4.1 Configuración de la CCM con planta de Zarzamora.

Para la elaboración de esta celda de combustible solo se hizo uso de suelo de composta. En la configuración de la parte anódica se agregaron 150g de suelo y despues primer electrodo. A su vez, en la parte media de la celda se incorporaron 650g de suelo seguido por la planta de zarzamora. Como parte final se agregó el segundo electrodo y 100g de suelo limoso, como se observa en Figura 15.

A)



B)



**Figura 15:** Configuración de la CCM de Zorzamora **A)** imagen exterior de la celda terminada, **B)** configuración interna de la CCM.

La experimentación y monitoreo de las Celdas de combustible microbiano con semilla de zarzamora (*Rubus ssp*) se llevó a cabo durante seis semanas, en el periodo que se tomó la generación de voltaje de cada celda con un multímetro modelo Mul 276 y el apoyo de dos caimanes, como se ve en la Figura 16. Se caracterizó la estabilidad del sistema eléctrico mediante curvas de polarización y potencia.



**Figura 16:** Representación de la toma de voltaje de las CCM de Zarzamora.

## 6.5 Diseño experimental

El diseño experimental consistió en modelo factorial con dos factores; el tipo de suelo y la enmienda de materia orgánica. Para evaluar la relación entre la generación de carga y el crecimiento de los cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum*) y su caracterización electroquímica como dispositivos en función como biosensores. El experimento se llevó a cabo en dos etapas.

En la primera etapa

1. Se construyeron 16 celdas de combustible microbiano con cuatro tipos de suelos. Donde se adicionó en cada una de las celdas distintas enmiendas de materia orgánica (lixiviado de composta).
2. Se realizó la medición de la generación de carga y la parte área de las plantas (tallo principal), así como, su caracterizaron electroquímica.

En la Tabla 3 se muestran los tratamientos aplicados en la primera etapa de experimentación.

**Tabla 3:** Diseño experimental para la elaboración de las celdas microbianas con aplicación en suelo, con distintas soluciones de materia orgánica, en cuatro tipos de suelo.

Construcción de CCM	V. Independiente		V. Dependiente	
	Tipo de suelo	Enmienda de MO		
1	Limoso	Solución 10 ml	<b>Generación de carga y Caracterización del sistema.</b>	<b>Crecimiento del cultivo</b>
		Solución 15 ml		
		Solución 25 ml		
		Solución 50 ml		
2	Arenoso	Solución 10 ml		
		Solución 15 ml		
		Solución 25 ml		
		Solución 50 ml		
3	Turba	Solución 10 ml		
		Solución 15 ml		
		Solución 25 ml		
		Solución 50 ml		
4	Arcilloso	Solución 10 ml		
		Solución 15 ml		
		Solución 25 ml		
		Solución 50 ml		

En la segunda etapa se construyeron cuatro celdas de combustible microbiano con plantas de zarzamora (*Rubus ssp*) en etapa de crecimiento. De acuerdo a los resultados obtenidos en la primera etapa de experimentación se seleccionó el suelo con mejor caracterización electroquímica para la elaboración de las celdas microbianas con zarzamora (*Rubus ssp*). Dentro de la configuración de la celda se realizó un cambio en el material de los electrodos por unos de grafito incorporados a una esponja de textura porosa, para lograr un mayor

contacto y adherencia de los microorganismos presentes en el suelo. Además, se construyó dentro de un recipiente cilíndrico de PET. Este segundo dispositivo se correlaciono con el sensado de señales de carga eléctrica (voltaje-corriente) generadas con respecto al desarrollo de las plantas de zarzamora (*Rubus ssp*). Se uso en modelo factorial de dos factores; el material de los electrodos y la plántula de zarzamora. En la Tabla 4 se presentan los tratamientos evaluados en la segunda etapa de experimentación.

**Tabla 4:** *Diseño experimental para la elaboración de las celdas microbianas con aplicación en suelo con plantas de zarzamora (Rubus ssp).*

Variable independiente	Variable dependiente
Electrodos de grafito	Generación de carga y Caracterización del sistema
Plántula de zarzamora	

### 6.6 Variaciones del sistema como variable respuesta

Las variaciones del sistema fueron evaluadas a través de las variables: generación de carga (voltaje), estabilidad del sistema (curvas de polarización) y crecimiento de las plantas (medición area de la planta).

#### 1. Generación de Carga:

La generación de carga muestra como se comporta el voltaje generado dentro de las cámaras en las celdas de combustible. Permite que se realicen de forma correcta las reacciones de óxido-reducción, ya que una disminución de voltaje a valores negativos indica que las reacciones se están generando en el ánodo y la reducción en el cátodo, lo que provoca que el voltaje de la celda sea negativo. La generación de carga se da a través de la fijación de los microorganismos que habitan la rizosfera de la planta, por lo cual se considera uno de los aspectos más importantes de la CCM, ya que

constituye el combustible para la generación de carga, debido a su importancia en el desempeño de las celdas se consideró como variable respuesta.

## 2. Estabilidad del sistema:

Un elemento fundamental para caracterizar las CCM son las resistencias internas que se dan por la estabilidad del sistema de las cámaras (voltaje). Las condiciones operativas que permitan determinarlas, son mediante las curvas de polarización que se generan realizando barridos desde los 2 Microhms hasta los 33  $\Omega$ , hasta lograr obtener la mínima resistencia interna y potencial máximo. Lo que permite que las celdas tengan menor resistencia interna, y así habrá menor pérdida de potencial en las cámaras.

## 3. Crecimiento del cultivo

La potencia de salida de una CCM se da a través de la fijación de electrones por los microorganismos que habitan la rizósfera de la planta, mismos que contribuyen al crecimiento vegetal creando una relación planta-microbio. Así mismo, la calidad del suelo esta fuertemente influenciada por estas interacciones microbianas, por lo que, el crecimiento de las plantas tiene la capacidad de servir como indicador de la degradación o empobrecimiento del suelo y la generación de carga dentro de la CCM.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Caracterización nutrimental del Suelo

En las Tablas 5 a la 9 se puede observar el resultado del análisis nutrimental obtenidos por cada uno de los suelos seleccionados para la elaboración de las celdas de combustible microbiano, mediante los métodos que establece la **NOM-021-RECNAT-2000**. En las cuales podemos identificar la cantidad de macronutrientes disponibles para el crecimiento de las plántulas.

#### 7.1.1 Suelo Limoso

En la Tabla 5 se observan los resultados nutricionales del suelo limoso, el cual presenta un porcentaje de materia orgánica de 5.08% los que nos indica es suelo fértil y mejora la capacidad de retención de nutrientes. Por el contrario, se obtuvo un porcentaje bajo de carbono con 2.94% dicho valor puede afectar la actividad biológica del suelo y provocar erosión en el mismo. El nitrógeno a su vez obtuvo un valor bajo con 0.25% esta deficiencia puede ocasionar muerte prematura en las plantas. Así mismo, en deficiencias se encontró al Magnesio ( $Mg^{+2}$ ) con 48.6 ppm este bajo valor provoca defoliación prematura y cambios en el verdor de los cultivos. Mientras que el valor del calcio ( $Ca^{+2}$ ) obtenido fue 810 ppm este valor indica deficiencia lo que puede inhibir el crecimiento y generar deformaciones en la planta. Por otro lado, se presentó deficiencia de fósforo (P) con 1.1 mg/L lo que puede producir crecimiento retrasado y frutos deformados. En cuanto al potasio K obtuvo un valor bajo con 95 ppm que genera decoloración en hojas y poca retención hídrica en las plantas. Debido a los bajos valores nutrimentales localizados en el suelo limoso, así como para llevar un adecuado desarrollo de las plantas, dichos valores deficientes serán incrementados en enmiendas de materia orgánica.

En la densidad aparente se obtuvo un valor bajo de 1 gr/cm<sup>3</sup>, este valor indica que es suelo bien aireado, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permitirá un buen desarrollo de las raíces (Gutiérrez, Julio 2010). Así mismo, se obtuvo un valor de 50% de porosidad del suelo lo que indica está dentro del rango del suelo ideal siendo el máximo el 60%. El valor obtenido permitirá el crecimiento adecuado de las raíces, el drenaje y aireación del suelo. El pH presentó un valor de 7.6, ligeramente alcalino, encontrándose fuera de los

valores del pH ideal del suelo que son neutro 6.0 y 7.0, dicho valor obtenido puede presentar condiciones desfavorables para el crecimiento de la planta al generar impermeabilidad y una lenta infiltración del agua a través del suelo. Mientras, que el valor obtenido en la conductividad eléctrica fue de 0.546 ds/m, por lo que el suelo limoso al presentar valor menor a los 1 ds/m permite el manejo de la fertilización y menor gasto de energía por parte del cultivo para la absorción de los nutrientes.

En la relación C/N los microorganismos del suelo deben tener una relación C/N en 8.5/1 a 11.5/1 donde se encuentran las condiciones ideales para alimentarse, desarrollarse y reproducirse. Por lo tanto, al obtener un valor de 11.6/1 nos indica que es un suelo sano para el desarrollo de los microorganismos. En relación al color, el suelo limoso presento un color Gris rosado 7.5 Y/R dentro de la escala de colores de Munsell, este valor denota un suelo con drenaje deficiente e indica periodos prolongados bajo inundación.

**Tabla 5:** Análisis nutrimental del suelo limoso

<b>Variable</b>	<b>Valores</b>	
<b>Densidad aparente</b>	1 g/cm <sup>3</sup>	Muy bajo
<b>Color</b>	Gris rosado 7.5	Y/R
<b>De materia orgánica (%)</b>	5.083	Alto
<b>Carbono (%)</b>	2.948	Bajo
<b>Nitrógeno (%)</b>	0.254	Bajo
<b>Relación C/N</b>	11.606	Medio
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.546 ds/m	Baja
<b>pH</b>	7.58	Ligeramente Alcalino
<b>P</b>	1.1 mg/L	Bajo
<b>% Porosidad</b>	50	Grande
<b>Ca<sup>+2</sup> + mg<sup>+2</sup></b>	858. 6 ppm	Bajo
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	810 ppm	Bajo
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	48.6 ppm	Bajo
<b>K</b>	95 ppm	Bajo
<b>Na</b>	34 ppm	Muy Bajo

### 7.1.2 Suelo Arenoso

En la Tabla 6 se observan los resultados obtenidos de la caracterización del suelo arenoso obteniendo los siguientes datos, este presentó un alto nivel de Magnesio ( $Mg^{+2}$ ) con 257 ppm este valor permitirá formación de raíces y un color uniforme en hojas y tallo. De la misma manera, también se encontró un valor en alto en materia orgánica con 4.44% los que nos indica un suelo fértil y mejora la capacidad de retención de nutrientes. Por otra parte, se obtuvo un porcentaje bajo de carbono con 2.55% dicho valor puede afectar la actividad biológica del suelo y provocar erosión en el mismo. El nitrógeno a su vez obtuvo un valor bajo con 0.22% esta deficiencia puede ocasionar una muerte prematura en las plantas. Por otro lado, se obtuvo un valor medio en potasio (K) con 216 ppm este valor se podrá mejorar el régimen hídrico de cultivo y su tolerancia a las sequías. En cuanto al nivel de calcio ( $Ca^{+2}$ ) este fue bajo con 360 ppm por lo que puede inhibir el crecimiento y generar deformaciones en la planta. Por último, se presentó deficiencia de fósforo (P) con 1.7 mg/L lo que puede producir un crecimiento retrasado y frutos deformados.

En la porosidad del suelo se obtuvo un valor de 12% lo que indica al ser un bajo valor de porosidad no permitirá el crecimiento de la raíz de las plántulas creando asfixia y alta retención de agua. En cuanto a la relación C/N se obtuvo un valor de 11.6/1 lo que nos indica que es un suelo sano para el desarrollo de los microorganismos. Mientras que el color presentado por el suelo arenoso fue Marrón amarillenta 10 YR lo que indica una alta presencia de hierro en el suelo, este mineral puede perjudicar el cultivo al no permitir la correcta absorción de fósforo.

El pH presentó un valor de 7.0 ligeramente alcalino lo que puede provocar condiciones desfavorables para el crecimiento de la planta al generar impermeabilidad y una lenta infiltración del agua a través del suelo. Por otro lado, el valor obtenido en la conductividad eléctrica fue de 0.726 ds/m. El suelo arenoso al presentar un valor menor a los 1 ds/m permite el manejo de la fertilización y menor gasto de energía por parte del cultivo para la absorción de los nutrientes.

**Tabla 6:** Análisis nutrimental del suelo arenoso

<i>Variable</i>	<i>Valores</i>	
<b>Densidad aparente</b>	0.892 g/cm <sup>3</sup>	Muy bajo
<b>Color</b>	Marrón amarillenta 10Y/R	
<b>De materia orgánica (%)</b>	4.44	Alto
<b>Carbono (%)</b>	2.577	Bajo
<b>Nitrógeno (%)</b>	0.222	Bajo
<b>Relación C/N</b>	11.60	Medio
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.726 ds/m	Baja
<b>pH</b>	7.50	Ligeramente alcalino
<b>P</b>	1.7 mg/L	Bajo
<b>Porosidad (%)</b>	12	Bajo
<b>Ca<sup>+2</sup> + Mg<sup>+2</sup></b>	617 ppm	Medio
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	257 ppm	Alto
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	360 ppm	Bajo
<b>K</b>	216 ppm	Medio
<b>Na</b>	77 ppm	Muy bajo

### 7.1.3 Suelo Arcilloso

En la Tabla 7 se muestran los datos obtenidos de la caracterización del suelo arcilloso, La materia orgánica tuvo un valor de 4.038% que según la **NOM-021-RECNAT-2000** indica que es un valor alto, por lo que el suelo presenta un nivel rico en MO, lo que favorece al suministro de micro y macronutrientes para las plantas. En la porosidad dio un porcentaje del 50%, que permite un flujo abundante y una distribución de agua y aire apropiada, además tiene la capacidad de almacenamiento por la porosidad que presenta.

La conductividad eléctrica fue de 0.136 ds/m, muy ligeramente salino, si la CE es baja esta facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad. El pH del suelo controla la disponibilidad de los nutrientes para las plantas, ahí su importancia, teniendo un valor para este suelo pH de 7.95 medianamente alcalino.

Para K un 96 ppm con valor alto, Na 33 ppm, Ca<sup>+2</sup> 430 ppm con un valor medio, Mg<sup>+2</sup> 103.2 ppm, con valor medio, entre mayor sean los valores de cationes mayor será la fertilidad del suelo, el potasio es uno de los nutrientes que tiene que estar presente en mayor cantidad ya que es el responsable de las actividades metabólicas, la más importante es la fotosíntesis. Por otra parte, estos cationes forman parte del CIC que es la medida de la cantidad de nutrientes que el suelo puede almacenar y que están disponible para cultivos. Mientras que el Carbono tiene un porcentaje de 2.34%, considerado como porcentaje bajo para los requerimientos de las plantas. Para el Nitrógeno se registró un dato de 0.2019 %, establecido en la norma como un porcentaje bajo y la relación tuvo 8.016 observando que el suelo arenoso es uno de los mejores suelos para cultivos por las propiedades que tiene. Para el Fosforo 6.6 ppm en una relación 5.5-11 según la NOM se establece en un valor medio para el valor del suelo.

**Tabla 7:** Análisis nutrimental del suelo arcilloso

<b>Variable</b>	<b>Valores</b>	
<b>Densidad aparente</b>	1.3 g/cm <sup>3</sup>	Bajo
<b>Color</b>	Marrón Pálido 10 Y/R	
<b>De materia orgánica (%)</b>	4.038	Alto
<b>Carbono (%)</b>	2.34	Bajo
<b>Nitrógeno (%)</b>	0.2019	Bajo
<b>Relación C/N</b>	8.016	Bajo
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.136 ds/m	Efectos despreciables
<b>pH</b>	7.95	Alcalino
<b>P</b>	6.6 mg/L	Medio
<b>Porosidad (%)</b>	50	Alto
<b>Ca + Mg</b>	533.2 ppm	Medio
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	103.2 ppm	Medio
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	430 ppm	Bajo
<b>K</b>	96 ppm	Bajo
<b>Na</b>	33 ppm	Bajo

#### 7.1.4 Suelo de Turba

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del suelo de turba arrojando los siguientes datos, obteniendo para materia orgánica un porcentaje de 3.770 siendo un valor bajo, en lo que se puede deducir que es un suelo pobre en MO, por lo tanto, será un suelo que requiere agregar tanto micronutriente como macronutrientes. Para la porosidad tiene un valor de 50% que indica que el suelo presenta una alta compactación y la facilidad de circulación de agua, aire y por lo tanto de nutrientes.

La turba se forma en zonas bajas por lo cual presentan un pH alto, tienen una elevada capacidad de intercambio catiónico, el pH varía entre 7.5 y 8, presentan una gran capacidad de retención de agua, espacio poroso elevado lo que le permitirá una buena circulación de aire. La salinidad debe ser baja, CE debe ser inferior a 0,5 ros/cm, con un pH mayor de 4. El contenido de carbono es de 60%.

Para el suelo de turba se obtuvo una caracterización en la que se obtuvieron los siguientes resultados, para densidad real  $1.5 \text{ g/m}^3$  y para densidad aparente  $1 \text{ g/cm}^3$ , por lo tanto, la El suelo de turba presenta un color gris oscuro 10 YR, el color indica la composición de la turba, así como su procedencia la cual es de turberas altas.

Para medir el potencial de hidrogeno dio como resultado un pH de 7.71 entrando en la clasificación de alcalinos, pero la literatura indica que las turbas presentan pH bajos, por lo que se concluye que el suelo se encuentra con un nivel bajo en acidez. La conductividad fue de un rango  $0.764 \text{ ds/m}$  dando un dato menor, cuando la CE es menor esto indica que la facilidad de fertilización es más fácil, para los requerimientos del cultivo.

La MO en el suelo es la encargada del suministro de los micro y macronutrientes, incrementa la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de intercambio aniónico y estabiliza la acidez del mismo, El valor de carbono es de 2.187% y el de nitrógeno 0.185% siendo un valor muy bajo de nitrógeno, Para la relación C/N el obtenido es de 11.0821 el valor indica que es un suelo con exceso de carbono y exceso de energía, esta relación de C/N es el responsable de garantizar el crecimiento de los vegetales.

Los cationes presentes en el suelo de turba fueron los siguientes un valor bajo K, Na, un valor medio  $\text{Ca}^{+2}$  y obteniendo un valor alto de  $\text{Mg}^{+2}$ . Los cationes indican el valor de la

fertilidad del suelo, el potasio es uno de los nutrientes que tiene que estar presente en mayor cantidad ya que es participante de las funciones metabólicas de las plantas. El valor para el fósforo es de 0.3 mg/L nivel bajo.

**Tabla 8:** Análisis nutrimental del suelo turba

<b>Variable</b>	<b>Valores</b>	
<b>Densidad aparente</b>	1 g/cm <sup>3</sup>	Bajo
<b>Color</b>	Gris Oscura 10 YR	
<b>De materia orgánica (%)</b>	3.770	Bajo
<b>Carbono (%)</b>	2.187	Bajo
<b>Nitrógeno (%)</b>	0.185	Muy bajo
<b>Relación C/N</b>	11.0821	Alto
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.764 ds/m	Ligeramente Salino
<b>pH</b>	7.71	Alcalino
<b>P</b>	0.3 mg/L	Bajo
<b>Porosidad (%)</b>	50	Alto
<b>Ca<sup>+2</sup> + Mg<sup>+2</sup></b>	2100 ppm	Medio
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	510 ppm	Alto
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	1500 ppm	Medio
<b>K</b>	93 ppm	Bajo
<b>Na</b>	83 ppm	Bajo

### 7.1.5 Lixiviado de lombricomposta

La materia orgánica representa del 95 al 99% del total del peso seco de los seres vivos, pero su presencia en los suelos suele ser escasa y son controladas las excepciones en los que supera el 2%. Con la finalidad de aumentar la fertilidad de los suelos y mejorar sus características en beneficio del adecuado desarrollo de los cultivos. Se empleó el uso como abono orgánico el lixiviado de composta, como enmienda nutrimental y de materia orgánica. En la Tabla 9 se observa el resultado del análisis nutrimental del lixiviado de lombricomposta.

**Tabla 9:** Análisis nutrimental del lixiviado de lombricomposta.

<b>Variable</b>	<b>Valores</b>	
<b>De materia orgánica (%)</b>	3.26	Medio
<b>Carbono (%)</b>	1.395	Bajo
<b>Nitrógeno (%)</b>	0.163	Bajo
<b>Conductividad eléctrica</b>	0.198 ds/m	Bajo
<b>pH</b>	7.57	Ligeramente alcalino
<b>P</b>	4.1 mg/L	Bajo
<b>Ca<sup>+2</sup> + Mg<sup>+2</sup></b>	16 ppm	Bajo
<b>Mg<sup>+2</sup></b>	6 ppm	Bajo
<b>Ca<sup>+2</sup></b>	10 ppm	Bajo
<b>K</b>	131 ppm	Bajo
<b>Na</b>	57 ppm	Muy bajo
<b>Relación C/N</b>	8.55	Optimo

El valor obtenido en la conductividad eléctrica fue de 0.546 ds/m. Por lo que hay una baja presencia de sales en lixiviado de composta y se tendrá por consecuencia un menor gasto de energía por parte del cultivo para la absorción de los nutrientes. La CE en bajas concentraciones ayudará al manejo de fertilización de suelo y así garantizar el rendimiento del cultivo.

En la relación C/N se obtuvo un valor de 8.55/1 lo que significa se encuentran 8 partes de carbono por 1 de nitrógeno. Este valor se encuentra en el rango óptimo para el desarrollo de los microorganismos y cubre su requerimiento nutricional.

En cuanto a los nutrientes, este presentó un valor medio en MO con 3.26%, un nivel bajo de K con 131 ppm, Ca<sup>+2</sup> con 10 ppm, Mg<sup>+2</sup> con 6 ppm, (P) con 4.1 mg/L, C 1.30% y nitrógeno N con 0.16%.

**7.2. Evaluación del comportamiento electroquímico de generación de energía eléctrica y sensado de señales de carga eléctrica (voltaje-corriente) sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos de Jitomate (*Solanum lycopersicum*) en diferente tipo de suelo.**

En la Tabla 10 se pueden observar los voltajes obtenidos inicialmente de las 16 celdas elaboradas de los cuatro tipos de suelos. Donde el suelo limoso logro un voltaje mayor con 0.106 volts en la solución de 50 ml y uno menor de 0.003 volts con la solución de 10 ml. El suelo arenoso, en cambio, no presento generación de carga en la solución de 50 ml siendo el valor más bajo y el mayor de 0.123 volts en la solución de 10 ml. En cuanto al suelo de turba, la solución de 15 ml presento un valor alto con 0.093 volts y el valor más bajo con 0.05 volts en la solución de 50 ml. Por último, suelo arcilloso presentó un voltaje alto 0.056 volts con la solución de 15 y un valor bajo de 0.01 volts en la solución de 50 ml.

**Tabla 10:** *Generación de voltaje de la CCM con plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) con relación al tipo de suelo y a la concentración de materia Orgánica.*

	<b>Solución</b>	<b>Limoso</b>	<b>Arenoso</b>	<b>Arcilloso</b>	<b>Turba</b>
<b>Día 1</b>	50	0.106	0	0.055	0.01
	25	0.032	0.004	0.09	0.01
	15	0.004	0.106	0.093	0.045
	10	0.03	0.123	0.061	0.056

En la Tabla 11 se muestra la generación de carga a partir de los 8 días de la siembra de semillas de jitomate (*Solanum lycopersicum*), donde se observaba la germinación en diferentes celdas, siendo el suelo limoso el de mayor generación de voltaje.

**Tabla 11:** Generación de voltaje de la CCM con plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) con relación al tipo de suelo y a la solución de materia Orgánica.

Día 8	Solución	Limoso	Arenoso	Arcilloso	Turba
	50	0.230	0.025	0.119	0.094
	25	0.220	0.173	0.042	0.068
	15	0.124	0.13	0.193	0.075
	10	0.185	0.214	0.147	0.003

En la Tabla 12 se muestran las mediciones a partir de 15 días, observando un aumento considerable en las celdas, mostrando un voltaje en las cuatro muestras las cuales oscilan en 0.216 volts más altos y él más bajo 0.036 volts en generación, obteniendo aumentos considerables en la generación de voltaje variantes en las concentraciones de materia orgánica y al tipo de suelos.

**Tabla 12:** Generación de voltaje de la CCM en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) con relación al tipo de suelo y solución de materia orgánica a partir del día 15.

Día 15	Solución	Limoso	Arenoso	Arcillo	Turba
	50	0.216	0.101	0.185	0.079
	25	0.233	0.104	0.165	0.045
	15	0.101	0.078	0.033	0.036
	10	0.109	0.116	0.148	0.048

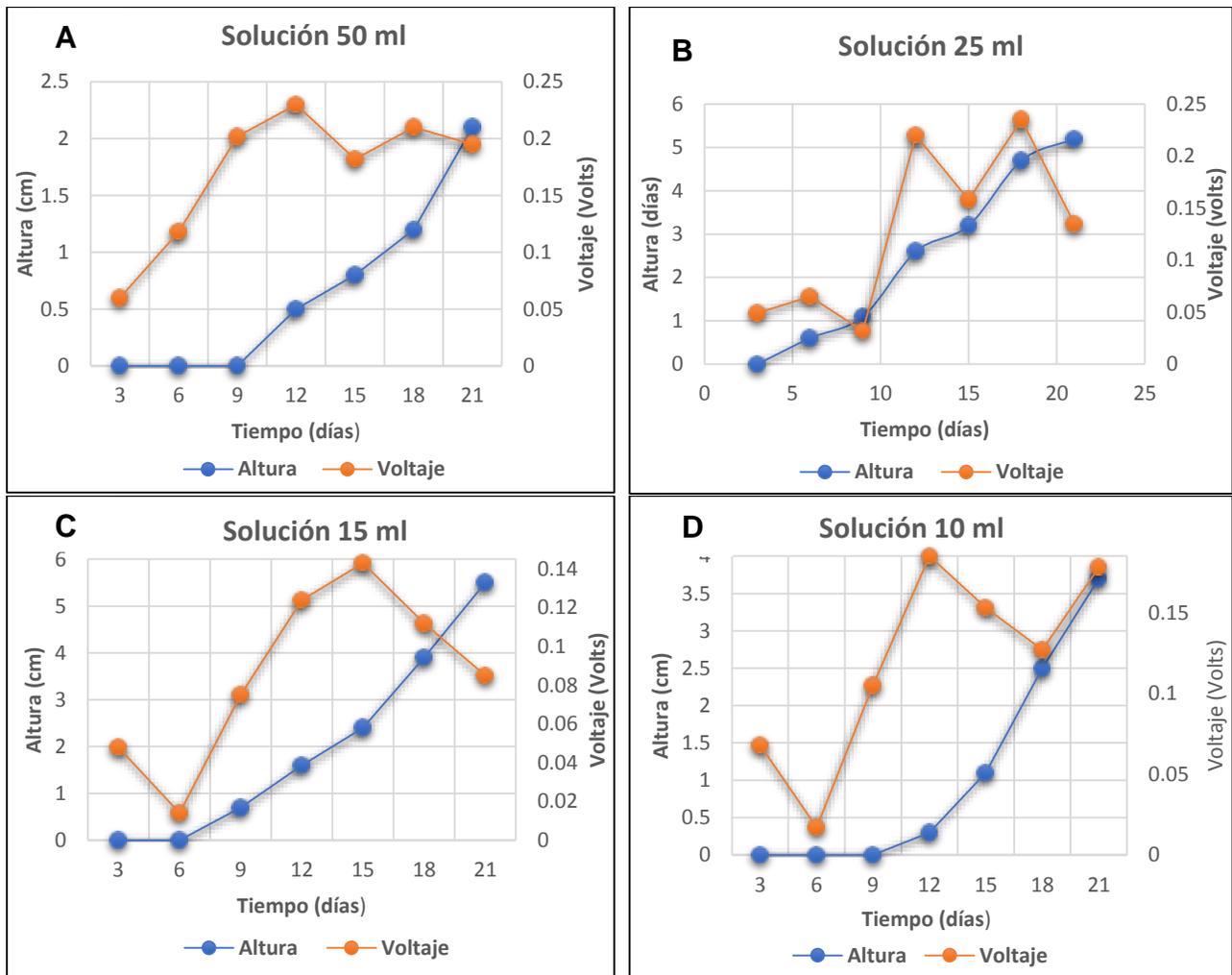
Para conocer la relación que existen entre la generación de carga y el crecimiento de las plantas de jitomate en los diferentes tipos de suelo, se evaluó el voltaje generado diariamente con respecto a los días donde se presentó un crecimiento notorio en los cultivos.

### **7.3 Relación crecimiento - voltaje de las diferentes celdas de combustible microbiano**

Para conocer la relación que existen entre la generación de carga y el crecimiento de las plantas de jitomate en las diferentes celdas elaboradas, se evaluó el voltaje generado diariamente con respecto a los días donde se presentó un crecimiento notorio en los cultivos de semilla de jitomate (*solanum lycopersicum*).

#### **7.3.1 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo limoso**

En la Figura 17 se observa los resultados obtenidos de las soluciones de lixiviado de composta en el suelo limoso, la solución de 10 ml se manifestó de manera tarde con respecto a las otras celdas al presentarse el día 12 con 0.3 cm y un voltaje de 0.185 volts. Como se muestra en el gráfico el voltaje genera durante la experimentación inestabilidad al tener una serie de fluctuaciones muy diferenciadas. Mientras que la solución de 15 ml su crecimiento fue a partir del día 9 con 0.7 cm y un voltaje de 0.075 volts. Los días posteriores el cultivo incrementó su altura a 2.4 cm, obteniendo un voltaje de 0.143 volts. Al final de la experimentación se obtuvo un crecimiento de 5.5 cm y voltaje bajo de 0.085 volts. Mientras que la solución de 25 ml su crecimiento fue al día 6 con 0.6 cm y un voltaje bajo de 0.065 volts, a partir del día 12 el voltaje aumentó a 0.220 volts con 2 cm de crecimiento. De igual manera al día 15 se presentó un crecimiento de 1 cm con un voltaje de 0.158 volts. Hasta el día 21 se observa una disminución del voltaje a 0.135 volts obteniendo un crecimiento final del cultivo de 5.2 cm. Por último, la solución de 50 ml presentó germinación a partir del día 12 con 0.5 cm de crecimiento y un voltaje de 0.230 volts. El voltaje se mantuvo constante durante toda la etapa de experimentación comparado a las otras soluciones, presentando solo una discrepancia entre cada voltaje menor a los 0.050 volts. El crecimiento obtenido al final de la experimentación fue de 2.1 cm con 0.195 volts.



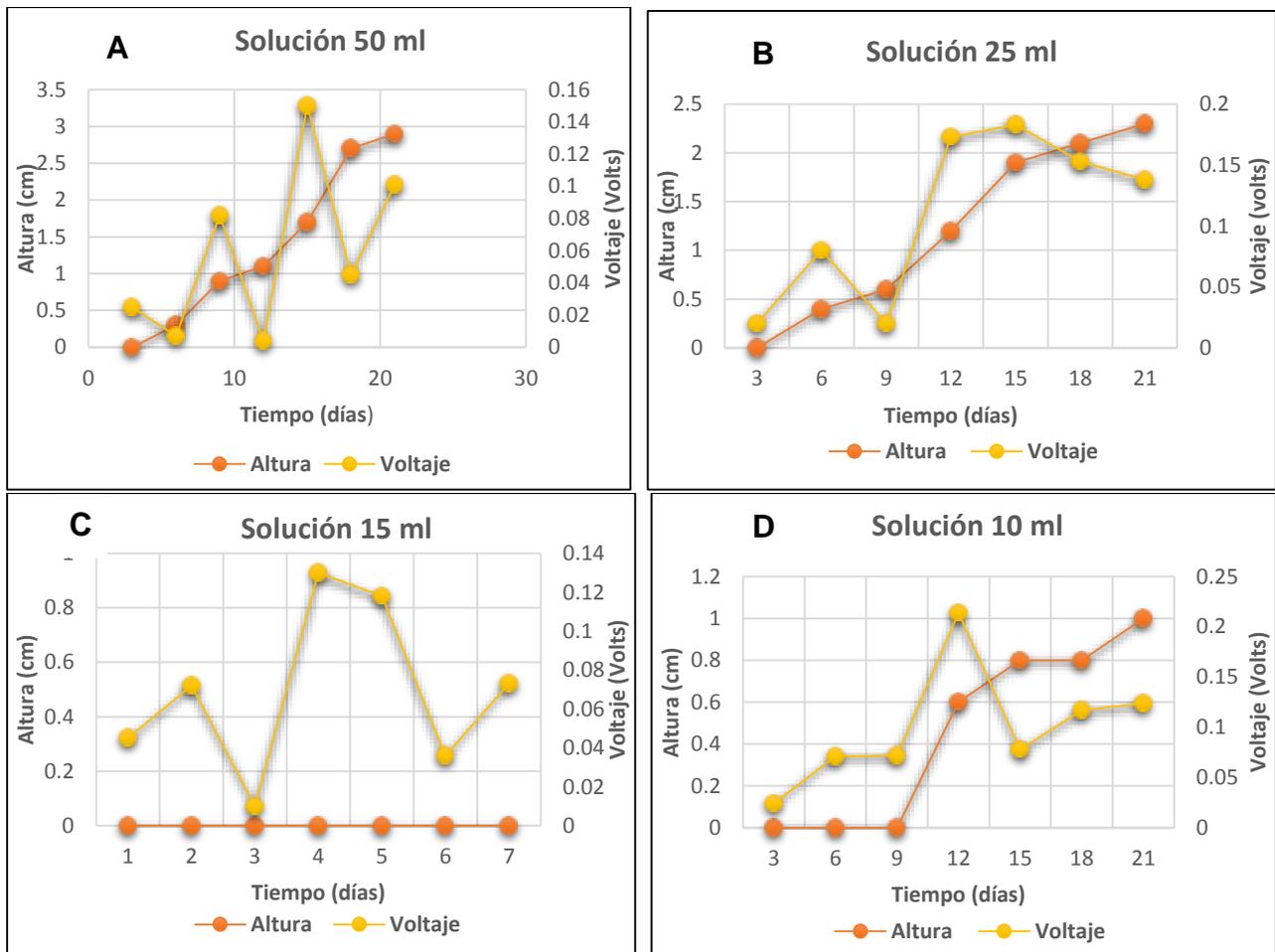
**Figura 17:** Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) en suelo limoso en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml.

Se debe considerar que el arranque inicial de las celdas de combustible microbianas depende de diferentes factores como: la formación y tamaño de la colonia de microorganismos, la disponibilidad de nutrientes para que haya una favorable correlación microorganismos–raíz de la planta para la transferencia de electrones y la generación de carga. El factor determinante de la diversidad microbiana del suelo puede ser el suelo o las plantas, está relacionado con la complejidad de las interacciones microbianas en el mismo, incluyendo las interacciones microorganismos-suelo, y microorganismos-plantas. Esta relación mutualista se pudo observar en la solución de 50 y 10 ml donde se logró un voltaje

estable correlacionado con el crecimiento de la planta, el voltaje variaba muy poco permitiendo el desarrollo de ambos. Por otro lado, en la Figura 17 observa que las soluciones de 25 y 15 ml lograron un mayor crecimiento de cultivo con respecto a las otras soluciones de 10 ml (crecimiento de 3.7 cm) y la solución de 50 ml (crecimiento 2.1 cm), aunque estas primeras demostraron una inestabilidad del voltaje durante el desarrollo del cultivo de 0.100 volts entre ellas. Lo que se atribuye a una relación antagónica de nutrientes que favoreció al desarrollo de las plántulas antes que a los microorganismos del suelo.

### **7.3.2 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo arenoso.**

En la Figura 18 se observa que la solución de 10 ml presentó crecimiento el día 12 con 0.6 cm y un voltaje alto de 0.214 volts. Para el día 15 se tuvo una caída del voltaje a 0.078 volts y un crecimiento de solo 0.2 cm. Para el final de la experimentación el crecimiento del cultivo fue de 1 cm con un voltaje de 0.124 volts. La solución de 15 ml no germinó, en cuanto a generación de carga se presentaron una serie de fluctuaciones entre los voltajes de 0.060 volts entre cada valor, obteniendo una generación de carga al día 21 de 0.073 volts. Por otro lado, la solución de 25 ml presentó crecimiento el día 6 con 0.4 cm y un voltaje de 0.08 volts. A partir del día 12 incrementó el voltaje a 0.173 volts y un crecimiento de 1 cm. Los voltajes durante el tiempo de experimentación como se observa en la Figura 18 se mantuvieron en un rango menor de 0.35 volts entre cada voltaje. Al día 21 se tuvo un crecimiento de 2.3 cm con 0.138 volts. Mientras que en la solución de 50 ml del suelo arenoso presentó al día 6 crecimiento con 0.3 cm y un voltaje de 0.007 volts. Al día 15 se tuvo un voltaje 0.150 volts con un crecimiento de 1.7 cm. Al día 18 se logró un crecimiento de 2.7 cm, pero el voltaje disminuyó a 0.045 volts. Al final de la experimentación se obtuvo un crecimiento total del cultivo de 2.9 cm con un voltaje de 0.101 volts.



**Figura 18:** Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) en suelo arenoso en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml

La solución que mayor crecimiento alcanzó fue la de 50 ml con 2.9 cm, generando fluctuaciones entre los voltajes de 0.110 volts. A esta le siguió la solución de 25 ml con un crecimiento de 2.3 cm presentando una diferencia de voltaje de 0.050 volts. Estas soluciones al igual que la solución de 25 y 15 ml de suelo limoso, mostraron una afectación negativa en generación de voltaje, pero demostraron una respuesta positiva en el crecimiento de plántulas con una enmienda mayor de materia orgánica. Por lo que puede decirse que los factores que afectan la generación de energía de las CCM que utilizan la materia orgánica del suelo como combustible y su interrelación con el crecimiento de la planta, está relacionado totalmente con las interacciones microbianas microorganismos-

suelo, y microorganismos-plantas. La relación microorganismo-planta depende ampliamente de los microorganismos de la rizósfera que contribuyen al crecimiento vegetal aumentando la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, las interacciones entre los cultivos y la microflora, sobre la dinámica de los nutrientes, se ve afectada por algunos efectos antagónicos, donde solo una parte se ve beneficiada, siendo este el escenario presentado para estas dos soluciones. Ocurrió lo opuesto en la solución de 10 ml, alcanzando un crecimiento de 1 cm, generando una relación simbiótica entre la planta y los microorganismos, que permitió su desarrollo y una constante generación de carga.

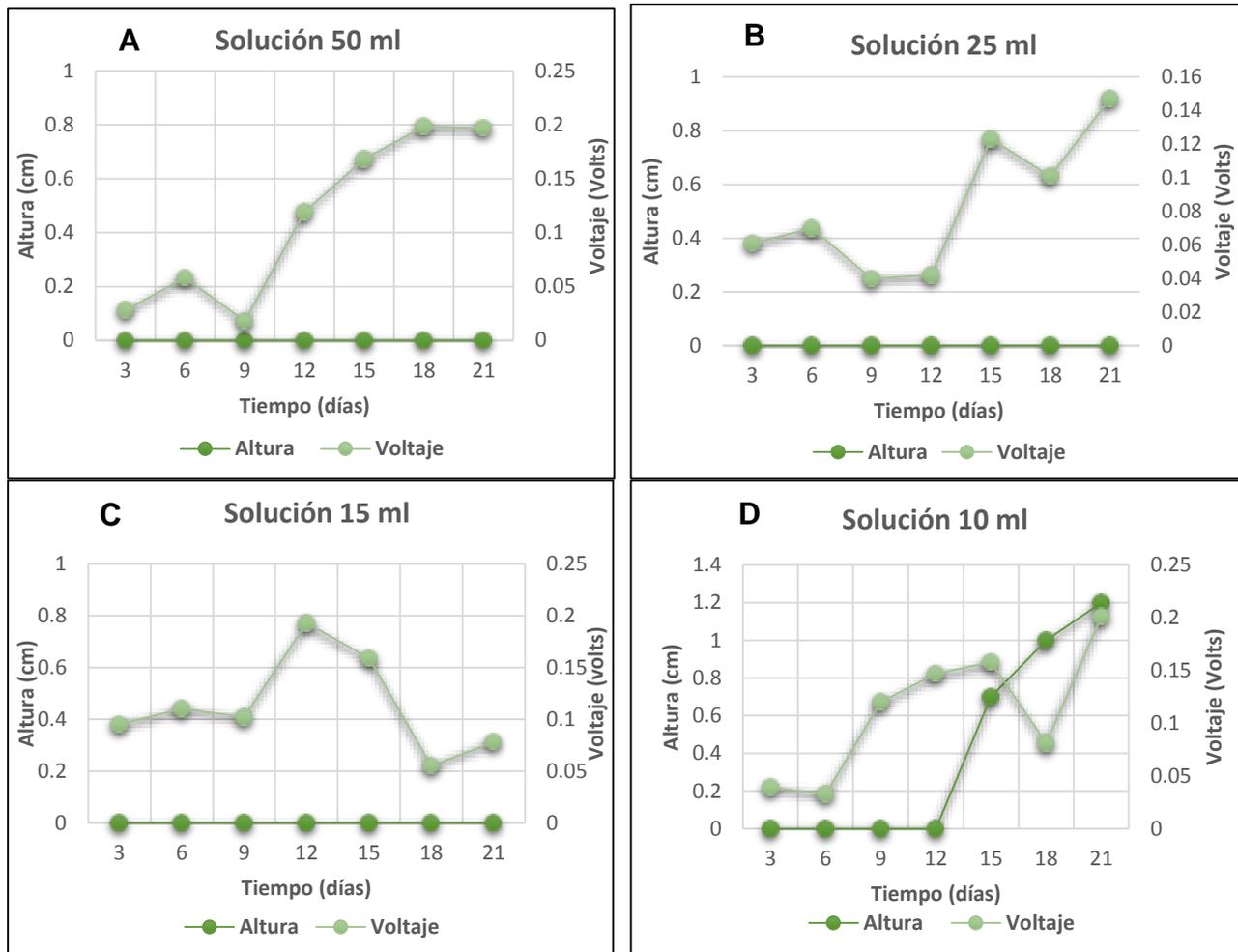
Mientras que la solución de 15 ml no presento crecimiento, si se obtuvo generación de voltaje. Esto se debe a una relación microorganismo-suelo, donde los microorganismos pueden presentar su ciclo de vida de forma totalmente independiente de la planta, mismos que no se ven perjudicados por la presencia de éstas (Symborg, 2022). Por otro lado, de acuerdo al análisis nutrimental realizado al suelo arenoso este presento un nivel muy bajo de porosidad, esto responde a la ausencia de crecimiento de las plantas. Si bien la aplicación de enmiendas orgánicas mejora la estructura, textura, permeabilidad, drenaje y aireación, esta enmienda orgánica no fue suficiente para mejorar la estructura del suelo generando solo voltaje y no la germinación de la semilla.

### **7.3.3 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo Arcilloso**

Como se observa en la Figura 19 la solución de 10 ml presentó crecimiento al día 15 con 0.7 cm y un voltaje de 0.158 volts. Para el día 18 se logró un crecimiento de 0.3 cm mientras que el voltaje decayó a 0.081 volts. El día 21 se tuvo un crecimiento de 0.2 cm teniendo en total del cultivo de 1.2 cm con un voltaje de 0.201 volts. La solución de 15 ml no estímulo a la germinación de semillas de esta especie, como se observa en la gráfica 25, el voltaje se mantuvo estable al día 15 con 0.150 volts posteriormente al día 21 decayó a un voltaje de 0.078 volts.

La solución de 25 y 15 ml no promovió el crecimiento en el cultivo por lo que se obtuvieron valores inestables en el voltaje. De igual manera, la solución de 50 ml no presentó germinación, pero a partir del día 15 el voltaje se mantuvo constante durante toda la etapa

de experimentación comparado a las otras gráficas presentando solo una discrepancia entre cada voltaje menor a los 0.030 volts. Obteniendo un voltaje final en la experimentación de 0.197 volts.



**Figura 19 :** Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) en suelo arcilloso en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml

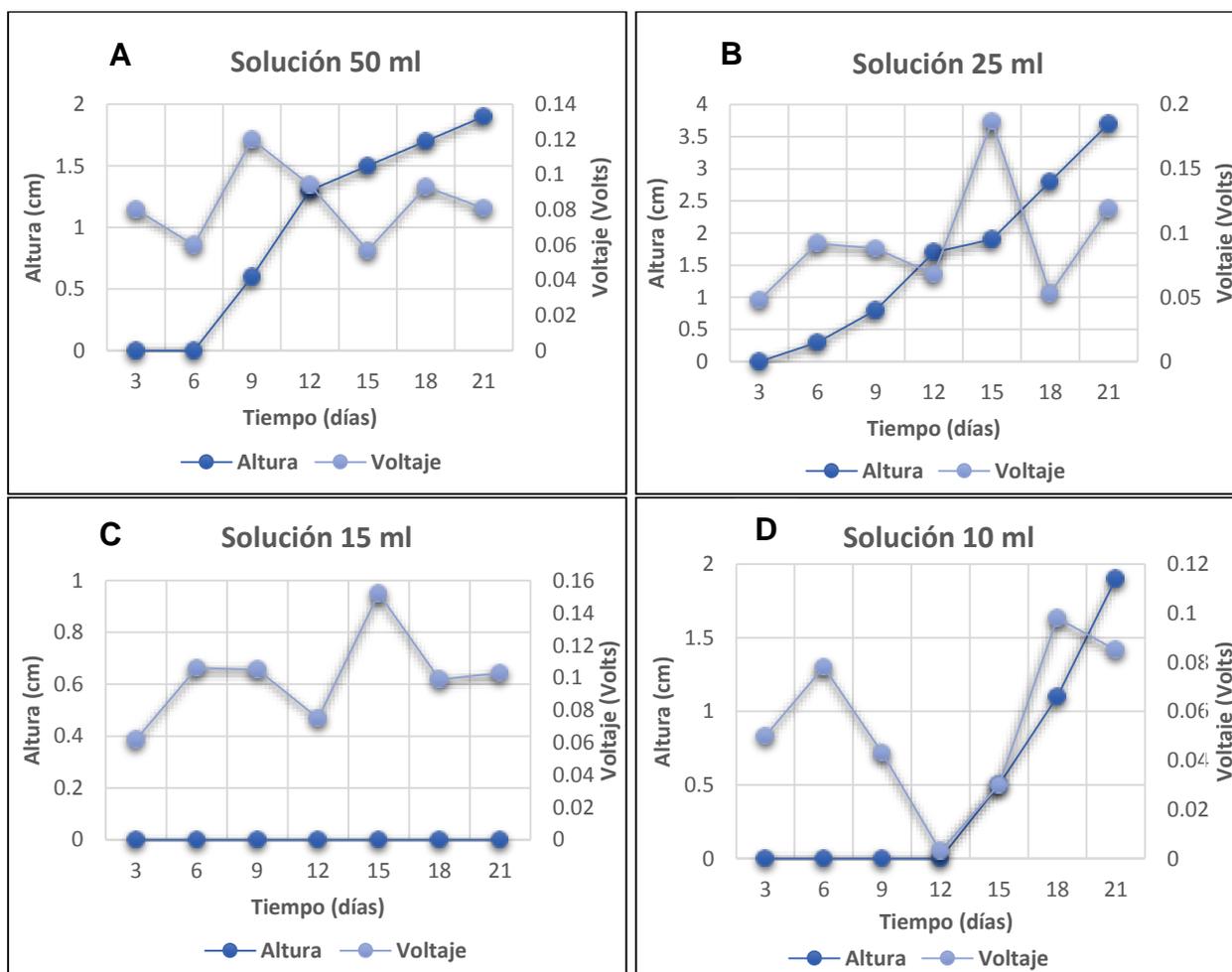
Entre los factores considerados esenciales para el desarrollo de las plantas, después del agua, el N es el principal elemento limitante de la productividad vegetal. La relación C/N indica la tasa de nitrógeno disponible para las plantas. De acuerdo con los datos obtenidos en el análisis nutrimental del suelo arcilloso, se encontró un bajo valor en relación C/N de 8:1 en comparación a los tres suelos analizados. La literatura menciona que valores entre

10 y 14 corresponden a una mineralización y ruptura de tejidos rápida, ya que la actividad microbiana se estimula, hay nutrientes suficientes para los microorganismos y para los vegetales (Cynthia Gamarra, 2018). Por lo que valores menores generan una velocidad lenta en los procesos de mineralización por la actividad microbiana del suelo. Esto puede estar asociado a la ausencia de crecimiento de las soluciones de 15, 25 y 50 ml que a pesar de ello si presento actividad microbiana donde se obtuvo generación de carga. Aunque un estudio presentado por Hernández, (1996) quien trabajó con sustancias húmicas extraídas de residuos municipales (lodos de aguas residuales y un compost) y otras provenientes de materiales más humidificados (leonardita, turba y un ácido húmico comercial), para conocer el efecto sobre la planta y la absorción de nutrientes en un cultivo hidropónico de cebada, encontró que el efecto de ambos grupos de sustancias húmicas fue similar, tanto en el crecimiento como en la absorción de nutrientes. Las dosis de 10 mg de C/L favorecieron el crecimiento de las plantas, mientras que las dosis más altas a veces lo inhibieron. En el caso de los micronutrientes, la absorción también fue mayor con las dosis más bajas, mientras que las dosis mayores a 10 mg de C/L lo inhibieron. Los resultados demuestran que algunas de las enmiendas de MO en grandes cantidades pueden generar inhibición, y en pequeñas cantidades se puede tener un adecuado desarrollo. Una referente a este último es la solución de 10 ml que fue la única solución en presentar crecimiento a pesar de ser una menor enmienda de MO. Algunos Autores mencionan que no es práctico tratar de mantener altos niveles de materia orgánica. Para (Gros, 1992) el nivel deseable de materia orgánica en los suelos arcillosos debe ser el 2%.

#### **7.3.4 Relación Crecimiento -Voltaje en suelo turba**

En la Figura 20 la solución de 10 ml presento crecimiento al día 15 con 0.5 cm con un voltaje de 0.030 volts. Al día 18 se presentó crecimiento de 0.7 cm mientras que el voltaje aumento a 0.085 volts. Al final de la experimentación se obtuvo un crecimiento de 1.1 cm con un voltaje de 0.080 volts. La solución de 15 ml no presentó crecimiento, pero sí presento generación de carga, aunque este voltaje generado tuvo una serie de fluctuaciones entre cada valor de 0.077 volts, al final de la experimentación obtuvo con valor de 0.103 volts.

La solución de 25 ml al día 6 obtuvo un crecimiento 0.3 cm con 0.092 volts. Para el día 15 se tuvo un crecimiento a 1.9 cm y disminuyó el voltaje de 0.053 volts. Al día 21 se tuvo un crecimiento final a 3.7 cm con un voltaje de 0.119 volts. A su vez, la solución de 50 ml presento crecimiento al día 9 con 0.6 cm con un voltaje de 0.120 volts. Como se observa en la Figura 20 el voltaje se mantuvo constante durante toda la etapa de experimentación comparado a las otras soluciones presentando solo una discrepancia entre cada voltaje menor a los 0.037 volts. Para el día 21 se tuvo un crecimiento de 2 cm con 0.081 volts.



**Figura 20:** Relación del crecimiento – voltaje de las plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) en suelo de turba en (A) solución de 50 ml (B) solución de 25 ml (C) solución de 15 ml (D) solución de 10 ml

Haciendo un análisis general de las muestras, la solución de 50 ml obtuvo menos variación entre los voltajes. El crecimiento por otro lado se presentó al día 9 y logro una altura del

cultivo de 1.9 cm. Mientras que la solución de 25 ml presentó un crecimiento total de 3.7 cm y correspondiente al voltaje, este alcanzó un valor alto a partir del día 15, pero decayó los días restantes a la finalizar la experimentación. Esto se atribuye a que los compuestos orgánicos adicionados fueron aprovechados en su mayoría por la misma plántula para su desarrollo. Aportando pocos exudados al suelo para ser aprovechados por los microorganismos, lo que ocasionó que disminuyera la generación de carga en las etapas de crecimiento del día 15 al día 21 de la experimentación.

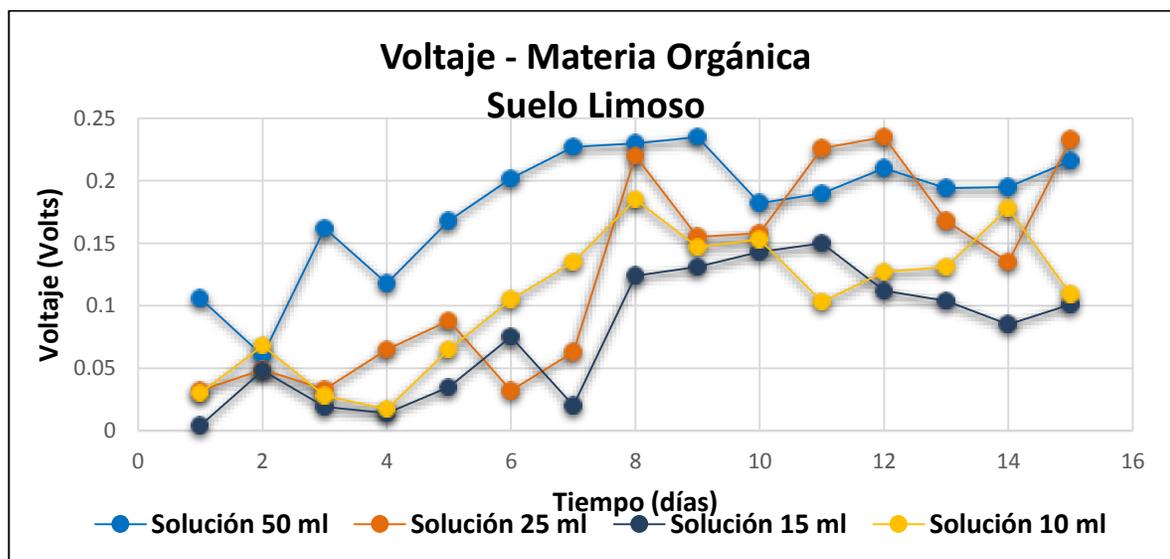
Por el contrario, la solución de 15 ml no logró la germinación, pero si obtuvo generación de carga, porque se especula que hubo una formación de colonias de microorganismos que pudo aprovechar los compuestos orgánicos añadidos para generar carga. Mientras que la solución de 10 ml tuvo un crecimiento retardado al presentarse al día 18, se obtuvo al final de la experimentación un crecimiento de 0.6 cm siendo el valor de crecimiento bajo referente a las otras celdas. El voltaje generado durante la experimentación de la solución de 10 ml presentó una inestabilidad entre los valores del voltaje. Esto es atribuido a la baja cantidad de nutrientes orgánicos proporcionados por dicha enmienda, lo que provocó un retardo en el crecimiento de las raíces de la plántula y la formación de una relación simbiótica entre los exudados de la raíz y los microorganismos. Como se muestra en los resultados del estudio nutrimental del suelo turba en la Tabla 7 este presentaba una baja cantidad de materia orgánica con un valor de 3% siendo este la causal de que las soluciones de baja enmienda de MO generaran un crecimiento bajo o nulo dentro de las celdas, así como un voltaje bajo. En caso contrario a las soluciones de 25 y 50 ml que al ser una enmienda mayor de MO no presentaron inconvenientes para el crecimiento del cultivo y mayor generación de carga.

## 7.4 Evaluación del comportamiento electroquímico en censado de señales de carga con respecto a la materia orgánica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la variación de la generación de carga con respecto a las diferentes enmiendas de MO en los cuatro tipos de suelos.

### 7.4.1 Suelo Limoso

Como se observa la Figura 21, la solución con mayor generación de voltaje fue obtenida por la solución de 50 ml al mantenerse en rango de 0.168 – 0.235 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.179 \pm 0.050$ ). Por otro lado, a solución de 25 ml inicialmente se mantuvo en un rango de bajo de los 0.100 volts posterior al octavo día, los rangos de voltaje se mantuvieron entre los 0.135 -0.235 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.126 \pm 0.0789$ ). Mientras que la solución de 15 ml fue la solución con menor generación de voltaje con respecto a las otras obteniendo rangos 0.075 – 0.150 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.077 \pm 0.050$ ). Por último, la solución de 10 ml al comienzo de la experimentación obtuvo un valor de 0.030 volts manteniéndose en un rango menor a los 0.050 volts para al quinto día incremento manteniéndose en un rango 0.105 - 0.178 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.105 \pm 0.0535$ ).

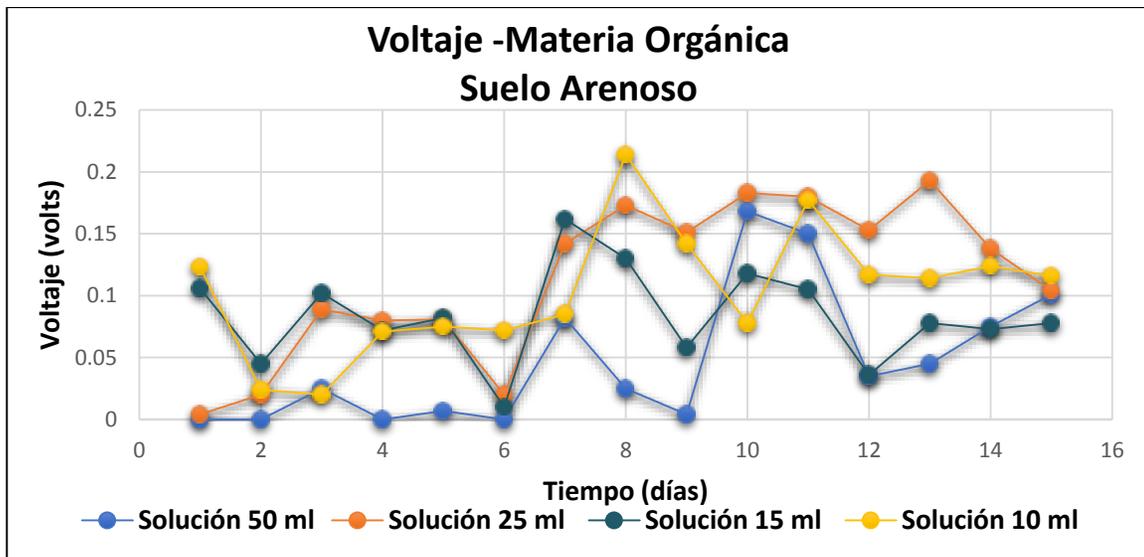


**Figura 21:** Relación voltaje-materia orgánica en las cuatro celdas de combustible microbiana suelo limoso.

Las soluciones de 50 y 25 ml presentaron una correlación positiva a la generación de carga. Mientras que las soluciones de 15 y 10 ml al ser enmiendas menores de materia orgánica su generación de igual manera fue baja. De acuerdo a la Tabla 4 del análisis nutrimental del suelo limoso, este destaca por su alto valor de porosidad con 50% lo que le permite una rápida absorción de los nutrientes y la proliferación de microorganismos, dando por consiguiente un mayor incremento de la generación de carga a mayores soluciones de MO. En el suelo limoso se observó que la generación de carga responde de acuerdo a la cantidad MO adicionada en cada una de las celdas de combustible.

#### **7.4.2 Suelo Arenoso**

En la Figura 23 se muestra que la solución de 50 ml presentó menor generación de carga al mantenerse en valores menores a los 0.100 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.126 \pm 0.0789$ ) al día 11 este incrementa a 0.168 volts, pero posteriormente vuelve a decaer. Por otra parte, la solución de 25 ml obtuvo una generación de carga de 0.081 – 0.193 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.114 \pm 0.063$ ). Por otro lado, la solución de 15 ml al comienzo de la experimentación se obtuvo un voltaje alto de 0.106 volts, al final de la experimentación decayó a 0.078 volts presentando una Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.083 \pm 0.038$ . Por último, la solución de 10 ml de igual manera logro una generación inicial de 0.123 volts más tarde decayó manteniéndose en rangos menores de 0.100 volts, al noveno día incremento el voltaje manteniéndose en un rango de 0.116 – 0.142 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.103 \pm 0.051$ ).



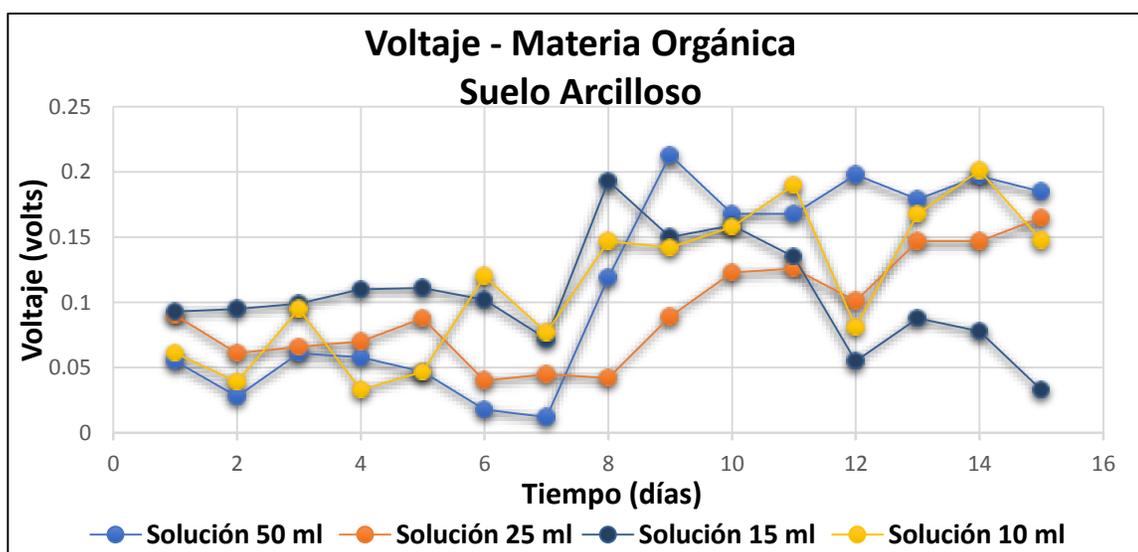
**Figura 22:** Relación voltaje-materia orgánica en suelo arenoso.

En caso contrario al suelo limoso, la enmienda de MO del suelo arenoso de 50 ml género bajos voltajes con respecto a las otras soluciones. Mientras que la soluciones de 10, 15 y 25 ml al ser enmiendas menores de MO presentaron una mayor generación de carga. Esto se atribuye a la baja porosidad del suelo obtenida en el análisis nutrimental del suelo arenoso (véase en la Tabla 5), dicho valor provoca una saturación rápida a mayores irrigaciones en el suelo lo que ocasiona una mineralización lenta de los nutrientes por saturación. Por lo que, a menores irrigaciones de MO se genera una rápida descomposición de los nutrientes.

### 7.4.3 Suelo Arcilloso

En la Figura 23 se nota una tendencia del voltaje y de la materia orgánica en las celdas en el suelo arcilloso, donde la solución de 10 ml inicio con un voltaje de 0.061 volts logrando incrementar al día 7 a un voltaje de 0.120 volts, este al final de la experimentación los voltajes se mantuvieron en un rango de 0.081 -0.201 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.113 \pm 0.0557$ ). En el caso de la solución 15 ml comenzó con un valor alto de 0.093 volts, al octavo día de experimentación obtuvo un voltaje alto con 0.193 volts, pero este decayó al final de la experimentación a 0.033 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.104 \pm 0.041$ ). Por

otro lado, la solución 25 ml comenzó con un voltaje de 0.090 volts este fue decayendo hasta el valor más bajo obtenido en la celda de 0.04 volts al séptimo día, al octavo día el voltaje comenzó a incrementar hasta el último día de operación obteniendo un voltaje de 0.165 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.093 \pm 0.0406$ ). Mientras que la solución de 50 ml comenzó con un voltaje bajo con 0.055 volts, pero en paso de los días este fue incrementado hasta al final de la experimentación con 0.185 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.113 \pm 0.0754$ ).



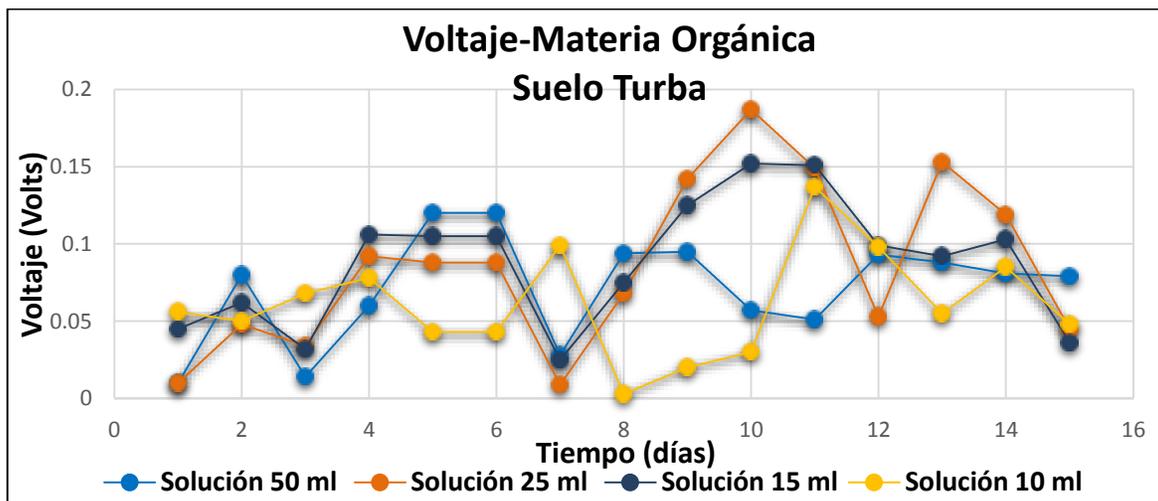
**Figura 23:** Relación voltaje-materia orgánica en suelo arcilloso

Como se observa en la Figura 24 la solución de 50 ml inicialmente presentó el voltaje más bajo con respecto a las otras celdas, pero a su vez, fue el que mayor generación de carga. A sí mismo las soluciones de 25 y 15 ml comenzaron con un voltaje bajo, pero durante los días posteriores fue incrementando. En contrario a la solución de 10 ml que inicio con un voltaje alto, pero este decayó con el paso de los días. Este fenómeno se atribuye a las propiedades físicas mismas del suelo arcilloso, que al contener arcillas estas tienen a saturarse rápidamente lo que provocó que las soluciones de 50, 25 y 15 ml generaran valores iniciales de carga bajos, permitiendo una mayor generación de carga en la solución de 10 ml. Esa misma propiedad física del suelo trae como beneficio mayor retención de agua y nutrientes lo que permitió que a mayores soluciones de MO se llevara a cabo una mayor

proliferación de microorganismo y por consiguiente un mayor crecimiento en la generación de carga. Mientras que en la solución de 10 ml al no ser una enmienda suficiente de nutrientes para los microorganismos donadores de electrones, su generación de voltaje fue decreciendo.

#### 7.4.4 Suelo Turba

En la Figura 24 se muestra la generación de carga en función de la MO en el suelo de turba. La solución de 10 ml comenzó con una generación de carga con 0.05 volts, al día 11 incremento a 0.137 volts, más tarde vuelve decaer manteniéndose los voltajes debajo de los 0.100 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.060 \pm 0.0343$ ). Por otro lado, la solución de 15 ml tuvo una generación inicial de 0.04 volts, durante el periodo de operación se mantuvo en rangos de 0.075 volts – 0.152 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.087 \pm 0.0407$ ). Por otra parte, la solución de 25 ml presentó una generación de carga inicial de 0.010 volts este incremento hasta el noveno día con 0.187 volts posteriormente este decayó 0.045 volts al final de la experimentación (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.0856 \pm 0.0546$ ). Mientras que la solución de 50 ml comenzó con una generación de carga de 0.010 volts incrementando al cuarto día con 0.120 volts, a partir del séptimo día los voltajes se mantuvieron por debajo de los 0.100 volts (Media  $\pm$  desviación estándar;  $0.071 \pm 0.0342$ ).



**Figura 24:** Relación voltaje-materia orgánica en suelo turba.

Como se observa en la Figura 24, la solución de 25 ml fue la mayor generación de carga presentó, pero al final de la experimentación decayó. A esta última le siguió la solución 15 y 10 ml en mayor generación de carga. Mientras que la solución de 50 ml se mantuvo con voltajes bajos a los 0.100 volts.

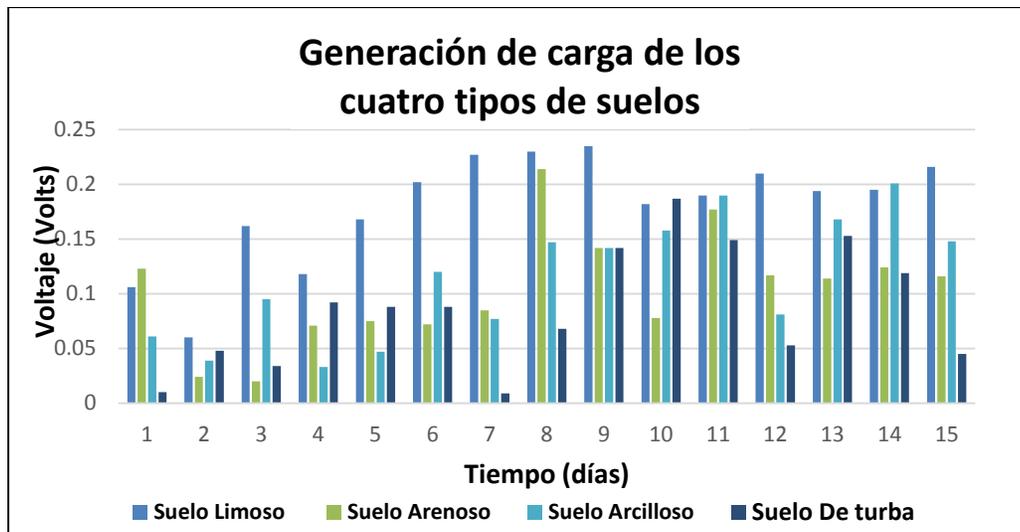
### 7.5 Caracterización electroquímica de las CCM (voltaje-corriente) de los diferentes tipos de suelos.

En la Tabla 13 se observan las tendencias de la generación de voltaje de las celdas seleccionadas.

**Tabla 13:** Relación de voltaje en los cuatro tipos de suelos con plantas de jitomate (*solanum lycopersicum*) como biosensores bioelectroquímicos.

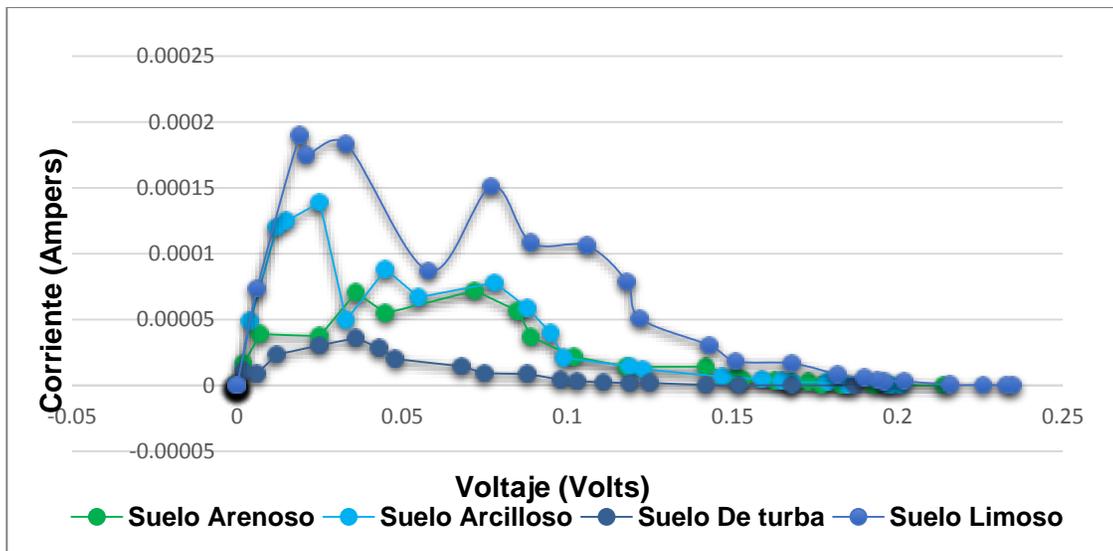
Suelos	Voltaje alto	Voltaje bajo	Voltaje Promedio
Suelo Limoso	0.235	0.006	0.176
Suelo Arenoso	0.214	0.002	0.103
Suelo Arcilloso	0.201	0.004	0.061
Suelo De turba	0.187	0.002	0.068

En la Figura 25 se puede observar detalladamente las tendencias de la generación de carga durante el tiempo de duración de los ensayos.



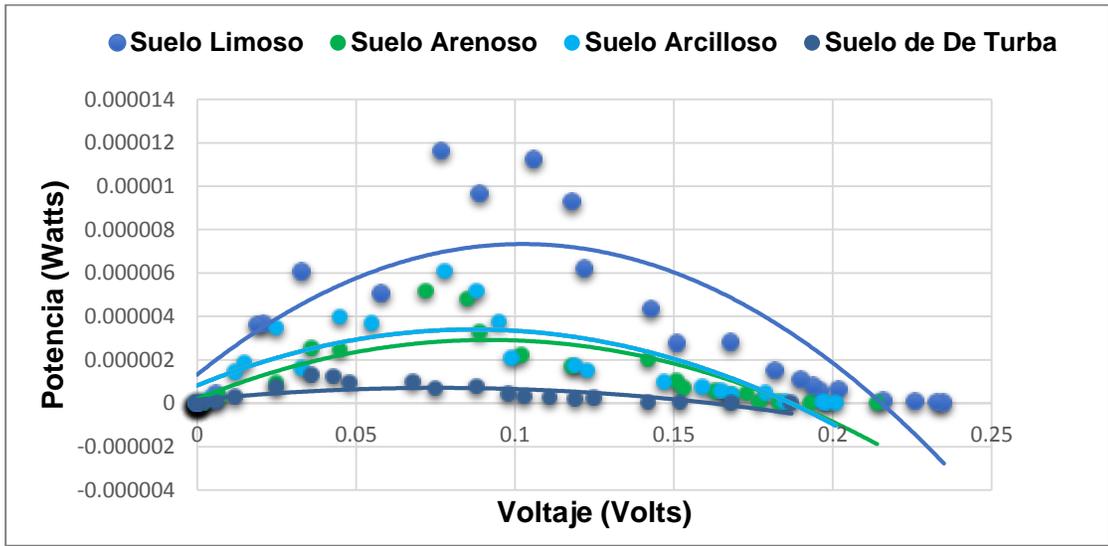
**Figura 25:** Generación de voltaje por tipo de suelo en la primera fase de experimentación con plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*).

Una forma de evaluar el desempeño del sistema de generación de energía es por medio de las curvas de polarización. La caracterización de la corriente eléctrica es función al voltaje, esto se consiguió variando las resistencias del circuito externo ( $2.6 \text{ M}\Omega$  -  $47\Omega$ ) lo que proporciona como resultado diferentes valores de voltaje. En la Figura 26 se muestra la comparación de la máxima generación de corriente entre las celdas de combustible microbiano. Se puede visualizar que la celda con suelo limoso presenta una tendencia alta, seguida de la celda con suelo arcilloso mientras que las celdas con suelo arenoso y de turba presentan una tendencia baja de corriente con relación al voltaje.



**Figura 26:** Tendencias de las curvas de corriente en los cuatro tipos de suelos con plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*).

En la Figura 27 se muestra las curvas de polarización de la potencia de las CCM con plantas de jitomate, donde se muestran las tendencias de los voltajes. Las curvas de polarización se realizaron al final de la experimentación cuando el sistema presentaba valores estables.



**Figura 27:** Tendencias de las curvas de potencia en los cuatro tipos de suelos con plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum*).

La máxima generación de potencia entre las primeras celdas de jitomate (*Solanum lycopersicum*) ocurrió en el suelo limoso con un valor de 9.659  $\mu\text{W}$  con resistencia interna de 820  $\Omega$ , seguido por el suelo arenoso que presento una potencia 5.162  $\mu\text{W}$  con una resistencia interna 1500  $\Omega$ , el suelo arcilloso 3.689  $\mu\text{W}$  con una resistencia interna 2400  $\Omega$ , por último, en el suelo de turba una generación de potencia 1.232  $\mu\text{W}$  con una resistencia interna de 1500  $\Omega$ .

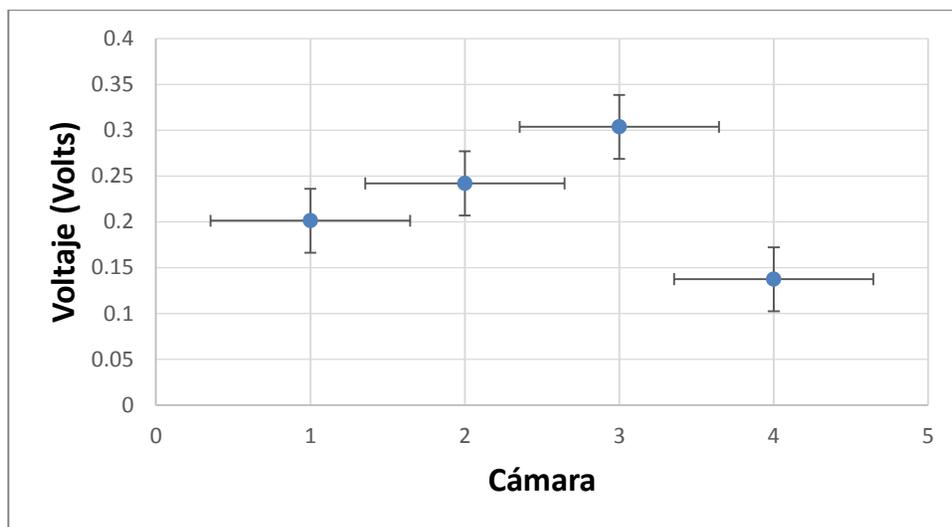
### 7.6 Correlación existente entre la generación de carga y desarrollo de las plantas de Zarzamora (*Rubus ssp*).

En la Tabla 14 se observa el comportamiento de la generación de carga (voltaje) de las celdas de electroquímicas con planta de Zarzamora donde se realizaron 4 tipos de cámaras para conocer la correlación que existe entre el crecimiento de la planta y la generación de carga (véase en la Tabla 8). Al inicio de la experimentación se observan que los voltajes de la cámara 1 obtuvo mayor generación de carga obteniendo un voltaje de 0.578 volts y un valor menor de 0.001 volts (Media  $\pm$  desviación estándar; 0.201  $\pm$  0.184). Seguido por la cámara 2 donde el voltaje alto obtenido fue de 0.513 volts y un valor menor de 0.02 volts. (Media  $\pm$  desviación estándar; 0.242  $\pm$  0.202). La cámara 3 obtuvo una generación de carga alta obteniendo un voltaje de 0.503 volts y un valor menor de 0.004 volts (Media  $\pm$  desviación estándar; 0.303  $\pm$  0.191). Finalmente la cámara 4 el voltaje alto obtenido fue de 0.499 volts y un valor menor de 0.001 volts (Media  $\pm$  desviación estándar; 0.137  $\pm$  0.209).

**Tabla 14:** Relación de voltajes en las primeras cuatro cámaras de planta de zarzamora (*Rubus ssp*) como biosensores bioelectroquímicos.

Cámara	Voltaje Alto	Voltaje Bajo	Voltaje Estable
1	0.578	0.071	0.242
2	0.513	0.021	0.185
3	0.503	0.004	0.303
4	0.499	0.001	0.137

En la Figura 28 se muestra las medias de voltajes entre las 4 cámaras donde se busca observar la similitud entre ellas. La gráfica muestra que la cámara de 1 y 2 están dentro del mismo rango de voltaje promedio al contrario de las cámaras 3 y 4.



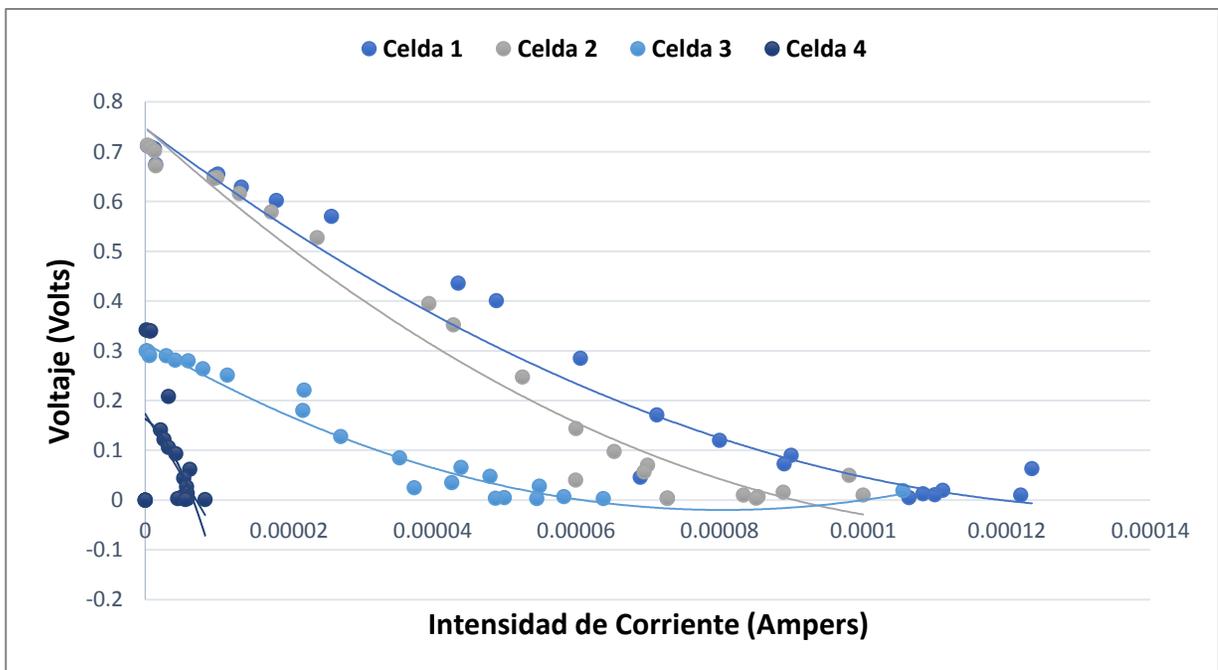
**Figura 28:** Media de voltajes de las cámaras 1-4 de planta de Zarzamora (*Rubus ssp*) como biosensores bioelectroquímicos

A diferencia de las CCM en los suelos con semillas de jitomate, las CCM con plantas de zarzamora no presentaron una fase inicial de retardo en la generación de energía, mostrando mediciones de voltaje considerables desde el inicio de los experimentos. Lo anterior se atribuyó a que, al colocarse los electrodos en la rizosfera de plantas ya formadas, la interrelación microorganismos – raíz de plantas ya existía, por lo que la transferencia de electrones producto del metabolismo era existente y que al contacto con el electrodo anódico se perciben voltajes desde el inicio de los experimentos.

Así mismo en la primera semana de arranque de los ensayos, las plantas de zarzamora de las muestras 1 y 3 mostraron adaptación al observarse la aparición de hojas nuevas que indicaban un desarrollo favorable, mientras que en las cámaras 2 no se observó un crecimiento en la plántula, pero se mantenía con su follaje inicial, al contrario de la muestra 4 que presentó pérdida de hojas. Durante la semana dos y tres, se mostró poco desarrollo para las plantas en las muestras 1 y 4, por otro lado, para las plantas de la muestra 2 y 3

pudo observarse crecimiento de tallo (hasta 3.3 cm para la cámara 2 y 3 cm para la cámara 3).

En la Figura 29 se muestra el comportamiento en la generación de voltaje para las cuatro muestras de suelo que conforman las CCM con plantas de zarzamora, al paso de los días las cámaras 1 y 2, presentaron incremento en el voltaje obteniendo una generación de carga en la muestra 1 con 0.712 volts seguida de la cámara 2 con 0.702 volts durante el tiempo restante ensayo. Contrariamente las muestra 3 y 4, desarrollaron generación de voltaje por debajo de los 0.350 volts.

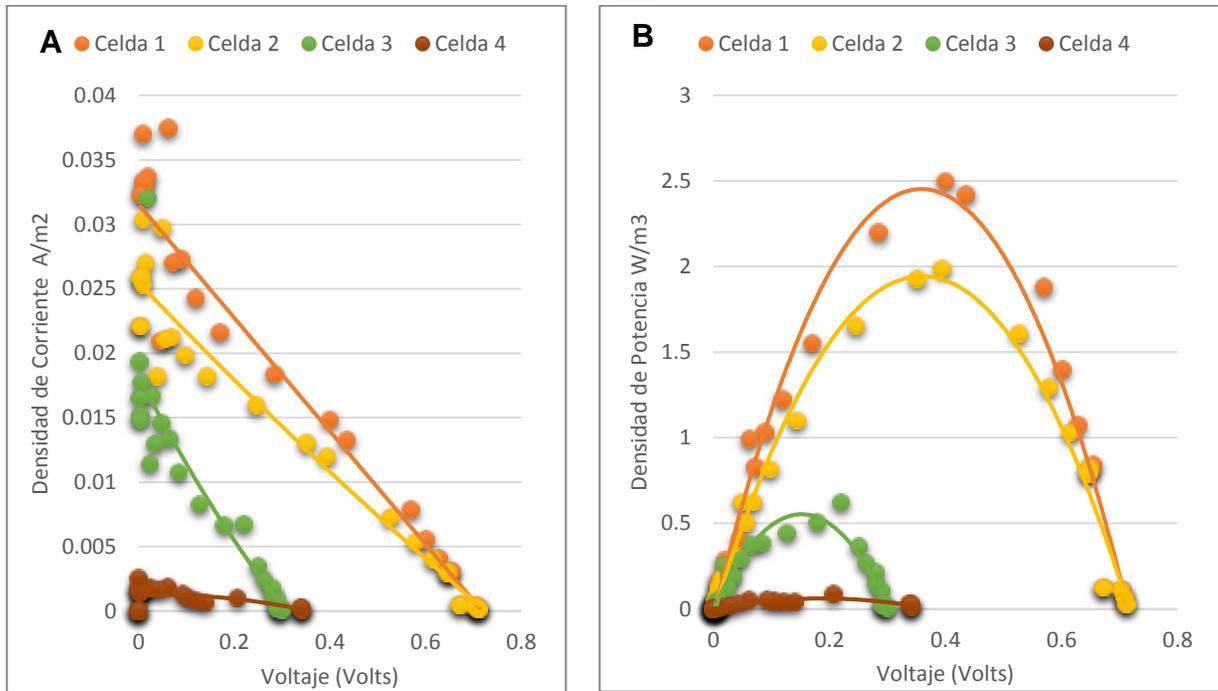


**Figura 29:** Seguimiento de generación en las plantas de zarzamora (*Rubus ssp*) mediante curva de polarización de Voltaje en función de la intensidad de corriente.

### 7.6.1 Caracterización eléctrica de las CCM para suelos con plantas de zarzamora.

En la Figura 31 se observan tendencias en la generación de densidad de potencia y densidad de corriente en las diferentes cámaras de planta de la zarzamora (*Rubus ssp*). La caracterización de la corriente eléctrica en función al voltaje, esto se consiguió variando las

resistencias del circuito externo ( $2.6 \text{ M}\Omega - 47\Omega$ ) lo que dio como resultado diferentes valores de voltaje.



**Figura 31:** Curvas de polarización de (A) Curva de densidad de Corriente (B) Curva de densidad Potencia en función con el voltaje de las diferentes CCM con plantas de zarzamora.

En la Figura 31 (A) se muestra la máxima generación de corriente en las diferentes CCM, donde se representa la pérdida de energía en los sistemas y se observan las tres regiones de pérdida de potencia. Por otro lado en la Figura 31 (B) se muestra la máxima generación de potencia en función del voltaje, donde a las celdas 1 y 2 obtuvieron mayor generación con valores de alrededor de  $1.9 \text{ W/m}^3$  y  $2.4 \text{ W/m}^3$  con respecto a las celdas 3 y 4 que mostraron valores alrededor de  $0.08$  y  $0.5 \text{ W/m}^3$ .

### 7.6.2 Resistencias internas de las CCM de Zarzamora

Caracterizadas eléctricamente las 4 cámaras, se determinó en cada curva la mínima resistencia interna y su máxima generación de potencia, siendo este un parámetro fundamental para caracterizar las cámaras y saber cómo se comportan cada una de ellas.

Teniendo en cuenta la ley de Ohm estipula que el Voltaje = (Intensidad de corriente) (Resistencia) mostrando que a mayor sea la resistencia interna, mayor será la caída del voltaje.

Los puntos representados en cada curva indican que es una resistencia externa de  $2.6 \text{ M}\Omega - 47\Omega$ , para conocerla resistencia interna apropiada se toma el punto más alto de cada curva, las resistencias van desde la más pequeña hasta la más grande, es decir, la curva inicia con los voltajes más pequeños y descendiendo con los voltajes más grandes (Caro, 2019)

En la Tabla 15 se representan las resistencias internas y las comparaciones de generación de voltaje de cada unas de las CCM de la planta de zarzamora, donde se observan los voltajes con los que se realizaron las curvas de polarización mediante los barridos de las cámaras, a su vez se observan los valores arrojados de acuerdo a los puntos más altos en las curvas son las resistencias internas adecuadas para las cámaras, por lo que a menor resistencia habrá menor pérdida de potencial en una cámara.

**Tabla 15:** Valores de Resistencias internas arrojados de los cuatros CCM de planta de Zarzamora

Celdas	Voltajes (milivoltios)	Resistencia Interna	Unidad
1	0.712	8200	$\Omega$
2	0.713	10000	$\Omega$
3	0.300	22000	$\Omega$
4	0.342	470000	$\Omega$

En la Tabla 15 se observa que la dos primeras cámaras obtuvieron una generación de voltaje mayor y una menor resistencia interna con una generación de potencia de valores de  $1.9 \text{ W/m}^3$  y  $2.4 \text{ W/m}^3$ , espectivamente.

En la celda 3 se obtuvo una resistencia interna alta con  $22000 \Omega$  con una densidad de potencia de  $0.08 \text{ W/m}^3$ . La cámara 4 obtuvo una resistencia interna aun mayor que la cámara 3 lo que implica una mayor caída de voltaje y una menor capacidad de salida de corriente. Esta última no presento crecimiento alguno y tuvo secamiento durante la etapa de

experimentación, pero presento valores significativos en la generación de voltaje, este fenómeno es atribuido a que la raíz de la planta constituyó como la última fuente de MO del suelo, que permitió a los microorganismos de la rizósfera alimentarse (Sana, 2017).

Lo mencionado en la literatura permite argumentar que las celdas que presentaron una relación simbiótica microorganismo – planta que fue por la cámara 1 y la cámara 2 al tener una tasa de crecimiento 1.5 % y 1.2 % con una la generación de carga 0.712 y 0.713 volts. Mientras que la cámara 3 una tasa de crecimiento 0.6% además agregado que su generación de voltaje fue baja en comparación a las dos primeras, dichos valores permitieron correlacionar la generación de carga con el estado de la microbiota que se encuentra en la rizósfera de la planta.

Es importante agregar que los valores obtenidos de las CCM de la planta de zarzamora (*Rubus ssp*) son buenos como respuesta a biosensores electroquímicos, haciendo comparación con respecto a otro trabajo similar. Brunelli *et. al.*, (2016) empleó las de celdas de combustible microbiano fotosintética como fuente de alimentación de un sensor inalámbrico, alcanzando un voltaje abierto de 0.502 volts con una resistencia interna 1000  $\Omega$  y una generación de potencia de 0.003 W que permitió el funcionamiento adecuado del sensor inalámbrico conectado a la celda. Al obtener una resistencia interna 8200  $\Omega$  con una densidad de 0.005 W/m<sup>2</sup> en la primera cámara de CCM de zarzamora, dichos datos cercanos al trabajo mencionado, nos permitirían alimentar un sensor que pueda facilitar el monitoreo el crecimiento y estado del cultivo.

## 8. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación permitieron generar las siguientes conclusiones:

- ✓ El tipo de suelo empleado para una CCM, genera una afectación correlacionada entre la generación de carga y el crecimiento de las plantas debido a las propiedades físicas y químicas del tipo de suelo, así como a la disponibilidad de nutrientes entre la raíz de la planta - microorganismos del suelo y sus interacciones microbianas.
- ✓ El uso de la materia orgánica del suelo como combustible para la generación de carga dentro de las celdas de combustible microbiano logró una respuesta positiva a mayores enmiendas de MO.
- ✓ El incremento de las enmiendas de MO disminuye el efecto de crecimiento de plantas y la generación de voltaje.
- ✓ Las celdas de combustible microbiano pueden usarse como sensores del crecimiento de plantas.
- ✓ La formación de una simbiosis positiva entre los microorganismos y la rizosfera de los cultivos juegan un papel fundamental para la estabilidad del sistema de la CCM del suelo.
- ✓ Los datos de voltaje y potencia obtenidos permiten la alimentación de un sensor para el monitoreo de los cultivos.

## 9. REFERENCIAS

- Ana del Pilar Pineda Marín, M. L. (2016). *Estado del Arte en Celdas de Combustible Microbianas ( CCM) para Producción de Bioenergía*. Bogotá D.C : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Andrea Schievano, A. C. (2015). Flotante Celúlas microbianas como recolectores de energía para la trasmisión de señal desde los cuerpos de agua naturales . *Fuentes de energía* , 340.
- Albrecht W. (1974). *El suelo ideal* . Estados Unidos. Estación agrícola: Universidad de Missouri.
- Baeza, D. A. (2015). Sensores y Biosensores Electroquímicos . *Facultad de Química UNM*, 1-15.
- Berg G, S. K. (2009). Las especies de plantas y el tipo de suelo dan forma cooperativa a la estructura y función de las comunidades microbianas en la rizosfera. *FEMS Microbiol Ecol*, 1-13.
- Bonetto, M. (2013). Desarrollo de biosensores/ bioensayos para la determinación rápida de parámetros indicadores de calidad de agua. Técnica electroquímicas, BOD y toxicidad. *Universidad de Buenos Aires*.
- Booki M, A. (2010). Microbial fuel Cell (Patente: US201001853A1). *Publicación: Danmarks Tekniskle Universitet*.
- Brunelli D, T. P. (2016 ). Microbial fuel cell as biosensor and a power source for flora health monitoring . *IEEE SENSORS* , 1-3.
- Buitrón, G. &. (2011). Produccion de Electricidad en Celdas de Combustible Microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos. *TIP Revista Especializada*, 5-11.
- Castro- Ortíz, L. P., & Villalobos Pietrini, R. (2007). Estado del arte y perspectivas del uso de biosensores ambientales en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambientales*, Vol. 23 núm 1, 35-45.

- Caro Martha Atziri (2019). *Desarrollo de celda de Combustible Microbiano como Biosensores Electroquímicos para la Medición de Parámetros de la Calidad de Agua Residual y Agua Potable* . Morelia.
- Christian Beer, Markus Reichstein (2010). Terrestrial gross carbondioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science* 329, 834-838.
- Chiranjeevi P, M. G. (2012). Rhizosphere mediated electrogenesis whit the function of anode placement for harnessing bioenergy through CO2 sequestration . *Bioresour Technol*, 364-70.
- Cynthia Gamarra, M. D. (2018). Relación Carbono Nitrogeno en suelos de sistemas silvopastoriles de Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias Forestales*.
- David Strik, Marjolein Helder. (2011). Células solares microbianas: aplicación de organismos fotosintéticos y electroquímicamente activos. *Trends Biotechnol* 29, 41-49 .
- Debrata Das, Ramya Veerubhotla. (2018 ). Application of Microbial Fuel Cell as a Biosensor . 389-402.
- De Schampelaire L, B. L. (2008). Microbial community analysis of anodes from sediment microbial fuel cells powered by rhizodeposits of living rice plants. *Environmental Science Technology*, 3053-3058.
- Deng H, W. Y. (2014). Factors affecting the performance of single-chamber soil microbial fuel cells for power generation . *Pedosphere*, 24;330-8.
- Dolly M. Revelo, N. H. (2013). Celdas de Combustible Microbianas ( CCMS): Un reto para la Remoción de Materia Orgánica la Generación de Energía Eléctrica . *Información Tecnológica Vol.24 N° 6*.
- Du, Z. H. (2007 ). "Una revisión de vanguardia sobre celdas de combustible microbianas: una tecnología prometedora para el tratamiento de aguas residuales y bioenergía". *Biotechnology Advances: 25 (5)*, 464-482.
- Farias N. G. (2016). *Análisis técnico- económico de la tecnología de las celdas de combustible microbiana para la producció de energías alternas*. Queretaro, México: Centro de investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ).

- Figueredo, F., & Olaya, A. C. (2014). Celdas de combustible biológicas basadas en metabolismo fotosintético. *Química viva*, 174-186.
- García-Villarrubia, A. G. (2015). *Valorización energética y tratamiento de efluentes residuales mediante celdas de combustible microbológicas*. Ciudad Real : Universidad de Castilla-La Mancha.
- Gobat JM, A. M. (2004). *El suelo vivo: fundamentos de la Ciencia del suelo*. United States of America: Science Publisher, Inc.
- Gonzales Sabroso, M. A. (2014). Remediación de suelos contaminados. *Guía sobre suelos contaminados*.
- Guitian, U. A. (2010). Disponibilidad de macro y micronutrientes en un suelo de cultivo de mabegondo (A coruña) . *Instituto Agronómico de campinas*.
- Gros, A. Y. (1992). Abonos guía práctica de la fertilización . *Ediciones Mundi-Prensa* , Madrid 450 P.
- Hassan SHA, G. E.-R.-H.-O. (2014). Electricity generation from rice straw using a microbial fuel cell. *Int J Hydrog Energy*, 9490-6.
- Heijne A. (2010). Improving the cathode of a Microbial Fuel Cell for efficient electricity production. Doctoral Thesis, Wageningen University. Wageningen, Países Bajos. 161 p.
- Helder Marjolein, Wei Shan. (2013). Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels Bioprod*, 52-64.
- Helder Marjolein, D. S. (2013). Resilience of root-top plant-microbial fuel cells during winter. *Biomass Bioenerg*, 1-7.
- T. Hernández, J. p. (1996). Estimulación del crecimiento de la cebada y la absorción de nutrientes por sustancias húmicas provenientes de diversos materiales orgánicos. *Bioresource Technology* 57 (3), 251-257.
- Hugo Enrique., U. V. (2017). *Celdas de combustible microbianas: generación de energía eléctrica utilizando aguas residuales*. Ciudad de México : Instituto Politécnico Nacional .
- Jian-Zhong Sun, G. P.-W.-D.-H.-Z.-C. (2015). Microbial fuel cell-based biosensors for environmental monitoring: a review. *Water Science & Technology*, 801-809.

- Kuzyakov, Y. (2002). Factores que afectan los efectos de cebado de la rizosfera. *Revista de nutrición vegetal y ciencia del suelo.*, 382-396.
- De Schamphelaire L, L. V. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environ. Sci. Technol* 42, 3053-3058.
- Lei Yu, Wilfred Chen. (2006). Microbial biosensors. *Molecular Electronics and analytical Chemistry*, Volumen 568, números 1-2, 200-210.
- Leong, J. X. (2013). Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 575-587.
- Li Wen-Wei, Guo- Ping Sheng (2011). "Avances recientes de lo separadores para pilas de combustible microbianas". *Tecnología Bioresource*, 244 - 252.
- Liu Hong, Shaoan Cheng (2005). Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell. *Environ Sci Technol* , 658-62.
- Liang Su, Wenzhao Jia (2011). Microbial biosensors: A review. *Biosensors & Bioelectronics* , 1788-1799.
- Logan E. Bruce, Regan M. John. (2006). Microbial fuel cells: Challenges and applications. *Enviromental Science Technology* 40, 5172-5180.
- Logan E Bruce, Juan M Regan (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells . *Trends in Microbiology.*, 512-518.
- Logan, E. (2009). "Bacterias exoelectrogénicas que alimentan las celdas de combustible microbianas". *Nature Reviews Microbiology.*, 375-381.
- Lopez, J. D. (2014). *Desarrollo de una Celda de Combustible Microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales*. Querterao, Mexico: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.
- Lourdes Patricia Castro-Ortíz, V. M. (2007 ). Estado del arte y perspectivas de uso de biosensores ambientales en México. *Rev. Int. Contam. Ambient* 23, 13-4.
- Makoto T, H. S. (2010). *Microbial fuel cell (patente: US20170077541A1)*. Estados Unidos
- Mandal., A. (26 de Febrero de 2019). *News Medical Life Sciencies*. Obtenido de News Medical Life Sciencies Web site : <https://www.news-medical.net/health/Biosensor-Applications->



- Revelo, D. M. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Información tecnológica*, 17-28.
- Robert. (2009). *Plant-e generates electricity from living plant*. Obtenido de <http://www.plant-e.com/en/>
- Rodríguez Varela, F. S. (2010). Celdas de Combustible. *Canada: Sociedad Mexicana del Hidrógeno*.
- Ruiz, B. (2011). Conferencia sobre nuevos materiales en el diseño de biosensores. *Universidad Politécnica Madrid*.
- Ruud A. Timmers, D. P. (2010). Redimiento a largo plazo de una pila de combustible microbiana de planta con ánodo de espartina. *Microbiología Aplicada y Biotecnología*, 973-981.
- Saavedra Olaya, A. U. (2018). Diseño y desarrollo de sensores y biosensores para monitoreo de procesos biohidrometalúrgicos. *Universidad de Buenos Aires*.
- S. Vendaka Mohan, S. S. (2010). Evolution of the potential of various aquatic ecosystems in harnessing bioelectricity through benthic fuel cell: effect of electrode assembly and water characteristic. *Bioresour. Technol*, 2240-2246.
- S. Venkata Mohan, G. M. (2011). Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresour. Technol.* 102, 7036-7042.
- Sharma, Y. L. (2010). Optimizing energy harvest in wastewater treatment by combining anaerobic hydrogen producing biofermentor (HPB) and microbial fuel cell (MFC). *International Journal of Hydrogen Energy*, 3789-3797.
- Symborg. (21 de 07 de 2022). SYMBORG. Obtenido de <https://symborg.com/es/proteccion-suelos/relaciones-microorganismos-mejoran-crecimiento-plantas-calidad-suelos/>
- Victor González rumayor, E. G. (2005). Aplicaciones de biosensores en la industria agroalimentaria. *Dirección General de Universidades e Investigación*.

- Yongjin-Zou, Juan Pisciotta. (2009). Celdas de combustible microbianas fotosintéticas con respuesta positiva a la luz. *Biotecnología y Bioingeniería*, volumen 104, número 5, pags. 939-946
- Wolinska A, S. Z. (2014). Bioelectricity production from soil using microbial fuel cells. *Appl Biochem Biotechnol*, 2287-96.