

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EVALUACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE PLANTA-
MICROBIANA (PMFC) Y LAS CONDICIONES DE SU ENTORNO
EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”**

Presentada por:

ARACELLI RAMOS PÉREZ EGAÑA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS
“EVALUACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE PLANTA-
MICROBIANA (PMFC) Y LAS CONDICIONES DE SU ENTORNO
EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA”**

Presentada por:

ARACELLI RAMOS PÉREZ EGAÑA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO AMBIENTAL

Sustentada y aprobada ante el siguiente Jurado:

Dr. Víctor Meza Contreras
PRESIDENTE

Biol. Juan Juscamaita Morales
MIEMBRO

Ing. Elec. José Alva Yance
MIEMBRO

Ph. D. José Calle Maraví
ASESOR

DEDICATORIA

*A Gladys Pérez-Egaña, por enseñarme a disfrutar y brillar.
A Juan Carlos Ramos, por siempre apoyarme y por, sin querer, animarme a estudiar en
la Universidad que cambió mi vida.*

AGRADECIMIENTO

A José Calle por la paciencia.

A Jovaira, por lo que somos desde que tuvimos la suerte de conocernos.

A todos los que me ayudaron, de alguna manera, a cumplir esta meta.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Celdas de combustible: funcionamiento	4
2.1.1 Celdas de combustible (FC)	4
2.1.2 Celda de combustible microbiana (MFC)	7
2.1.3 Celda de combustible planta- microbiana (PMFC)	9
2.2 Electrogénesis	16
2.2.1 Fundamentos.....	16
2.2.2 Organismos electrogénicos.....	17
2.2.3 Género <i>Geobacter</i>	18
2.3 Fotosíntesis y rizodeposición	19
2.3.1 Fotosíntesis y respiración	19
2.3.2 Microorganismos en el suelo.....	20
2.3.3 Rizósfera.....	22
2.3.4 Rizodeposición	22
2.4 Maíz	23
2.5 Generación eléctrica de PMFC	25
2.5.1 Circuitos eléctricos	25
2.5.2 Voltaje e intensidad eléctrica.....	26
2.5.3 Potencia eléctrica y densidad de potencia	27
2.6 Cobre: agente antimicrobiano	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1 Lugar de ejecución.....	30
3.2 Materiales.....	31
3.2.1 Insumos.....	31
3.2.2 Equipos	31
3.3 Unidad experimental.....	32
3.4 Métodos.....	32
3.4.1 Preparación de la celda de combustible planta-microbiana (PMFC)	32
3.4.2 Operación de la PMFC	36

3.4.3	Evaluación de parámetros.....	38
3.4.4	Estimación de generación de energía eléctrica.....	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1	Evaluación horaria de la generación eléctrica- VCA.....	45
4.1.1	Comportamiento horario del voltaje en circuito abierto.....	45
4.1.2	Relación con los parámetros del entorno.....	47
4.1.3	Influencia de la planta en la PMFC	51
4.2	Evaluación diaria de la generación eléctrica.....	53
4.2.1	Comportamiento diario de los parámetros de generación eléctrica.....	54
4.2.2	Relación con parámetros del entorno	57
4.2.3	Etapas de generación eléctrica.....	66
4.3	Evaluación estacional de la generación eléctrica.....	68
4.3.1	Comportamiento estacional del VCA.....	69
4.3.2	Relación con parámetros del entorno	70
4.4	Estimación de la generación de energía eléctrica	72
4.5	Aplicación propuesta	74
4.6	Evaluación de los efectos de la PMFC en el suelo y la planta.....	79
4.6.1	Caracterización del suelo.....	79
4.6.2	Crecimiento de la planta.....	84
V.	CONCLUSIONES	87
VI.	RECOMENDACIONES	89
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
VIII.	ANEXOS.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Fecha y horario de experimentación por estación climática	37
Tabla 2: Medición de parámetros de generación eléctrica.	39
Tabla 3: Parámetros considerados en el análisis de caracterización de suelos.....	42
Tabla 4: Análisis de caracterización de suelo.....	43
Tabla 5: Voltaje de circuito abierto correspondiente a las fechas de muestreo.....	47
Tabla 6: Voltaje de circuito abierto de muestra de PMFC	53
Tabla 7: Voltaje de circuito abierto de muestra MFC	53
Tabla 8: Medidas resumen del voltaje en circuito cerrado.....	57
Tabla 9: Registro de la temperatura del suelo por muestra	58
Tabla 10: Registro de la temperatura ambiental (C°).....	61
Tabla 11: Registro de la radiación solar (watts/m ²)	64
Tabla 12: Características de la generación eléctrica según etapas	66
Tabla 13: Resumen de los registros del VCA según estación climática	69
Tabla 14: Resumen de los parámetros del entorno por estación climática.....	70
Tabla 15: Resumen de las medidas de generación eléctrica por etapas.	73
Tabla 16: Características de diseño de la PMFC de la aplicación propuesta.	75
Tabla 17: Estimación de la generación eléctrica de la PMFC propuesta.	77
Tabla 18: Estimación de los costos para la implementación del sistema	79
Tabla 19: Análisis inicial de caracterización del suelo (parámetros físico-químicos). .	80
Tabla 20: Análisis inicial de microorganismos y actividad microbiana.....	80
Tabla 21: Medidas finales de los parámetros de crecimiento de las plantas.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Celda de combustible hidrógeno/oxígeno.	5
Figura 2: Celda de combustible microbiana.....	8
Figura 3: Celda de combustible planta-microbiana.....	11
Figura 4: Celda de combustible planta-microbiana.....	12
Figura 5: Celda de combustible sedimentaria microbiana.	14
Figura 6: Lugar de ejecución del experimento.....	30
Figura 7: Macetas con suelo preparado previamente homogenizado.	32
Figura 8: Configuración de los electrodos en la PMFC.....	33
Figura 9: Ánodo acoplado al cable de cobre.	34
Figura 10: Cátodo acoplado al cable de cobre.	34
Figura 11: Acoplamiento de las borneras a las macetas.....	35
Figura 12: Desengranamiento de las mazorcas y selección de las semillas de maíz. ...	35
Figura 13: Siembra de las semillas de maíz.	36
Figura 14: Muestras de la PMFC en periodo de operación.....	38
Figura 15: Configuración para la medición del voltaje en circuito abierto.....	40
Figura 16: Configuración para la medición de la intensidad en corto circuito.	40
Figura 17: Configuración para la medición de parámetros en circuito cerrado.....	41
Figura 18: Medición horaria del VCA en tres fechas de experimentación	46
Figura 19: Medición horaria del VCA y de la radiación solar (15-16 de setiembre)....	48
Figura 20: Medición horaria del VCA y de la radiación solar (3-4 de noviembre).	48
Figura 21: Medición horaria del VCA y de la radiación solar (3-4 de enero)	49
Figura 22: Medición horaria del VCA y temperatura ambiental (15-16 de setiembre) 50	
Figura 23: Medición horaria del VCA y temperatura ambiental (3-4 de noviembre)... 50	
Figura 24: Medición horaria del VCA y de la temperatura ambiental (3-4 de enero).. 51	
Figura 25: Medición horaria del VCA de la PMFC y MFC (15-16 de setiembre)	52
Figura 26: Medición horaria del VCA de la PMFC y MFC (3-4 de noviembre).....	52
Figura 27: VCA registrado durante el tiempo de toma de datos.....	54
Figura 28: Voltaje en circuito cerrado registrado durante el tiempo de toma de datos. 56	
Figura 29: Voltaje y temperatura registrados durante la toma de datos (muestra M1). 59	
Figura 30: Voltaje y temperatura registrados durante la toma de datos (muestra M9). 59	
Figura 31: Voltaje y temperatura registrados durante toma de datos (muestra M12)... 60	
Figura 32: VCA y temperatura ambiental registrados en el tiempo de toma de datos.. 62	

Figura 33: Voltaje y temperatura ambiental registrados en la toma de datos.	62
Figura 34: VCA y radiación solar registrados en el tiempo de toma de datos.	65
Figura 35: Voltaje y radiación solar registrados en el tiempo de toma de datos.....	65
Figura 36: Comportamiento del voltaje en circuito abierto M1.....	66
Figura 37: Comportamiento del voltaje en circuito abierto M9.....	67
Figura 38: Resumen de VCA registrado según estación climática.	70
Figura 39: Resumen del VCA y de la temperatura ambiental por estación climática. .	71
Figura 40: Resumen del VCA y de la radiación solar por estación climática.....	72
Figura 41: Potencia eléctrica generada según etapas	74
Figura 42: Tira de diodos LED.	75
Figura 43: Configuración de la PMFC para encendido de tiras LED de 1 metro.....	76
Figura 44: Diseño propuesto para el encendido de tiras LED de 1 metro.	78
Figura 45: Variación del pH de las muestras de suelo.	81
Figura 46: Variación de la conductividad eléctrica de las muestras de suelo.	82
Figura 47: Variación del carbono de las muestras de suelo.	83
Figura 48: Variación del P disponible de las muestras de suelo.	84
Figura 49: Variación del K disponible de las muestras de suelo.	84
Figura 50: Registro de la altura de plantas y de los parámetros eléctricos	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Registro de mediciones de parámetros eléctricos y del entorno	83
Anexo 2: Crecimiento de plantas de maíz de muestras.....	88
Anexo 3: Análisis de caracterización físico química de suelo - CERPER	94
Anexo 4: Análisis especial de suelo-LASPAF.....	101
Anexo 5: Análisis de Laboratorio de Microbiología - Marino Tabusso	103

RESUMEN

La Celda de Combustible Planta Microbiana (PMFC) fue construida y operada en condiciones climáticas en el distrito de La Molina, utilizando el suelo como sustrato, las bacterias presentes en el suelo como catalizadoras, y como cultivo el maíz obteniéndose una potencia eléctrica promedio de 0.059 mW y una densidad de potencia de 29.77 mW/m².

Se estudió el comportamiento de la generación de energía eléctrica en el tiempo: de manera horaria y en un periodo de 46 días. El comportamiento horario del voltaje en circuito abierto (VCA) se caracterizó por alcanzar su máximo entre las 7 y 11 am (promedio 0.99 v), disminuir durante el día y llegar al mínimo alrededor de las 12 pm (promedio 0.96 v). El comportamiento en el periodo de 46 días contó con tres etapas de generación eléctrica: ascendente (inicial), máxima (intermedia) y estable (final); la etapa ascendente se caracterizó por tener un promedio VCA de 0.755 v y 7 días de duración; la etapa máxima por 0.987 v y 8 días, y la etapa estable por 0.76 v y 29 días.

Se determinaron las características físico-químicas del suelo utilizado al inicio y final del experimento de 46 días de duración, observándose que no ocurrieron cambios significativos por lo que se concluyó que la PMFC no tuvo efectos negativos en el suelo. Asimismo, se comprobó que la planta de maíz utilizada creció con normalidad.

Finalmente, al evaluar el funcionamiento continuo de la PMFC se determinó como una aplicación de este sistema el encendido de luces LED para uso como luces de señalización.

Palabras clave: PMFC, MFC, electrogénesis, bioelectricidad, bioenergía.

ABSTRACT

The plant-microbial fuel cell (PMFC) was constructed and operated in climatic conditions in the district of La Molina, using soil as substrate, bacteria present in natural form in the soil as catalyzers, and corn as crop obtaining an average electrical power of 0.059 mW and a power density of 29.77 mW/m².

Likewise, the behavior of the generation of electrical energy in the time of operation of the PMFC was studied: in an hourly manner and in a 46 day period. The hour behavior of the open circuit voltage (OCV) was characterized for reaching its maximum between 7 and 11 am (0.99 v. on average), decrease during the day and reaching its minimum at 12 pm. The behavior in the period of 46 days had three stages of electrical generation: ascendant, maximum and stable. The initial stage (ascendant) was characterized by an average VCA of 0.755 and a duration of 7 days: the intermediate stage (maximum) by an average VCA of 0.987 and a duration of 8 days, and a final stage (stable) by an average VCA of 0.76 and a duration of 29 days.

Also, the soil was characterized at the beginning and the end of the experiment of 46 days of operation, observing that there were no significant changes in the principal characteristics. Therefore, it was concluded that the PMFC did not have negative effects on the soil characteristics.

Finally, when evaluating the continuous operation of the PMFC it was determined as an application of this system the lighting of LED lights for use as guide lights.

Keywords: PMFC, MFC, electrogénesis, bioelectricity, bioenergy.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población humana, su creciente demanda de recursos naturales y su impacto en el medio ambiente, pone en riesgo el hábitat de los seres vivos, siendo la energía eléctrica uno de los recursos cuya demanda se ha incrementado en función al crecimiento de la producción, por lo que en los últimos años, una evidente crisis energética ha sido tema de debate en las principales conferencias mundiales vinculadas al cambio climático, como en la Conferencia de las Partes; por lo que se ha proyectado un incremento del 70 por ciento en la demanda de energía eléctrica para el año 2035 a nivel mundial (UNESCO, 2014).

El Plan de Acceso Universal a la Energía 2013-2022, cuya introducción se basa en el informe “Energía para un Futuro Sostenible”, elaborado en el 2010, establece que una prioridad clave en el ámbito energético global es el acceso universal a la energía, que implica el 100 por ciento de acceso a la energía para necesidades básicas humanas al año 2030. En ese sentido, el acceso a la energía es considerada una condición mínima para que una comunidad se desarrolle y su disponibilidad es necesaria para la mejora de la educación, salud, seguridad y actividades productivas (MINEM, 2013).

En los últimos años, el Perú ha avanzado sostenidamente en electrificación, sin embargo, aún existe una amplia brecha diferencial entre la electrificación en zonas rurales y urbanas: el 22 por ciento de las zonas rurales no cuentan con acceso a energía, mientras que en las zonas urbanas solo hay una deficiencia de 6.7 por ciento (MINEM, 2015). Dicha diferencia se explica porque el Perú se caracteriza por tener condiciones que dificultan la electrificación rural, como la lejanía y poca accesibilidad de sus localidades, así como la dispersión entre las poblaciones y entre las viviendas de las mismas.

En esa misma línea, un factor determinante que dificulta el desarrollo en las zonas rurales es la pobreza, la cual afecta a 44.4 por ciento de la población rural, así como el 18 por

ciento de la población del país reside en hogares con al menos una Necesidad Básica Insatisfecha, esta población se encuentra predominantemente en zonas rurales (INEI, 2018).

Ambos factores, la falta de acceso a la energía y la pobreza, constituyen una dificultad importante para el desarrollo de las zonas rurales del Perú, y al ser determinantes para satisfacer necesidades básicas conllevan a utilizar métodos dañinos para obtener energía, tanto para el ambiente como para la salud, tales como: residuos, leña, cera, carbón y querosene (Murillo *et al.*, 2015). Cada año más de 4 millones de personas mueren por enfermedades atribuidas a la contaminación del aire de los hogares por el uso de combustibles sólidos para cocinar (OMS, 2018), en ese sentido, el acceso a la energía es de necesidad urgente ya que su disponibilidad está asociada al mejoramiento de las condiciones de educación, salud, seguridad y actividades productivas.

Por lo antes expuesto, es necesaria la búsqueda de sistemas eficientes que puedan satisfacer las demandas energéticas a futuro para la población mundial sin afectar el equilibrio existente, por lo que una alternativa es el impulso de las energías renovables como la bioenergía, que es un tipo de energía renovable derivada de la biomasa o de fuentes biológicas, la misma que representa un 10.2 por ciento del total de energías renovables (IPCC, 2011), dentro de ellas se encuentra la Celda de Combustible Planta-Microbiana (PMFC) que es una nueva alternativa para la generación de electricidad de forma sostenible.

A nivel mundial, se han realizado investigaciones acerca de la generación de energía eléctrica bajo el principio de las celdas de combustible microbianas (MFC), que son celdas de combustible que utilizan a los microorganismos presentes en un sustrato como catalizadores a fin de oxidar la materia orgánica e inorgánica y generar corriente, para ello los electrones obtenidos por los microorganismos son transferidos del ánodo hacia el cátodo a través de un material conductor (Logan *et al.*, 2006). El inicio del uso de esta tecnología para la generación de electricidad se remonta a 1911, con la investigación realizada por Potter, sin embargo, dicha investigación fue ampliada en profundidad en el año 1990 y en 1999 se desarrolló sin mediadores químicos (Logan, 2008).

La mencionada tecnología se ha utilizado con diferentes sustratos y fuentes de alimentación de materia orgánica, como en el caso de la PMFC que utiliza suelo o agua como sustrato y una planta como fuente de alimentación, sin embargo, esta última ha sido desarrollada principalmente para plantas cuyo medio de crecimiento es el agua (Helder, 2012) por lo que se desconoce cómo las condiciones del entorno influyen en la generación de electricidad al utilizar plantas vivas cuyo medio de crecimiento es el suelo.

Por lo antes mencionado, la presente investigación evalúa la generación eléctrica del sistema de la PMFC en relación a las condiciones de su entorno, utilizando suelo como sustrato y una planta como fuente de alimentación, con la finalidad de determinar cuáles son las mejores condiciones para la operación de la PMFC. De la misma manera, esta investigación comprueba el funcionamiento de la PMFC para la generación eléctrica y propone una aplicación práctica para esta tecnología.

En resumen, esta investigación tiene como objetivo general evaluar la celda de combustible planta-microbiana y las condiciones de su entorno en la generación de energía eléctrica. Por lo que se tuvo los siguientes objetivos específicos: determinar el efecto de las condiciones del entorno (temperatura ambiental, temperatura del suelo y radiación solar) y el desempeño eléctrico de la PMFC; analizar el comportamiento de la generación de energía eléctrica de la PMFC durante el tiempo de operación, y describir de los cambios en las características básicas del suelo en la generación de energía eléctrica de la PMFC.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Celdas de combustible: funcionamiento

La transformación de la energía química en eléctrica es posible utilizando las celdas de combustible (Carrette *et al.*, 2001). Tanto las celdas de combustible microbianas (MFC) como las celdas de combustible planta-microbianas (PMFC), son solo variantes ya que trabajan bajo el mismo principio, en ese sentido, comprender el principio de funcionamiento de las celdas de combustible es esencial para el entendimiento de las PMFC.

2.1.1 Celdas de combustible (FC)

a. Concepto y principio de funcionamiento

Las celdas de combustible son celdas galvánicas, en las que la energía libre de una reacción química espontánea es convertida en energía eléctrica (Carrette *et al.*, 2001), las cuales requieren dos compartimientos separados, cada uno con un electrodo (ánodo y cátodo).

El funcionamiento de las celdas de combustible se basa en una reacción de oxidación en el ánodo y una de reducción en el cátodo; la reacción que ocurre en el ánodo es la oxidación directa del combustible (hidrógeno o metanol), mientras que la reacción en el cátodo es la reducción del oxígeno (Carrette *et al.*, 2001).

b. Estructura de la celda de combustible

La estructura básica de una celda de combustible consiste en dos electrodos (anódico y catódico) que se encuentran separados por una membrana y que están conectados mediante un circuito externo; ambos electrodos están expuestos a

flujos que los abastecen con combustible u oxidante (oxígeno o hidrógeno) (Carrette *et al.*, 2001).

La figura 1 es una representación de una celda de combustible hidrógeno/oxígeno presentada por Carrete *et al.* (2001), en la que se puede observar en el lado derecho (ánodo) que ingresa H_2 como combustible, el cual será oxidado liberándose electrones y protones que llegarán al cátodo por diferentes caminos. Asimismo, se puede apreciar que los electrones se trasladan hacia el cátodo por el circuito exterior ubicado en la parte superior, mientras que los protones llegan al ánodo mediante el paso por la membrana selectiva (electrolito) que permite únicamente el paso de protones. De esta manera, en el cátodo se tendrán protones y electrones, los cuales, al reaccionar con el oxígeno que ingresa, formarán agua (Carrette *et al.*, 2001).

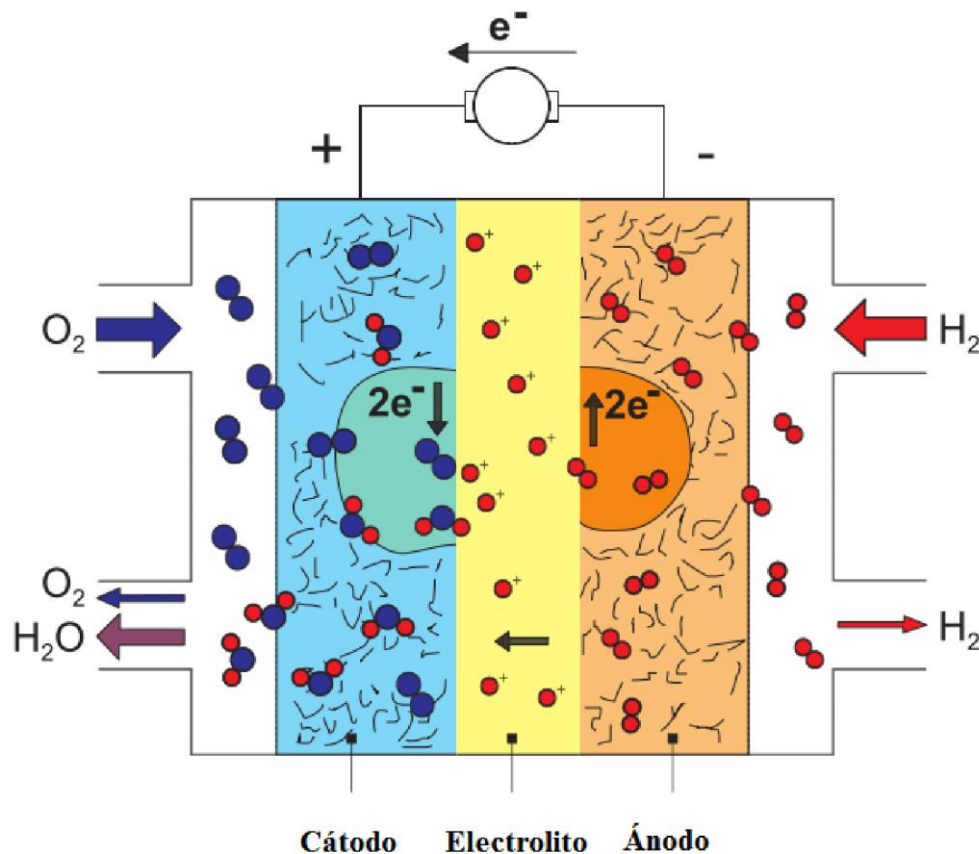


Figura 1: Celda de combustible hidrógeno/oxígeno.

FUENTE: Carrette *et al.* 2001

c. Fundamentos de generación de energía eléctrica

Las reacciones galvánicas (oxidación y reducción) que ocurren en las celdas son termodinámicamente favorables, es decir que la diferencia de energía libre (ΔG) es negativa, y ocurren espontáneamente cuando dos materiales de diferentes potenciales estándar de reducción son conectados por una carga electrónica, dichas reacciones ocurren constantemente y permiten la conversión de energía química en energía eléctrica a través del transporte de electrones por el circuito externo. En ese sentido, el material con el menor potencial estándar de reducción es llamado electrodo negativo u ánodo ya que entrega electrones, mientras que el material con el mayor potencial estándar de reducción es llamado electrodo positivo o cátodo ya que acepta electrones (Kumar y Sarakonsri, 2010).

En el ánodo del sistema presentado en la figura 1, la reacción correspondiente a la oxidación del combustible, en este caso hidrógeno, es la siguiente:



Cuando los electrones y protones, liberados en el ánodo, llegan al cátodo se da la siguiente reacción:



Siendo la reacción global de la celda de combustible:



De esta manera, la energía libre de las reacciones químicas que ocurren en la celda de combustible se convierte en energía eléctrica mediante el paso de los electrones a través del circuito externo. Dicha energía, conocida como energía libre de Gibbs, se relaciona con el voltaje de la celda como se representa en la Ecuación 4 (Carrette *et al.*, 2001).

$$\Delta G = -nF\Delta U_0 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Dónde: ΔG es la energía libre de Gibbs, n es el número de electrones involucrados en la reacción, F es la constante de Faraday y ΔU_0 es el voltaje de la celda en ausencia de un flujo de corriente.

El voltaje de equilibrio de la celda es la diferencia entre los potenciales del cátodo y ánodo, los cuales son determinados por las reacciones que ocurren en cada electrodo (Carrette *et al.*, 2001), y está representado en la Ecuación 5.

$$\Delta U_0 = U_{0,c} - U_{0,a} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Dónde: ΔU_0 es el voltaje de equilibrio de la celda, $U_{0,c}$ es el potencial en el cátodo y $U_{0,a}$ es el potencial en el ánodo.

2.1.2 Celda de combustible microbiana (MFC)

a. Concepto y principio de funcionamiento

Las celdas de combustible microbianas son celdas de combustible que utilizan a las bacterias como catalizadores para oxidar la materia orgánica e inorgánica y generar corriente, para ello los electrones obtenidos por las bacterias son transferidos al ánodo y fluyen hacia el cátodo a través del material conductor (Logan *et al.*, 2006).

Las MFC se basan en el mencionado principio de las celdas de combustible acoplado a la presencia de microorganismos como catalizadores de las reacciones, es decir, los microorganismos son los que se encargarán de la degradación del combustible (materia orgánica e inorgánica) y entregarán los electrones y protones directamente al sistema. En ese sentido, son sistemas capaces de producir energía eléctrica a través de la degradación de compuestos realizada por microorganismos. Cabe señalar que los electrones liberados en la reacción de degradación de la materia orgánica pueden ser transferidos al ánodo por diferentes medios como transportadores, por transferencia directa de membrana, por nanowires o por la adición de mediadores químicos (Logan *et al.*, 2006).

b. Configuración

En la figura 2 se presenta el modelo de MFC propuesto por (Logan *et al.*, 2006); en el lado izquierdo se encuentra el ánodo, donde se encuentra esquematizada la reducción de la glucosa por la bacteria, reacción que libera finalmente protones y electrones, dichos electrones se dirigen hacia el cátodo mediante el material

conductor (circuito eléctrico externo) ubicado en la parte superior, mientras que los protones pasan al cátodo a través de la membrana de intercambio catiónico (la cual no permite el paso de electrones); de esta manera, los referidos protones y electrones entrarán en contacto con el oxígeno en el cátodo, formando agua. Cabe señalar que la energía eléctrica proviene del paso de los electrones a través del circuito externo.

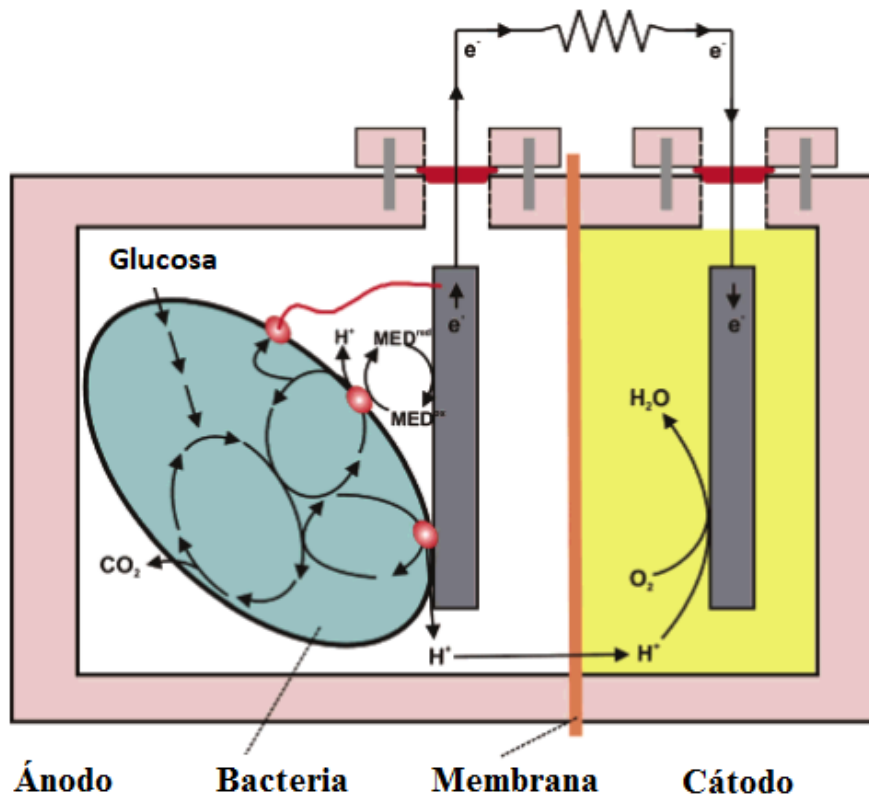


Figura 2: Celda de combustible microbiana.

FUENTE: Logan *et al.* 2006

La membrana de intercambio catiónico tiene como función principal permitir únicamente el paso de protones, dejando los electrones en el ánodo, además, asegura que el oxígeno del ambiente solo esté presente en el cátodo. Al respecto, se debe indicar que si existiera presencia de oxígeno en la cámara anódica, los electrones generados serían usados directamente para la reducción del oxígeno en vez de ser utilizados para la producción de electricidad, interfiriendo de esta manera con la eficiencia del sistema, asimismo, el uso de oxígeno por las bacterias en la cámara anódica puede resultar en una menor eficiencia coulúmbica (fracción

de electrones recuperados como corriente frente a la máxima recuperación posible de electrones).

2.1.3 Celda de combustible planta- microbiana (PMFC)

La PMFC es un sistema derivado de las MFC (Deng *et al.*, 2012), es un tipo de MFC que utiliza a las plantas vivas y a las bacterias para la generación de electricidad, la cual se basa en los procesos que ocurren naturalmente en la interacción de planta-sustrato y en la celda de combustible microbiana, cuya característica principal consiste en que no se requiere alimentar al sistema con materia orgánica, ya que la planta lo hace naturalmente mediante la fotosíntesis. Asimismo, la superioridad de este tipo de MFC frente a los demás sistemas es el factor sostenibilidad, ya que la alimentación con materia orgánica lo realiza la planta naturalmente y su aplicación no genera cambio de uso de suelo (Helder, 2012), es decir no requiere de mayor intervención humana que la del riego de la planta.

Esta tecnología ha sido introducida como una fuente de energía renovable y sostenible, sin embargo, se ha determinado mediante el método de Análisis de Ciclo de Vida, que el elemento del sistema cuyo impacto ambiental es mayor, es el tipo de material utilizado para ensamblarlo (Helder *et al.*, 2012).

a. Fundamento

La planta genera materia orgánica vía fotosíntesis utilizando luz solar y CO₂ para su posterior respiración, sin embargo, no todo lo generado en la fotosíntesis es utilizado en la respiración, ya que el remanente, que puede ser de hasta un 70 por ciento de la materia orgánica, se dirige hacia el suelo mediante las raíces en forma de rizodeposiciones como lisatos, mucílagos y exudados. Dicha materia orgánica puede ser degradada por las bacterias que se encuentran en el suelo aledaño a las raíces, liberando CO₂, protones y electrones; una fracción de estos electrones y protones liberados serán recibidos por el ánodo del PMFC para luego pasar al cátodo, el cual será reducido para formar agua (Helder, 2012).

La corriente eléctrica generada por el sistema está determinada por el número de electrones que atraviesan el electrodo, por lo que el porcentaje de electrones efectivamente convertidos en electricidad de todos los que estuvieron presentes en el sustrato, es la eficiencia coulúmbica.

b. Diseño

Al igual que la MFC, el sistema consta de un ánodo y un cátodo conectados mediante un material conductor que contiene una resistencia, sin embargo, no en todos los diseños es necesario el uso de una membrana de intercambio catiónico para obtener dos cámaras, ya que las condiciones anaerobias se aseguran con la profundidad.

Configuración: La configuración usual para este sistema debe asegurar: que el ánodo se encuentre bajo condiciones anaeróbicas y cerca al combustible (materia orgánica), que el cátodo se encuentre bajo condiciones aeróbicas y que ambos estén conectados mediante un material conductor.

La configuración más utilizada es la propuesta por (Deng *et al.*, 2012), que se representa en la Figura 3, la cual consiste en que el ánodo es colocado cerca de las raíces de la planta a fin de utilizar los rizodepósitos como combustible para la reacción con los microorganismos y obtener condiciones anaeróbicas, mientras que el cátodo se coloca en la zona superficial para obtener condiciones aeróbicas.

En los numerales anteriores (2.1.1 y 2.1.2) se ha indicado que un elemento básico en el sistema es la membrana de intercambio catiónico para separar ambas cámaras. Sin embargo, en el caso de las PMFC no es necesario que el cátodo y el ánodo estén separados físicamente cuando se utiliza oxígeno para la reacción del cátodo (Logan *et al.*, 2006).

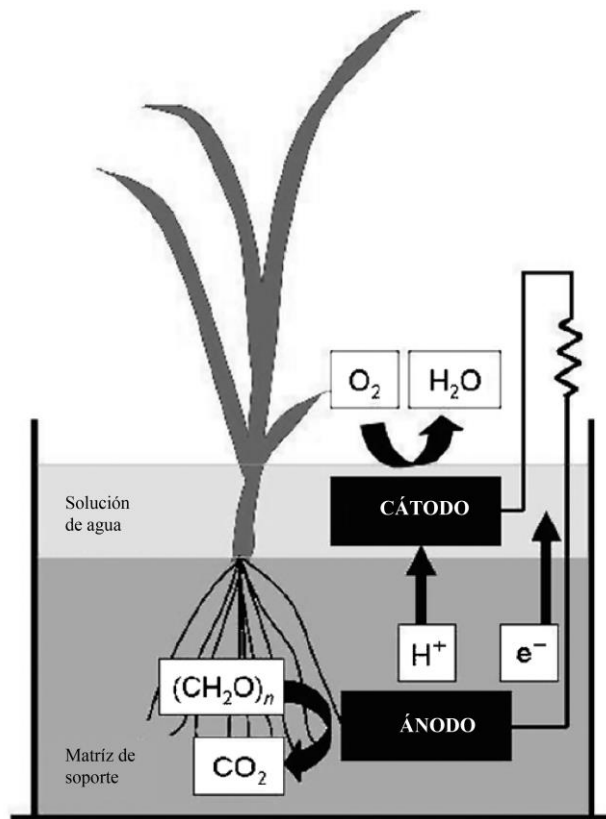


Figura 3: Celda de combustible planta-microbiana.

FUENTE: Deng *et al.* 2012

Igualmente, se suelen utilizar otras configuraciones como, por ejemplo: colocar el cátodo cerca de las raíces donde el oxígeno liberado por estas proporciona las condiciones aeróbicas. Esta configuración se ve representada en la Figura 4, la cual fue propuesta por (Deng *et al.*, 2012).

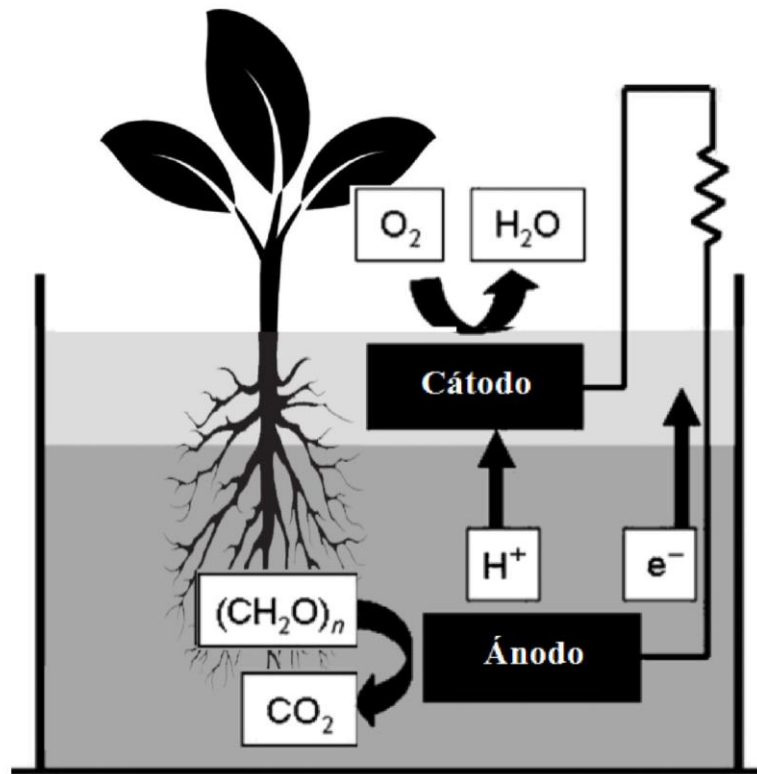


Figura 4: Celda de combustible planta-microbiana.

FUENTE: Deng *et al.* 2012

Materiales: La elección de un material adecuado de los electrodos puede asegurar la obtención de mayores cantidades de generación de energía eléctrica.

Ánodo: El material utilizado en el ánodo es uno de los factores que determinan el tipo de comunidad microbiana que se encontrará alrededor del mismo (Cabezas *et al.*, 2015), como por ejemplo en el caso del grafito, que en cualquiera de sus presentaciones (barra, papel, fieltro, gránulos) es un material que tiene buen funcionamiento, ya que asegura sostenibilidad a largo plazo por su naturaleza no-oxidativa y por ofrecer un buen medio para el desarrollo de comunidades microbianas aledañas. A pesar de que el grafito no cuenta con una conductividad eléctrica tan alta, es muy popular para las aplicaciones en MFC por su alta área específica, porosidad y precio cómodo (Doherty *et al.*, 2015) .

Cátodo: La elección del material del cátodo afecta altamente el desempeño de la celda. Se puede tener buenos resultados al utilizar ferricianuro, carbono o grafito,

o platino. En cuanto al aceptor de electrones del cátodo, el más adecuado es el oxígeno debido a su alto potencial de oxidación, a su disponibilidad, por no tener costo alguno y por no generar ningún residuo.

Plantas: Los estudios y aplicaciones a este tipo de MFC se han realizado, por lo general, con plantas acuáticas, así como, el arroz o pastos de humedales. La elección de la planta adecuada es un factor determinante en la generación de electricidad. Dependiendo de la especie, edad y condiciones ambientales (radiación solar y temperatura), la planta fija cierta cantidad de carbono por las raíces en forma de diferentes tipos de compuestos orgánicos. Dichos compuestos orgánicos podrán ser posteriormente utilizados por la celda de combustible para la generación de electricidad.

c. Desempeño

Para estudiar y comparar el desempeño o eficiencia de las PMFC se suele utilizar la magnitud de potencia por unidad de superficie de electrodo (W/m^2), la eficiencia coulúmbica y la resistencia interna, ya que estas características pueden determinar pérdidas considerables de energía, y son susceptibles a cambios en la configuración del sistema, como por ejemplo: colocar el cátodo y el ánodo cerca puede llevar a disminuir la resistencia interna, lo cual resulta en un mayor desempeño eléctrico (Vásquez-Larios *et al.*, 2010).

d. Antecedentes

La tecnología MFC representa una de las más recientes formas de generar electricidad desde biomasa utilizando microorganismos. La primera vez en que se generó energía eléctrica a partir de bacterias fue en 1911 por Potter, sin embargo, no fue sino hasta 1990 en que la investigación en MFC se desarrolló a profundidad y en 1999 que se desarrolló sin mediadores químicos (Logan, 2008).

Los inicios de la investigación de esta tecnología iniciaron con Derek Lovley y la aplicación de la MFC a sedimentos de río, lo cual se conoce como Celda de Combustible Microbiana Sedimentaria (SMFC). En la Figura 5 se presenta un modelo de SMFC propuesto por (Deng *et al.*, 2012).

En este sistema el ánodo es enterrado en el sedimento, lo cual representa la cámara anódica, mientras que el cátodo se coloca en la parte superficial que está constituida por una fase acuosa aeróbica. Los sedimentos de río son ricos en microorganismos y en compuestos orgánicos, por lo cual el sistema inicia con una degradación natural de los mismos generando un flujo de electrones, sin embargo, esta carga de materia orgánica se agota y debe ser alimentada periódicamente para que siga en funcionamiento. Este tipo de MFC son utilizadas actualmente; alguno de sus usos ha sido, por ejemplo, dar energía a hidrófonos para rastrear animales marinos. La Figura 5 es una representación esquemática de todos los componentes presentes en las celdas de combustible microbiana sedimentaria (Deng *et al.*, 2012).

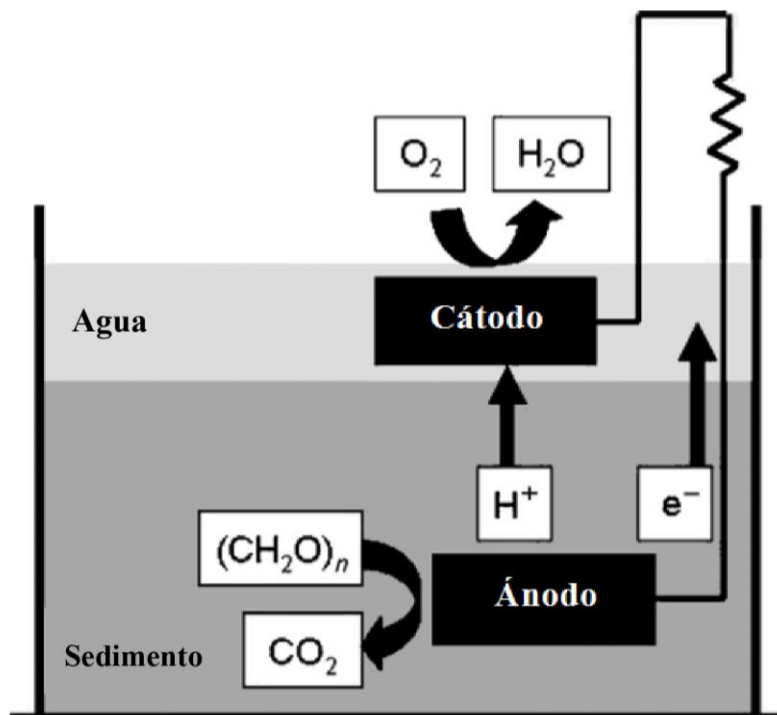


Figura 5: Celda de combustible sedimentaria microbiana.

FUENTE: Deng *et al.* 2012

El sistema de la celda de combustible microbiana no solo se puede utilizar para la generación de electricidad, sino también para el tratamiento de aguas residuales y para el monitoreo de contaminantes (Deng *et al.*, 2012).

Los temas claves de esta investigación y su desarrollo, han sido tratados internacionalmente. A continuación, se detallarán brevemente los principales trabajos en el ámbito internacional como nacional.

Un primer antecedente de investigación corresponde al descubrimiento de *Geobacter* por Derek Lovley en sedimentos del río Potomack, en el año 1987. A partir de este trabajo, se ha impulsado la investigación de *Geobacter* y de otras bacterias electrogénicas, así como del campo de las celdas de combustible microbianas (MFC) utilizando sedimentos, principalmente. En los últimos años estos estudios han sido complementados con el trabajo realizado por Bruce Logan, quien se ha dedicado tanto al estudio de las bacterias electrogénicas como a esquematizar las celdas de combustible microbianas en cuanto a la disposición del sistema, materiales, parámetros de evaluación y métodos. En este contexto, numerosos estudios se han realizado utilizando condiciones y elementos diferentes en el sistema de las celdas de combustible microbianas con la finalidad de obtener mejores resultados en la generación de electricidad.

El campo de las celdas de combustible planta-microbianas (PMFC) ha sido desarrollado ampliamente por el equipo de Plant-e, empresa derivada del departamento de tecnología ambiental de la Universidad Wageningen (Helder, 2012), integrado por Marjolein Helder, David Strik, entre otros, quienes se han dedicado a la investigación de PMFC utilizando plantas acuáticas con la intención de desarrollar un sistema de generación de energía a gran escala que pueda abastecer eléctricamente a un hogar típico de Holanda. Paralelamente, se han desarrollado investigaciones que analizan diferentes disposiciones del sistema, así como inóculos y ambientes de las PMFC, buscando mejores resultados en la obtención de energía eléctrica. Para los estudios de las PMFC se ha utilizado principalmente *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* y plantas de arroz. Además, se ha llegado a realizar análisis de ciclo de vida al sistema para evaluar el factor sostenibilidad.

En el Perú, esta tecnología ha sido desarrollada por la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). La UTEC desarrolló la “PlantaLámparas” basándose en la

generación de electricidad bajo el principio de las celdas de combustible microbianas, utilizando plantas vivas (BBC, 2015). El proyecto se desarrolló y se llevó a la población de Nuevo Saposoa, contribuyendo a la solución de una de las principales carencias de la comunidad: la falta de una fuente de luz no contaminante (BBC, 2015).

2.2 Electrogénesis

2.2.1 Fundamentos

La electrogénesis se refiere a la habilidad de ciertos microorganismos de generar y transferir electrones exocelularmente (Logan, 2009). Es el proceso mediante el que las bacterias oxidan materia orgánica y la transmiten a una superficie conductora (Lovley 2008).

La generación de electricidad a través de los microorganismos es una gran oportunidad ya que el sistema se auto sostiene: las bacterias se auto replican y los catalizadores para la reacción de oxidación de la materia orgánica son autosuficientes, por lo que no es necesario adicionar bacterias ni catalizadores.

Al realizar la electrogénesis, los microorganismos pueden interactuar tanto con el ánodo (electrodo-reductores) como con el cátodo (electrodo-oxidantes) de las MFC. Asimismo, el proceso se puede dar por diferentes mecanismos, a continuación se presentan los cuatro principales mecanismos de transferencia (Lovley, 2006):

- Transferencia indirecta de electrones a través de la interacción del producto metabólico reducido con el ánodo: Los productos son abióticamente reducidos en la superficie del ánodo entregándole electrones.
- Transferencia de electrones con mediadores artificiales: Este mecanismo requiere la continua adición de un mediador artificial al sistema, los cuales son capaces de recibir los electrones y atravesar membranas celulares hasta llegar a la superficie del electrodo.

- Transferencia de electrones mediadores auto-producidos: Los microorganismos, en algunos casos, producen sus propios mediadores para promover la transferencia extracelular de electrones.
- Transferencia directa de electrones hacia los electrodos: Este mecanismo implica que los electrones son directamente transferidos de la celda al electrodo a través de los citocromos tipo C de la membrana exterior.

Las reacciones microbianas pueden darse a diferentes rangos de temperatura según la tolerancia de los microorganismos. Las cuales van desde temperaturas ambiente (15-35 °C), a temperaturas altas (50-60 °C) toleradas por termófilas y temperaturas bajas (<15 °C) por psicrófilas.

Es importante destacar que en la MFC el electrodo no debe ser corrosivo, de manera que permita que los microorganismos se desarrollen y maduren. Cuando los microorganismos se encuentran en presencia de metales insolubles, las características de la superficie cambian en el tiempo y la química del medio se complica afectando las reacciones de oxidación y reducción.

2.2.2 Organismos electrogénicos

Los organismos electrogénicos, también conocidos como microorganismos electrónicamente activos, de respiración anódica o electrógenos (Logan 2009), son los organismos capaces de transferir electrones al ánodo en ausencia de mediadores redox artificiales (Lovley, 2006).

Los análisis de las comunidades en las MFC muestran que no hay un tipo único de microorganismo predominante en las comunidades que se desarrollan en el ánodo debido a que una gran variedad es capaz de producir electricidad, así como, a que hay un gran rango de condiciones operativas, diseños y electrodos para el sistema (Logan y Regan 2006); sin embargo, se han identificado grupos de microorganismos presentes en el medio de manera predominante que dependen del inóculo utilizado, del sustrato y del material del ánodo, principalmente (Cabezas *et al.*, 2015).

Cabe indicar que el género *Geobacter* es el dominante dentro de las comunidades microbianas (Esteve-Nuñez, 2008), sin embargo, también se ha podido determinar la predominancia de grupos de organismos tales como: *Gammaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Rhizobiales* y *Clostridia* en la superficie del ánodo (Lovley 2008). Asimismo, otros estudios han determinado que los organismos electrogénicos mayormente pertenecen a los géneros *Shewanella*, *Proteobacter*, *Pseudomonas*, *Firmicutes* and *Acidobacteria* (Deng *et al.*, 2012).

A pesar de que se han identificado muchos tipos de microorganismos que producen electricidad en las celdas de combustible microbianas, cuando estos se desarrollan como cultivo puro, la densidad energética producida es baja, sin embargo, se sabe que las mayores densidades energéticas son producidas al inocular al ánodo con una fuente rica y diversa de microorganismos como aguas residuales o lodos. En ese sentido, se ha comprobado que un cultivo variado y diverso produce 22 por ciento más densidad de energía que un cultivo puro de *Geobacter* (Logan, 2009). Es por ello que muchos MFC son inoculados usando aguas residuales no tratadas, lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas u otras fuentes.

2.2.3 Género *Geobacter*

La diversidad de microorganismos capaces de realizar actividad exoelectrogénica se sigue descubriendo, sin embargo, se ha obtenido abundante información acerca de dos bacterias: *Geobacter* y *Shewanella*. En el presente numeral se profundiza en el género *Geobacter*.

Geobacter es un tipo de proteobacterias anaeróbicas que habitan de forma natural en el subsuelo y son dominantes dentro de las comunidades microbianas electrogénicas que cuentan con un notable flujo exocelular, el cual se relaciona con la presencia de citocromos C (transportadores de electrones), ya que es el organismo secuenciado con mayor número de genes codificantes de estos. En ese sentido, el género *Geobacter* cuenta con una red de citocromos C multihemo que se distribuyen a través de la membrana interna, el periplasma y la membrana externa, donde los citocromos C más externos

descargan los electrones directamente al electrodo, de esta manera, esta red permite la transferencia de electrones a través de la célula para respirar sustratos.

Se ha comprobado que para el caso del género *Geobacter* la eficiencia coulombimétrica, (fracción de energía eléctrica que se puede generar a partir de un sustrato), supera un 90 por ciento (Esteve-Nuñez, 2008). Sin embargo, se ha determinado que al operar una MFC de una sola cámara y cátodo aéreo con baja resistencia interna, se obtiene 22 por ciento más de energía (576 mW/m^2) al utilizar un cultivo mixto de microorganismos, mientras que al usar un cultivo puro de *Geobacter sulfurreducens* se obtiene 461 mW/m^2 (Logan, 2009).

2.3 Fotosíntesis y rizodeposición

2.3.1 Fotosíntesis y respiración

La fotosíntesis es un proceso físico-químico mediante el cual, las plantas, algas y algunas bacterias utilizan energía lumínica para convertir CO_2 y H_2O en azúcares, en ese sentido, este proceso consta de dos grupos de reacciones: las lumínicas y el ciclo de Calvin, a partir de los cuales se obtienen azúcares de tres carbonos simples que luego forman moléculas más complejas, tales como la glucosa.

El proceso de fotosíntesis se encarga de producir los alimentos, de los cuales los organismos extraen energía mediante el proceso de respiración, dicho proceso consiste en romper las moléculas orgánicas en presencia de oxígeno y convertir la energía almacenada en Adenosín trifosfato (ATP).

Cada proceso (fotosíntesis y respiración) depende de los productos resultantes del otro: la fotosíntesis utiliza el CO_2 y agua para elaborar azúcares y O_2 , mientras que la respiración utiliza los azúcares y O_2 producidos para generar CO_2 , agua y ATP (Nabors, 2006).

2.3.2 Microorganismos en el suelo

El suelo es el hábitat ideal para el desarrollo de los microorganismos, donde cada tipo de organismo realiza una función específica, siendo sus principales roles la transformación de materia orgánica, la solubilización de minerales y la fijación de nitrógeno. Además, contiene una amplia variedad de formas biológicas y tamaños diversos. El grupo de los microorganismos incluye a los organismos individualmente invisibles para el ojo humano, sin embargo, este tamaño mínimo es compensado por su concentrada presencia en el medio. Dentro de este grupo se encuentran las bacterias, actinomicetos, hongos, algas y protozoos.

Las bacterias son los organismos más numerosos del suelo y son los que presentan mayor diversidad en su fisiología. Su identificación es difícil por lo que no se puede afirmar con absoluta certeza que todos han sido caracterizados.

La alimentación de los microorganismos se da para realizar sus procesos de catabolismo y anabolismo. Dependiendo del suministro de energía se pueden dividir en cuatro tipos: quimioheterótrofos, fotoheterótrofos, fotoautótrofos y quimioautótrofos. En el caso de las celdas de combustible microbianas, es indispensable la presencia de los organismos quimioheterótrofos, que necesitan nutrientes orgánicos preelaborados, como la glucosa. Las exigencias de alimentación de estos microorganismos son de variados tipos, los microorganismos no especializados, como las *Pseudomonas* sp., (ampliamente conocidas en la investigación de MFC) pueden obtener toda la energía de azúcares simples y producir sus requerimientos a partir de ellos, por lo cual tienen una gran capacidad de síntesis (Wild, 1992).

En la presente investigación, es trascendental la liberación de energía contenida en los sustratos orgánicos ya que esta provee de electrones al sistema de las MFC. Los microorganismos heterótrofos obtienen la energía de la oxidación enzimática de moléculas orgánicas. Dentro de ellos, se encuentran los organismos aerobios y anaerobios. Los aerobios estrictos deben de disponer de oxígeno para vivir, mientras que los anaerobios, que principalmente son bacterias, se desarrollan en ausencia de oxígeno,

y de estar presente dicho elemento podría destruirlos. Sin embargo, existe una amplia diversidad de bacterias que tienen la característica de poder desarrollarse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno.

En función de las condiciones en las que los microorganismos se desarrollan pueden utilizar tres mecanismos para liberar energía de los sustratos orgánicos:

- Respiración aerobia: Este mecanismo es utilizado por los aerobios estrictos y anaerobios facultativos. Consiste en reacciones de oxidación, donde los electrones se trasladan a través de los citocromos (transportadores), hasta llegar al oxígeno que actúa como aceptor terminal de electrones. El paso de electrones resulta en la formación final de adenosín trifosfato (ATP), que luego se utiliza para procesos metabólicos (Wild, 1992).
- Condiciones anaeróbicas: Este mecanismo se da cuando el oxígeno no está disponible como aceptor terminal de electrones. En este caso, otros compuestos funcionan como aceptores alternativos (nitratos, sulfatos, etc.). El proceso es el mismo que la respiración aerobia y solo se distinguen en el aceptor final de electrones. Sin embargo, este mecanismo es menos eficaz ya que produce menos energía que el primero debido a que existe una menor diferencia de potencial redox entre el sustrato y el aceptor de electrones (Wild, 1992).
- Fermentación: Este mecanismo es utilizado por las bacterias anaerobias estrictas, facultativas y por las levaduras. Se diferencia de los otros mecanismos en que no necesita ningún aceptor final de electrones inorgánico. Se requiere un sustrato orgánico tanto como para la oxidación de la misma y como aceptor. Este mecanismo también es menos eficaz que la respiración anaerobia en términos energéticos (Wild, 1992).

2.3.3 Rizósfera

La rizósfera es la zona del suelo que rodea a la raíz de la planta, donde la biología y química del suelo son influenciadas por la raíz, que mide normalmente pocos milímetros (1-5 mm), dependiendo de la especie de planta, tipo de suelo y humedad, siendo la zona más dinámica de todo el suelo.

En la formación de la rizósfera se conocen factores que tienen un papel importante, dentro de los cuales, se encuentran principalmente los materiales orgánicos exudados por la planta, los desprendimientos de las células muertas de raíces y los lisados de las células de la planta (Kuzyakov, 2002).

En el ambiente de la rizósfera se dan interacciones importantes entre la planta, el suelo y la microfauna: los microorganismos compiten por agua, nutrientes y espacio, y al mismo tiempo brindan nutrientes a las plantas.

La rizósfera generalmente cuenta con comunidades bacterianas que son menos diversas y de mayor tamaño que las asociadas al suelo libre de raíces, por lo que la actividad microbiológica alrededor de las raíces es 10 veces mayor a la actividad en el resto del suelo (Helder, 2012). Cabe señalar que los exudados, principal componente de los rizodepósitos, son un determinante clave en la estructura de la comunidad microbiológica de la rizósfera (Dennis *et al.*, 2010).

2.3.4 Rizodeposición

Durante el desarrollo de las plantas, sus raíces liberan compuestos orgánicos (rizodepósitos) al medio que las rodea mediante la rizodeposición. La importancia ecológica de este proceso radica en que los rizodepósitos representan una pérdida de carbono reducido de la planta, asimismo son un flujo de ingreso de carbono orgánico al suelo y un combustible para la microflora del suelo (Nguyen, 2003).

En el proceso de respiración la planta no degrada toda la materia orgánica producida en la fotosíntesis, hasta un 70 por ciento de la materia orgánica no se utiliza y llega al suelo a través de sus raíces como un desecho (Helder, 2012), dicho proceso de liberación de materia orgánica en el suelo se denomina rizodeposición. Se ha estimado que la liberación de compuestos a través de la raíz puede equivaler desde 0.6 a 27 por ciento del peso seco de la planta (Nguyen, 2003).

En ese sentido, el sistema de raíces de la planta libera diferentes tipos de compuestos orgánicos al suelo llamados rizodepósitos, los cuales incluyen exudados (azúcares, ácidos orgánicos), secreciones (polisacáridos y enzimas), lisados y gases. Cabe señalar que la cantidad de materia orgánica que llega a las raíces depende de la especie y edad de la planta, así como de las condiciones ambientales (luz y temperatura) (Deng *et al.*, 2012). Los rizodepósitos cumplen muchas funciones en la rizósfera, por ejemplo, participan en la movilización de los nutrientes catiónicos para la absorción de la planta, así como contienen carbono, el cual es metabolizado fácilmente por los microorganismos de la rizósfera (Strik *et al.*, 2012).

La rizodeposición ocurre de manera no uniforme en diferentes partes de la raíz y estos rizodepósitos cuentan con una alta rotación, de manera que es difícil determinar la proporción en que ocurren los procesos que atribuyen materia orgánica al suelo y mucho más complejo determinar la distribución espacial de los rizodepósitos. Asimismo, las raíces también liberan otros componentes que pueden ser determinantes para el funcionamiento del sistema, tales como los protones y oxígeno, siendo el segundo elemento que interfiere en el proceso ya que limita la cantidad de electrones que pueden ser transportados por el circuito eléctrico.

2.4 Maíz

Las principales alternativas para la aplicación de las PMFC son las plantas que pueden crecer con sus raíces sumergidas en agua para evadir la intrusión del oxígeno en el ánodo (Helder, 2012), sin embargo, para el desarrollo de esta investigación se ha optado por utilizar una planta que se desarrolle en suelo. En base a pruebas realizadas con distintas

plantas se determinó el uso de maíz de especie nombre *Zea mays* L. como ideal ya que tuvo mejores resultados en cantidad de energía generada y en estabilidad de la misma.

El cultivo del maíz ha sido uno de las principales plantas estudiadas dentro del grupo de las plantas anuales (planta que completa su ciclo de vida en aproximadamente un año) Por ello, se cuenta con información acerca de la rizodeposición del maíz según tipo de rizodépósito. Por ejemplo, este cultivo libera 0.24 $\mu\text{g C/cm}$ de raíz/hora de exudados (Nguyen, 2003). Asimismo, se han realizado investigaciones a lo largo de amplios periodos de tiempo (mayores a 23 años de cultivos) que muestran cuanto del carbono orgánico del suelo es contribución del carbono depositado por el maíz, encontrándose la contribución anual entre 0.08 y 1.91 por ciento de carbono de maíz del carbono orgánico total (Kuzyakov y Schneckenberger, 2004).

El maíz (*Zea mays* L.) tiene como propiedades principales:

- El maíz es una planta de cultivo popular mundial, de alta adaptabilidad a diferentes climas y condiciones, que se caracteriza por ser una gramínea anual, monocotiledónea, robusta, de 1 a 4 metros de altura, de un solo tallo dominante y de metabolismo fotosintético C4.
- La temperatura es el factor principal en el desarrollo del maíz; siendo la óptima para este cultivo entre 30 y 34 grados para tierras bajas y de media altitud, y 21 para maíces tropicales de tierras altas.
- Con relación al riego, es necesario mantener la disponibilidad de agua según el requerimiento de la planta, en ese sentido, el uso de agua está en función al desarrollo fenológico de la planta y se correlaciona a otras variables muy importantes como la capacidad de campo, evapotranspiración y temperatura. Es importante señalar, que las etapas críticas donde la falta de agua puede afectar el desarrollo son: en el inicio del cultivo, en floración y en llenado de grano.
- El cultivo de maíz se desarrolla bajo diferentes condiciones de suelo, donde la mayor dificultad se encuentra en los suelos excesivamente pesados (arcillosos) así

como en los muy sueltos (arenosos), mientras que las mejores condiciones se dan en suelos que presenten características como textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con elevada capacidad de retención de agua, por lo que el maíz crece correctamente en los suelos que presentan pH de 5,5 a 8 (Lafitte y Edmeades, 1994).

- Toda variedad de maíz sigue los mismos patrones de desarrollo, es así que en la escala fenológica del ciclo del cultivo del maíz se distinguen dos etapas: la vegetativa y la reproductiva; en la etapa vegetativa (V) se denominan subdivisiones de crecimiento que hacen referencia al número de hojas totalmente expandidas; mientras que la etapa reproductiva (R) se cuenta con subdivisiones numéricas que hacen referencia a diferentes momentos de llenado del grano del maíz (Ritchie y Hanway, 1982). A pesar de que este sistema es preciso para identificar las etapas de crecimiento de las plantas de maíz, no todas estarán al mismo tiempo en la etapa de desarrollo.

2.5 Generación eléctrica de PMFC

2.5.1 Circuitos eléctricos

Los circuitos eléctricos son un conjunto de elementos que unidos entre sí permiten establecer una corriente entre dos puntos o polos (ánodo y cátodo). Todo circuito cuenta con al menos los siguientes elementos: generador, receptor y conductores. Los circuitos pueden ser conectados en dos configuraciones (serie y paralelo). Al ser conectados en serie la misma corriente fluye por todos los elementos y las resistencias de los mismos se suman, mientras que al ser conectados en paralelo el mismo voltaje actúa en cada elemento y la resistencia disminuye. Sobre ello, se definen los siguientes tipos de circuitos:

a. Circuito eléctrico abierto

El circuito eléctrico abierto consiste en que ambos polos de la fuente (ánodo y cátodo) permanecen separados. A este tipo de circuito corresponde el voltaje en

circuito abierto (VCA) que es el máximo voltaje teórico que puede alcanzar una celda.

b. Cortocircuito

El cortocircuito ocurre cuando ambos polos de la celda se conectan directamente. A este tipo de circuito corresponde el máximo valor teórico de intensidad eléctrica de la celda.

c. Circuito eléctrico cerrado

El circuito eléctrico cerrado consiste en que ambos polos de la fuente (ánodo y cátodo) se unen mediante la incorporación de un dispositivo. A este tipo de circuito corresponde el comúnmente llamado voltaje y es el manejado para cualquier trabajo eléctrico.

2.5.2 Voltaje e intensidad eléctrica

El voltaje está en función de la resistencia externa o carga del circuito, y de la intensidad eléctrica, cuya relación se establece en la Ley de Ohm (Ecuación 6) (Logan, 2008).

$$V = R * I \qquad \text{(Ecuación 6)}$$

Dónde: V es el voltaje de la PMFC (voltios), R la resistencia externa (ohmios) e I la intensidad de corriente (amperios).

La producción de intensidad eléctrica de una MFC es pequeña, por lo que no suele medirse a escala de laboratorio y se calcula a través de la Ley de Ohm (Ecuación 6) al usar una resistencia externa.

Las MFC suelen alcanzar un voltaje de operación máximo de 0.3-0.7 voltios, donde el más alto voltaje producido corresponde al voltaje de circuito abierto (VCA), el cual se mide cuando el circuito se encuentra desconectado (Logan, 2007).

2.5.3 Potencia eléctrica y densidad de potencia

a. Potencia eléctrica

Para que las MFC tengan utilidad como un método para generar energía es necesario conocer y optimizar su producción a través de la potencia eléctrica. Dicha potencia es calculada a partir del voltaje y la intensidad eléctrica según la Ecuación 7. Sin embargo, conocer la cantidad de energía generada por la MFC no es suficiente para describir que tan eficientemente esta es generada por el sistema ya que la cantidad de área superficial disponible en el ánodo para los microorganismos puede afectar la cantidad de energía generada, en ese sentido, se suele normalizar la generación eléctrica por el área superficial del ánodo, lo que se conoce como densidad de potencia eléctrica. Este indicador sirve para comparar los materiales utilizados en el ánodo ayudando a determinar los materiales superiores para la construcción de MFC (Logan, 2008).

$$P = I * V \quad \text{(Ecuación 7)}$$

La energía que genera una MFC está limitada por el efecto de la resistencia interna del sistema y por el voltaje en circuito abierto. El valor de energía teórica máxima total producida basado en el voltaje en circuito abierto se obtiene a través de la Ecuación 8 (Logan, 2008).

$$P_{T,OCV} = \frac{OCV^2}{(R_{EXT} + R_{INT})} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Dónde: V es el voltaje de la PMFC (voltios), R_{ext} la resistencia externa (ohmios), R_{ext} la resistencia interna (ohmios), y OCV es el voltaje en circuito abierto (voltios)

b. Densidad de potencia

La densidad de potencia se refiere a la potencia por unidad de superficie. En el caso de las celdas de combustible microbianas, la densidad de potencia es un buen indicador de qué tan eficientemente es generada la energía en el sistema, independientemente del área superficial del electrodo utilizado que puede variar considerablemente según el modelo y material, ya que normaliza la generación eléctrica a una unidad de área (m²). Por ello, la densidad de potencia es considerado uno de los mejores indicadores para comparar la generación eléctrica

en W por m² entre varias aplicaciones de la PMFC. El área utilizada para calcular la densidad de potencia (Ecuación 9) puede ser tanto la del ánodo como la del cátodo, sin embargo, los investigadores utilizan principalmente el área del ánodo.

$$P_{An} = \frac{P}{A_{An}} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Dónde: *P* es la potencia en W y *A_{an}* es el área superficial del ánodo (m²)

2.6 Cobre: agente antimicrobiano

En el año 2008, el cobre fue reconocido por la American Environmental Protection Agency (EPA) como el primer agente metálico antimicrobiano (Vincent *et al.*, 2016). A través de los años los compuestos de cobre se han utilizado para fines de desinfección, incrementando actualmente el interés para utilizarlo con fines médicos.

Existen condiciones que potencian la propiedad antimicrobiana del cobre, las cuales se detallan a continuación:

- Temperatura y humedad: Bajo condiciones de alta temperatura y alta humedad se destaca la acción del cobre de muerte al contacto con las bacterias.
- Tipo de aplicación: Las condiciones secas tienen una efectividad antimicrobiana que demora unos minutos, mientras que en condiciones mojadas puede tomar varias horas.
- Concentración de cobre: La eficacia antimicrobiana del cobre es más grande a un 55 por ciento de pureza del metal.
- Tipo de contacto: La liberación de iones de cobre de la superficie es un elemento clave en el proceso de eliminación de bacterias. Aun cuando la superficie es cubierta por polímeros para prevenir el contacto directo con los microorganismos, no se reduce la liberación de los iones de cobre.

Existen otros factores que determinan la capacidad antimicrobiana, tales como la forma de presentación del cobre, el método de preparación y el ambiente químico. Es así que hay varias condiciones que promueven las propiedades antimicrobianas del cobre las cuales deben ser tomadas en consideración al momento de utilizar este material en sus diversas aplicaciones (Vincent *et al.*, 2016).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de ejecución

Esta investigación fue realizada en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en las inmediaciones de la Av. La Molina, detrás del laboratorio Marino Tabusso. En la Figura 6 se puede observar la ubicación.



Figura 6: Lugar de ejecución del experimento.

FUENTE: Google Earth.

3.2 Materiales

3.2.1 Insumos

- 4 sacos de 15 kg de suelo preparado (50 por ciento de musgo, 30 por ciento de compost, 20 por ciento de suelo de chacra).
- Semillas de Maíz Experimental 05 (Programa de Maíz- UNALM).
- Macetas transparentes (Altura: 20 cm, diámetro: 22 cm).
- Cable de cobre recubierto 2x22 AWG (Color verde y rojo).
- Alcayatas de Acero (3.7 mm x 5.08 cm).
- Bloques de grafito (4 cm x 5 cm x 5 mm).
- Resistencias eléctricas de (1000 ohmios).
- Cautín eléctrico.
- Estaño.
- Pasta para soldar.
- Borneras.
- Cinta aislante.
- Pala.
- Regla.
- Tijeras.
- Desentornilladores.
- Agua para riego.
- Vaso de precipitado (500 ml, 1000 ml).
- Probeta de 500 ml.
- Tamizador (1 mm).
- Bolsas ziplok (27 cm x 28 cm).

3.2.2 Equipos

- Multímetro digital FLUKE Modelo 179.
- Multímetro analógico KAMASA (Modelo YX-360TRn).
- Termómetro de suelo TEL-TRU.

- Termómetro ambiental MONARCH 315.

3.3 Unidad experimental

La unidad experimental consiste en una celda de combustible planta- microbiana (PMFC): maceta con una planta de maíz, cuyo medio de crecimiento es suelo preparado, que contiene un ánodo y un cátodo.

3.4 Métodos

3.4.1 Preparación de la celda de combustible planta-microbiana (PMFC)

a. Celda de combustible planta-microbiana

Se construyeron 6 muestras para la evaluación horaria de la generación eléctrica y 6 muestras para ser puestas en cada maceta (M1, M3, M4, M5, M9, M12) para la evaluación de la generación eléctrica en un periodo prolongado (46 días), considerando los siguientes pasos:

- Se homogenizó 50 kilogramos de la misma. Posteriormente, se colocó 3.5 kilogramos de suelo preparado por maceta (Figura 7).



Figura 7: Macetas con suelo preparado previamente homogenizado.

FUENTE: Elaboración propia

- Se colocaron los electrodos (ánodo y cátodo) en la maceta. En la Figura 8 se presenta el esquema del montaje (sección transversal), encontrándose el cátodo en la superficie y el ánodo totalmente cubierto y rodeado por el suelo.

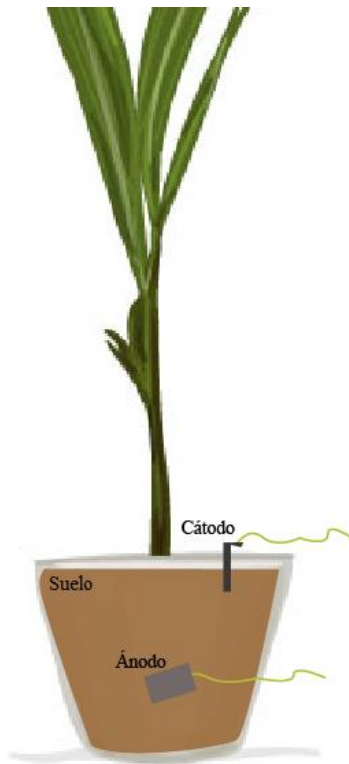


Figura 8: Configuración de los electrodos en la PMFC

FUENTE: Elaboración propia

Como ánodo se utilizó un bloque de grafito (4 cm x 5 cm x 5mm) que se ubicó a 5 cm desde la base. El grafito se acopló a un cable de cobre recubierto (color rojo) de 30 cm de largo mediante cinta aislante antes de ser colocado en el sistema, como se puede observar en la Figura 9.

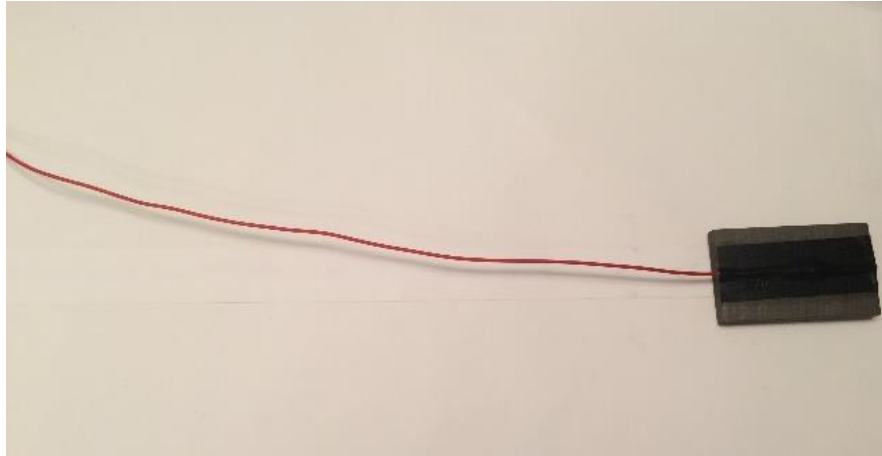


Figura 9: Ánodo acoplado al cable de cobre.

FUENTE: Elaboración propia

Como cátodo se utilizó una alcañata de acero que se ubicó en posición vertical en la superficie del suelo de manera que la parte plana superior de la misma quedó expuesta al aire libre. La alcañata se soldó a un cable de cobre recubierto (color verde) de 15 cm de largo, como se puede observar en la Figura 10.



Figura 10: Cátodo acoplado al cable de cobre.

FUENTE: Elaboración propia

- Se acopló una resistencia externa de 1000 ohmios a cada cable de cobre proveniente del ánodo. Se acoplaron borneras a los cables de cobre y a las resistencias para facilitar las mediciones y evitar errores (Ver Figura 11).



Figura 11: Acoplamiento de las borneras a las macetas.

FUENTE: Elaboración propia

b. Cultivo de plantas

Para el crecimiento de las plantas de maíz se utilizó suelo preparado cuyas proporciones en peso son: 50 por ciento de musgo, 30 por ciento de compost y 20 por ciento de suelo de chacra, y se realizaron los siguientes pasos:

- Se desgranaron y mezclaron semillas de diferentes mazorcas de maíz experimental 05 (*Zea mays* L.), y aleatoriamente, se seleccionaron las semillas para la siembra (Figura 12).



Figura 12: Desengranamiento de las mazorcas y selección de las semillas de maíz.

FUENTE: Elaboración propia

- Las semillas fueron colocadas en grupos de tres a una profundidad de 5 centímetros el día 13 de enero del 2017 (Figura 13).



Figura 13: Siembra de las semillas de maíz.

FUENTE: Elaboración propia

3.4.2 Operación de la PMFC

a. Operación para evaluación horaria y estacional

Se construyeron 6 muestras de celdas de combustible microbianas (según las especificaciones del numeral 3.4.2): tres de ellas con una planta sembrada PMFC y tres MFC. Se tomaron mediciones del voltaje en circuito abierto (VCA) con el multímetro, así como de la temperatura ambiental y de la radiación solar con el termómetro ambiental y el multímetro, respectivamente. Las fechas evaluadas y horarios son mostrados en la Tabla 1.

- Evaluación horaria

Para esta evaluación se observó el comportamiento horario del VCA, así como de los parámetros del entorno (temperatura ambiental y radiación solar), considerando la muestra de PMFC y MFC.

- Evaluación estacional

Para esta evaluación se consideraron las muestras PMFC para establecer las diferencias principales entre las estaciones climáticas (invierno, primavera y

verano) considerando un día de cada estación climática según la Tabla 1.

Tabla 1: Fecha y horario de experimentación por estación climática

Estación	Fecha de inicio	Fecha de término	Frecuencia de medición	Periodo de tiempo
Invierno	15/09/2016	16/09/2016	Horaria	9 am - 8 am
Primavera	3/11/2016	4/11/2016	Horaria	9 am - 8 am
Verano	3/01/2017	4/01/2017	Horaria	9 am - 8 am

FUENTE: Elaboración Propia.

b. Operación para evaluación diaria

El periodo de operación de las 6 muestras se inició cuando germinaron las semillas, el 20 de enero, y finalizó el 13 de marzo del 2017; durante este periodo de 46 días se mantuvo el experimento a condiciones ambientales. En la Figura 14 se presentan algunas muestras en el periodo de operación.

Al inicio del experimento se determinó el equivalente de humedad y su correspondiente porcentaje a capacidad de campo (8.8 por ciento), y a fin de que la humedad sea constante y no interfiera en los resultados, se pesaron las macetas diariamente aportando el agua necesaria para mantener el peso inicial de 3.5 kilogramos de suelo.

En cada muestra se evaluó el comportamiento de la generación eléctrica mediante la medición de los parámetros eléctricos (VCA, voltaje e intensidad en circuito cerrado e intensidad de corto circuito) ante las condiciones del entorno (temperatura del medio, temperatura del ambiente y radiación solar) realizando mediciones manuales los días lunes, miércoles y viernes a las 8:30 am; asimismo, se determinaron las características principales del suelo al inicio y al final del experimento.

Los riegos se realizaban a partir de las 5 pm para reducir el índice de evapotranspiración y asegurar que el suelo absorba la mayor cantidad de agua

antes de que esta se pierda al ambiente.

Se hizo una inspección manual diaria para prevenir plagas y no se efectuó ningún tipo de abonado o fertilización



Figura 14: Muestras de la PMFC en periodo de operación.

FUENTE: Elaboración propia

3.4.3 Evaluación de parámetros

Según el tipo de evaluación se consideraron:

a. Evaluación de condiciones del entorno y desempeño eléctrico

- Parámetros del entorno

Los parámetros del entorno considerados fueron la temperatura del suelo, la temperatura ambiental y la radiación solar, los cuales fueron evaluados de la siguiente manera: la temperatura del suelo fue medida “in situ” mediante un termómetro (°C) y, para los parámetros de temperatura ambiental (°C) y radiación solar (Watt/m^2), se utilizó un termómetro ambiental y un solarímetro, respectivamente. Asimismo, para la evaluación diaria se consideraron los datos horarios de la Estación Meteorológica Von Humboldt, ubicada en el campus de la UNALM.

– Parámetros de generación eléctrica

La evaluación de la generación de electricidad se dio a través de mediciones de los parámetros eléctricos de voltaje e intensidad de corriente utilizando multímetros convencionales, en ese sentido, para las mediciones de voltaje se utilizó un multímetro digital, mientras que para las mediciones de intensidad eléctrica se utilizó un multímetro analógico.

Los parámetros eléctricos se midieron en las siguientes configuraciones: circuito eléctrico abierto, circuito eléctrico cerrado y en cortocircuito, este último solo empleado para intensidad de corriente eléctrica, los cuales se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Medición de parámetros de generación eléctrica.

Parámetros	Método	Frecuencia	Unidad
Voltaje en circuito abierto (VCA)	Multímetro digital	Interdiario	Voltios (v)
Intensidad de corriente (Cortocircuito)	Multímetro analógico	Interdiario	Miliamperios (mA)
Voltaje en resistencia (Circuito cerrado)	Multímetro digital	Interdiario	Voltios (v)
Intensidad de corriente (Circuito cerrado)	Multímetro analógico	Interdiario	Miliamperios (mA)

FUENTE: Elaboración Propia.

El circuito eléctrico abierto consiste en que ambos polos de la fuente (ánodo y cátodo) permanecen separados, por lo cual para este experimento se midió el voltaje en circuito abierto colocando las terminales del multímetro en ambos polos (Figura 15).

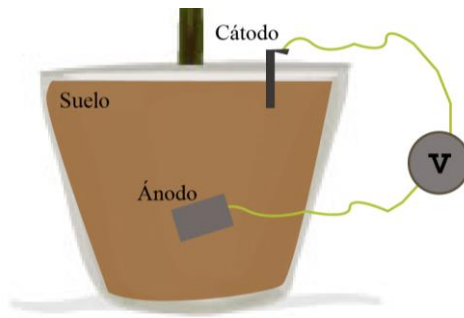


Figura 15: Configuración para la medición del voltaje en circuito abierto.

FUENTE: Elaboración propia

El cortocircuito ocurre cuando ambos polos de la celda se conectan directamente, por lo cual para este experimento se midió la intensidad de corriente eléctrica conectando las terminales del multímetro en ambos polos (Figura 16).

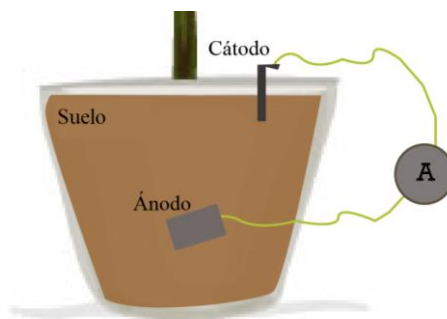


Figura 16: Configuración para la medición de la intensidad en corto circuito.

FUENTE: Elaboración propia

El circuito eléctrico cerrado consiste en que ambos polos de la fuente (ánodo y cátodo) se unen mediante la incorporación de un dispositivo, por lo cual para este experimento se utilizó una resistencia eléctrica de 1000 ohmios, así como, se acoplo al circuito el amperímetro para la medición de intensidad de corriente y el voltímetro para medición de voltaje (Figura 17).

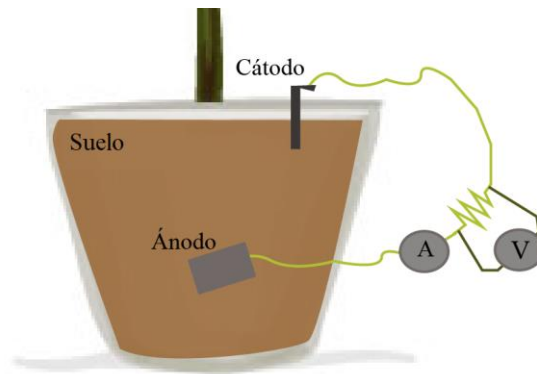


Figura 17: Configuración para la medición de parámetros en circuito cerrado.

FUENTE: Elaboración propia

b. Crecimiento de la planta

Con la finalidad de relacionar el crecimiento de la planta con la generación eléctrica se registró el crecimiento de las plantas de maíz de cada una de las muestras en función a los siguientes parámetros:

- Altura de nudo

Se refiere a la distancia en centímetros desde la superficie del suelo hasta el primer nudo.

- Largo de hoja de mayor tamaño

Se refiere a la distancia en centímetros desde la zona de nacimiento hasta el término de la hoja más larga de la planta.

- Etapa de crecimiento

Se refiere a la etapa de crecimiento de la planta cuyo código se determina por el tipo de crecimiento de la planta (vegetativo o reproductivo) y por la cantidad de hojas que ha desarrollado (Ritchie y Hanway 1982).

c. Caracterización del suelo

Se analizaron las características principales del suelo al inicio y al final del experimento, las cuales se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros considerados en el análisis de caracterización de suelos.

Parámetro	Unidad	Método
pH		Suspensión y determinación potenciométrica
C.E	ds/m	Determinación por conductivimetría
Clase textural	-	Método AS-09: Procedimiento de Bouyoucos
Materia orgánica	%	Método AS-07: Método de Walkley y Black
Carbonato de calcio	%	Método AS-29: Método de neutralización ácida
P disponible	mg/kg	Método AS-11: Procedimiento de Olsen
K disponible	mg/kg	Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
CIC y bases intercambiables (Ca ⁺² , Mg ⁺² , Na ⁺ , K ⁺ , Al ⁺³)	meq/100g	Método AS-12 con acetato de amonio
Sulfato disponible	mg/kg	Determinación turbidimétrica
Calcio disponible	mg/kg	Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
Magnesio disponible	mg/kg	Método AS-12 con acetato de amonio
Zinc disponible	mg/kg	Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
Boro disponible	mg/kg	Método AS-15 con azometina-h
Cobre disponible	mg/kg	Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
Manganeso disponible	mg/kg	Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
Hierro disponible	mg/kg	Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
Carbono	%	Método de Walkley y Black

FUENTE: Elaboración Propia.

Para el análisis se prepararon muestras de 500 gramos de suelo homogéneo, las cuales fueron colocadas en bolsas ziplok y entregadas a los laboratorios CERPER y LASPAF (Tabla 4).

Tabla 4: Análisis de caracterización de suelo.

Análisis	Laboratorio	Detalle
Análisis de caracterización de suelo	Laboratorio CERPER	Los análisis se realizaron al inicio (un análisis) y al final del experimento (un análisis por cada muestra).
Análisis de carbono total	Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes (LASPAF)- UNALM	

FUENTE: Elaboración Propia.

3.4.4 Estimación de generación de energía eléctrica

a. Potencia eléctrica (W)

La potencia de las PMFC es el producto del voltaje y la intensidad de corriente, la cual se calculó en base a los resultados obtenidos en las muestras según la Ecuación 10.

$$P = I * V \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Dónde: P es la potencia (watts), I es la intensidad de corriente (amperios) y V el voltaje de la PMFC (voltios).

El voltaje corresponde al valor de la medición en circuito cerrado mientras que la corriente se calcula por la Ley de Ohm (Ecuación 11) (Logan *et al.*, 2006).

$$V = R * I \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Dónde: V es el voltaje de la PMFC (voltios), R la resistencia externa (ohmios) e I la intensidad de corriente (amperios).

b. Densidad de potencia eléctrica (W/m²)

A fin de que los resultados de este experimento sean comparables con otros estudios similares, la potencia se normalizó a las características del reactor a través del cálculo de la densidad de potencia, la cual se determinó en base al área del ánodo según la Ecuación 12, dividiendo la potencia calculada entre el área total del ánodo (Logan *et al.*, 2006).

$$DP = \frac{V^2}{A * R} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Dónde: *DP* es la densidad de potencia (W/m^2), *V* es el voltaje de la celda (voltios), *A* es el área del ánodo (m^2) y *R* es la resistencia externa (ohmios)

c. Energía total producida (Wh)

Se calculó el valor de la energía producida multiplicando el valor de la potencia eléctrica por el tiempo de funcionamiento considerando un periodo de 24 horas.

d. Potencia máxima

Se calculó la potencia máxima utilizando la Ecuación 13, considerando que la resistencia externa es equivalente a la interna y el valor promedio del VCA.

$$P_{max} = \frac{VCA^2 * R_{ext}}{(R_{int} + R_{ext})^2} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

Dónde: *Pmax* es la potencia máxima (watts), *VCA* es el voltaje en circuito abierto (voltios), *Rext* es la resistencia externa (ohmios) y *Rint* es la resistencia interna (ohmios) de la PFMC.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de la evaluación de la PMFC y los parámetros del entorno en relación al comportamiento horario (4.1), diario (4.2) y estacional (4.3) de la generación eléctrica para conocer las mejores condiciones de aprovechamiento de la tecnología PMFC. Luego, se estudian los efectos del sistema en el crecimiento de la planta (4.4) y en las características del suelo (4.5) para comprobar que la tecnología pueda utilizarse sin tener efectos negativos en su ambiente. Finalmente, habiendo comprobado el funcionamiento de la PMFC, se estimó la generación eléctrica para periodos prolongados de tiempo (4.6) y se propone una aplicación práctica al sistema (4.7).

4.1 Evaluación horaria de la generación eléctrica- VCA

En este numeral se evalúa el comportamiento horario del voltaje en circuito abierto (VCA) con la finalidad de identificar los horarios de mayor generación eléctrica (4.1.1), su relación con los parámetros del entorno (4.1.2), así como analizar la importancia de la presencia de una planta en el sistema (4.1.3).

4.1.1 Comportamiento horario del voltaje en circuito abierto

En el presente inciso se evalúa el comportamiento de la generación eléctrica en base a un parámetro eléctrico: el voltaje en circuito abierto (VCA). Las mediciones horarias del VCA realizadas durante 24 horas continuas se presentan de manera gráfica en la Figura 18 y en detalle en el Anexo 1.

De manera general, se observa que, para todos los días estudiados, el VCA cuenta con una tendencia característica de comportamiento en el tiempo, que inicia alcanzando su valor máximo (en promedio 0.99 v.) en la mañana, entre las 7 y 11 a.m., luego empieza a descender hasta llegar a un valor mínimo alrededor de la medianoche (en promedio 0.96 v.) y finalmente incrementa hasta el amanecer. Asimismo, se observó que en las primeras horas de la mañana se reportó una menor cantidad de valores extremos a comparación del resto del día.

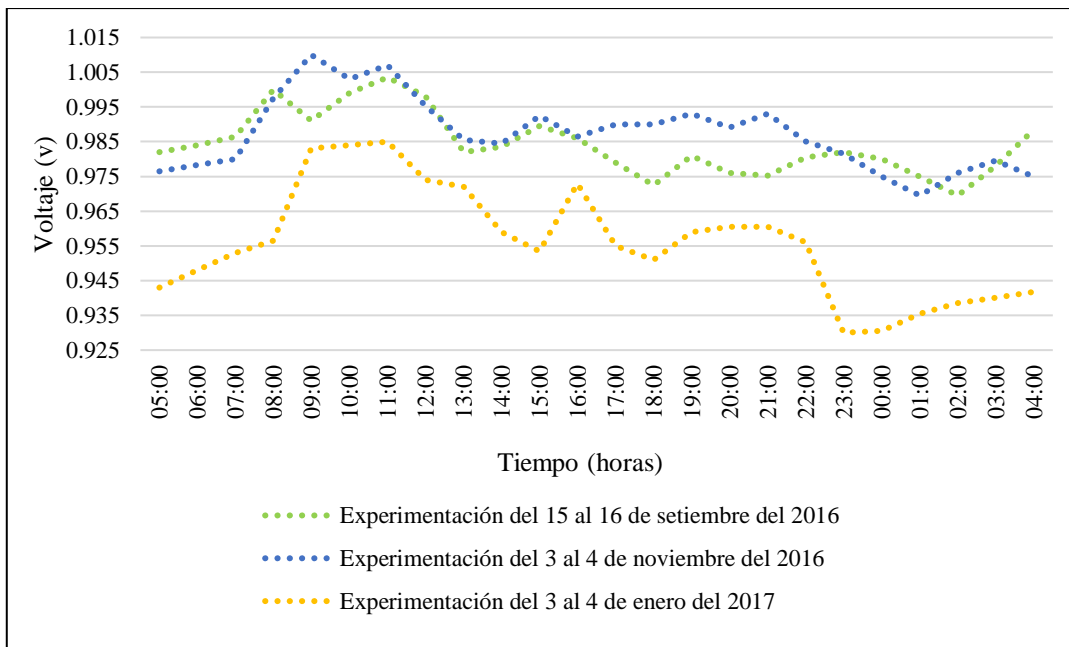


Figura 18: Medición horaria del VCA en tres fechas de experimentación

FUENTE: Elaboración Propia.

El comportamiento de la generación horaria de VCA es similar a lo encontrado por otros investigadores. Por ejemplo, (Liu *et al.*, 2013) encontró que el comportamiento del VCA se caracterizaba por tener oscilaciones en horas diurnas que iban desde valores de 0.58 voltios como mínimo llegando a 0.7 voltios como máximo, mientras que en la presente investigación el voltaje alcanzó un promedio de 0.976 voltios y un máximo promedio de 0.99 voltios, según se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5: Voltaje de circuito abierto correspondiente a las fechas de muestreo

Fechas	VCA máximo	VCA mínimo	VCA promedio
15 al 16 de setiembre del 2016	1.004	0.970	0.984
3 al 4 de noviembre del 2016	1.01	0.970	0.987
3 al 4 de enero del 2017	0.985	0.930	0.956

FUENTE: Elaboración Propia.

De igual manera, (Kaku *et al.*, 2008) estudió las tendencias horarias en generación eléctrica midiendo el voltaje en celdas con plantas de arroz, encontrando que el voltaje se incrementa durante el día hasta alcanzar un valor máximo de VCA de 0.701 voltios al mediodía y disminuye en la noche hasta valores mínimos de 0 voltios.

En ese sentido, al evaluar las muestras durante 24 horas se comprobó que la PMFC genera energía eléctrica de manera continua y que, en este funcionamiento permanente, el horario de la mañana (7 a.m. a 11 a.m) contó con los mayores valores de VCA, por ello, este horario fue utilizado para el experimento del inciso 4.2 que explora el comportamiento de la generación eléctrica en periodos más amplios.

4.1.2 Relación con los parámetros del entorno

Al evaluar el comportamiento del voltaje con respecto a los parámetros del entorno (temperatura ambiental y radiación solar), los cuales son presentados en el Anexo 1, se encontró relación únicamente con la presencia de la radiación solar.

a. Radiación solar

En las Figuras 19, 20 y 21 se representan simultáneamente los valores reportados de VCA y la radiación solar para cada fecha estudiada. Se puede destacar que en las horas nocturnas (sin luz solar) se registraron los menores valores de voltaje llegando hasta 0.3 voltios menos que lo reportado en las horas diurnas.

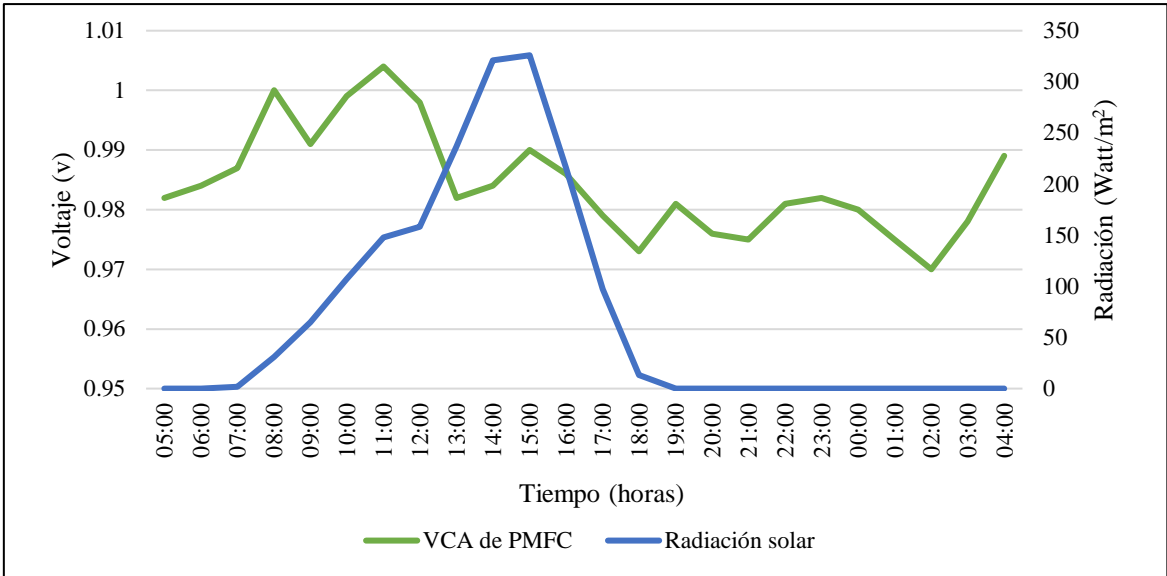


Figura 19: Medición horaria del VCA y de la radiación solar (15- 16 de setiembre).

FUENTE: Elaboración Propia.

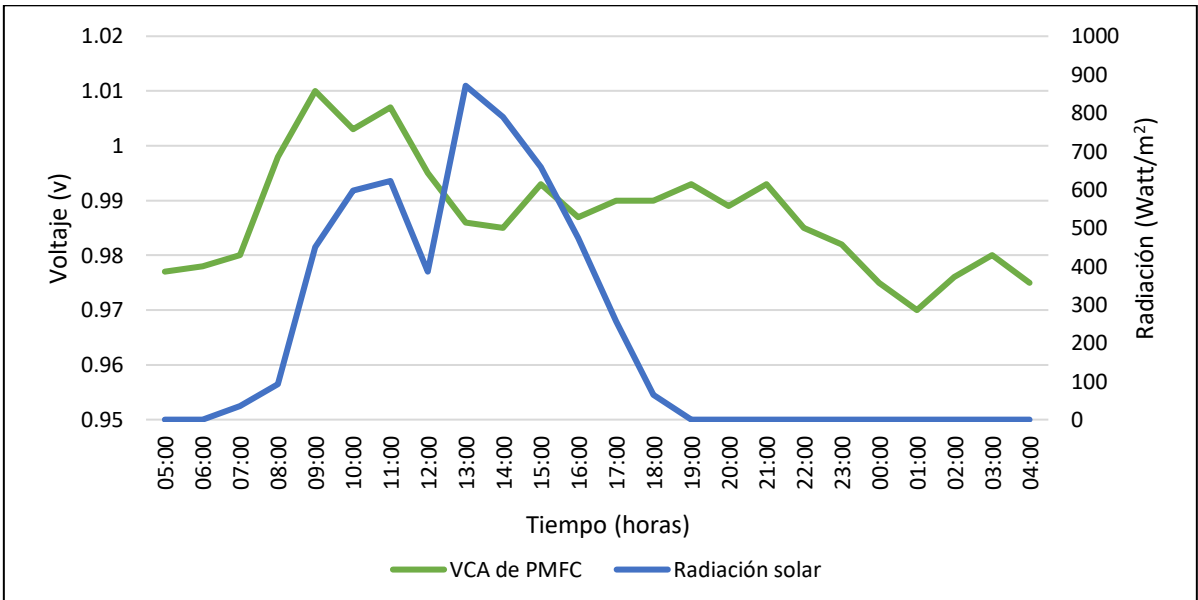


Figura 20: Medición horaria del VCA y de la radiación solar (3-4 de noviembre).

FUENTE: Elaboración Propia.

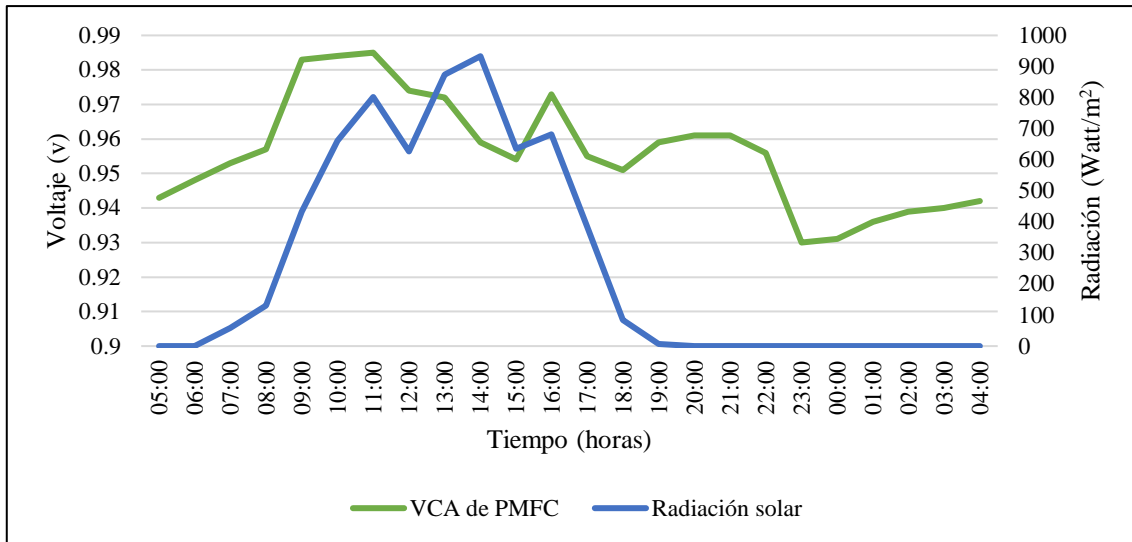


Figura 21: Medición horaria del VCA y de la radiación solar (3 al 4 de enero).

FUENTE: Elaboración Propia.

La mencionada característica del comportamiento del voltaje en horas nocturnas coincide con la investigación de (Liu *et al.*, 2013) y (Kaku *et al.*, 2008), ya que ambos atribuyen las fluctuaciones del voltaje a la radiación solar, los cuales resaltan que, teniendo una temperatura ambiental estable a lo largo del experimento, se dieron incrementos de voltaje al inicio del día y una notable disminución al terminar el día, formando oscilaciones en intervalos regulares de tiempo debido a la presencia de iluminación.

Asimismo, Moqsud *et al.* (2015) resaltó las diferencias en la generación eléctrica entre el día y la noche, observando que una vez que ya no hay luz solar el voltaje disminuye y se mantiene constante. Otros investigadores hacen énfasis en la influencia de la radiación solar al comparar la generación eléctrica en el día y en la noche, indicando que en las horas del día la generación eléctrica es mayor (Hubenova y Mitov, 2012).

En ese sentido, según los resultados presentados y lo hallado por otros investigadores, se estableció que la disminución de la generación eléctrica coincide con las horas nocturnas (sin radiación solar). Según ello, se encontró relevante que el sistema se encuentre al aire libre donde reciba radiación solar, así como priorizar las horas diurnas del día para obtener una mayor generación eléctrica o, en caso el sistema este acoplado a una batería, una mayor carga de batería.

b. Temperatura ambiental

En las Figuras 22, 23 y 24 se presentan de manera gráfica los valores horarios de VCA y de la temperatura ambiental, según lo observado no es posible establecer relación alguna entre ambos parámetros.

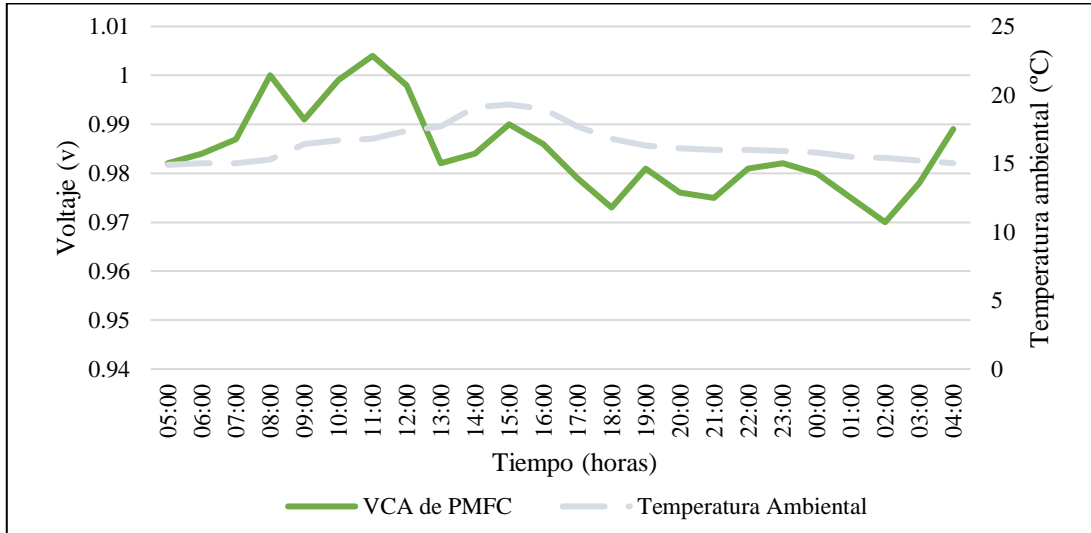


Figura 22: Medición horaria del VCA y temperatura ambiental (15-16 de setiembre).

FUENTE: Elaboración Propia.

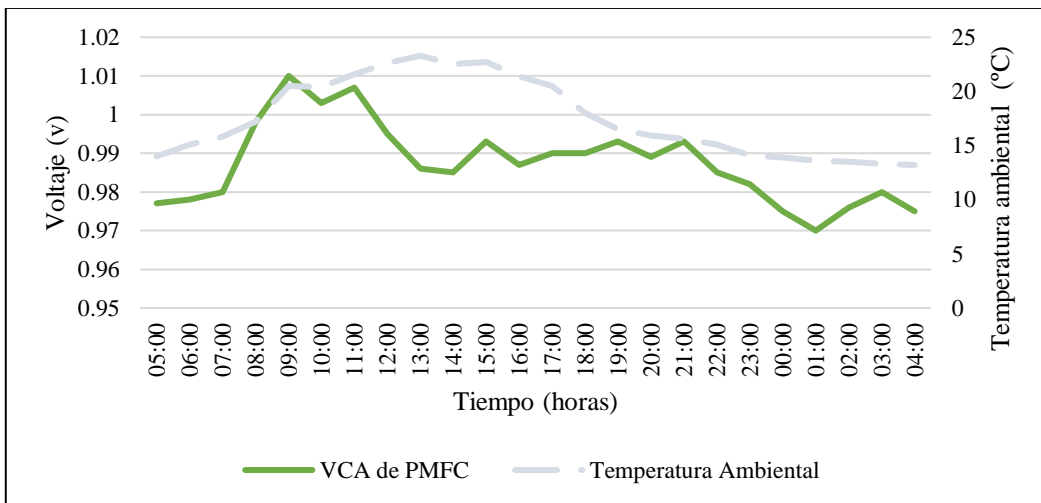


Figura 23: Medición horaria del VCA y temperatura ambiental (3-4 de noviembre).

FUENTE: Elaboración Propia.

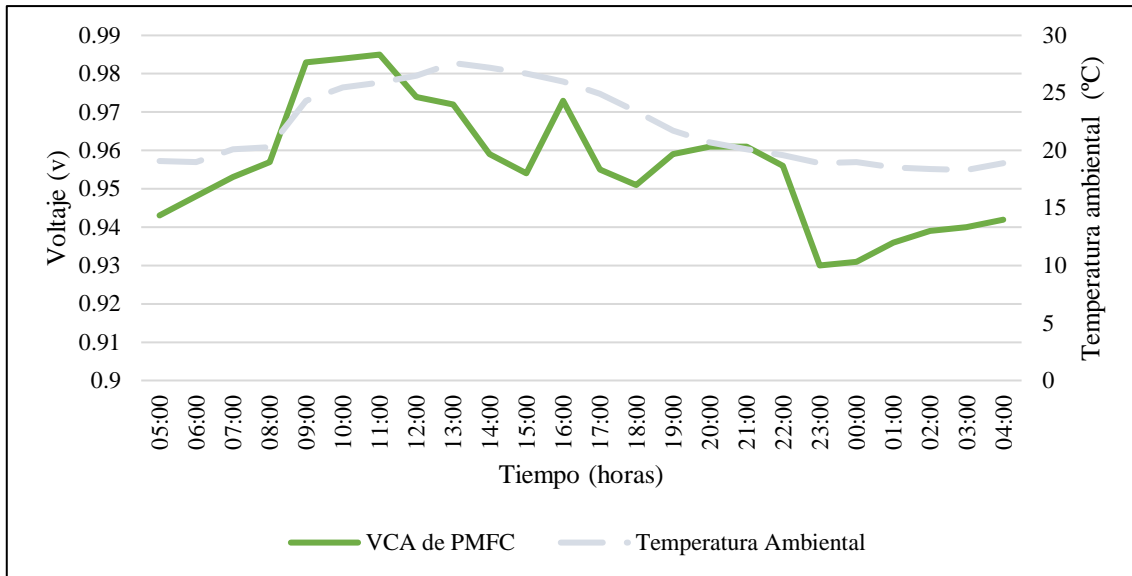


Figura 24: Medición horaria del VCA y de la temperatura ambiental (3-4 de enero).

FUENTE: Elaboración Propia.

4.1.3 Influencia de la planta en la PMFC

Con la finalidad de reconocer la importancia de la presencia de la planta en el sistema se registró, de manera paralela y bajo las mismas condiciones que la PMFC, la generación eléctrica de una MFC (sistema sin planta).

Los registros horarios de VCA de la PMFC y MFC se muestran simultáneamente en las Figuras 25 y 26, donde se observa que el VCA de la PMFC reportó valores mayores que la MFC en todas las horas medidas. Asimismo, las medidas resumen del VCA para ambas muestras, que se presentan en los las Tablas 6 y 7, confirman que la PMFC reporta un VCA mayor, encontrándose una diferencia de 0.34 voltios en promedio.

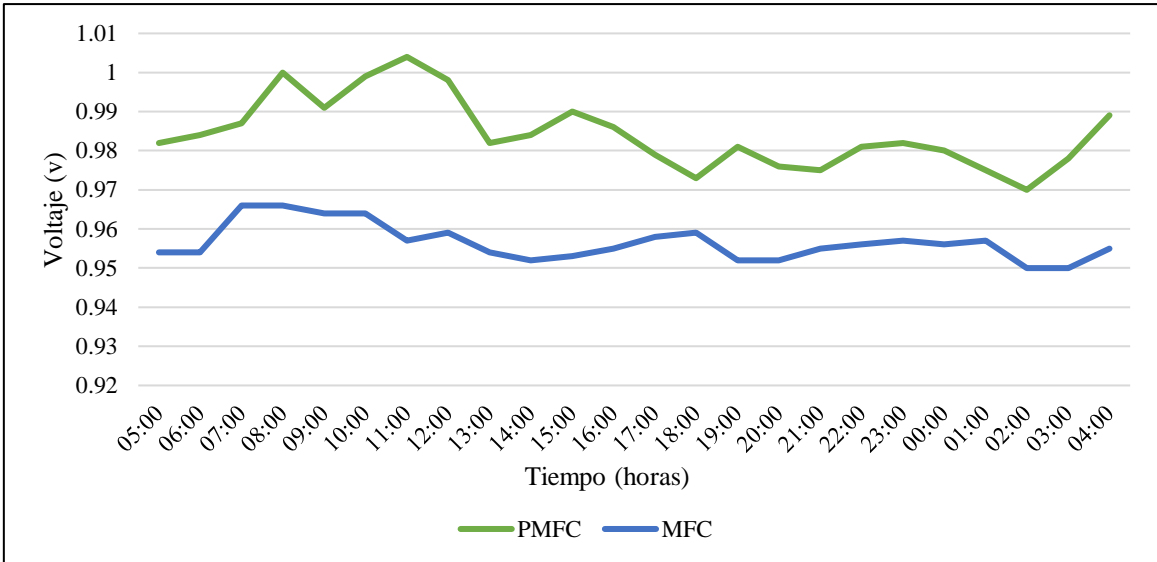


Figura 25: Medición horaria del VCA de la PMFC y MFC (15 -16 de setiembre).

FUENTE: Elaboración Propia.

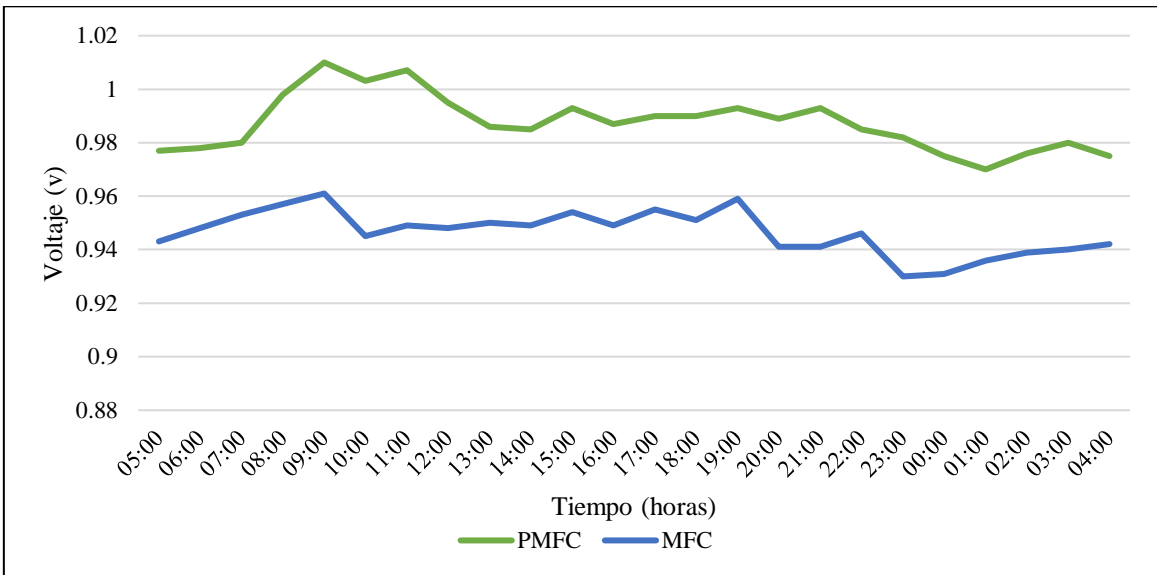


Figura 26: Medición horaria del VCA de la PMFC y MFC (3-4 de noviembre)

FUENTE: Elaboración Propia.

De manera semejante, (Liu *et al.*, 2013) encontró que para la MFC el valor promedio de VCA fue de 0.49 v, mientras que la muestra PMFC tuvo un promedio de 0.64 v. Cabe destacar que en la presente investigación ambos tipos de muestra alcanzaron valores promedio mayores: la PMFC tuvo un VCA promedio de 0.986 v y la MFC un promedio de 0.952 v.

Tabla 6: Voltaje de circuito abierto de muestra de PMFC

Fecha	VCA mínimo	VCA máximo	VCA Promedio
Del 15 al 16 de setiembre 2017	0.97	1.004	0.984
Del 3 al 4 de noviembre 2017	0.97	1.010	0.987

FUENTE: Elaboración Propia.

Tabla 7: Voltaje de circuito abierto de muestra MFC

Fecha	VCA mínimo	VCA máximo	VCA promedio
Del 15 al 16 de setiembre 2017	0.95	0.966	0.956
Del 3 al 4 de noviembre 2017	0.93	0.961	0.947

FUENTE: Elaboración Propia.

Por otro lado, una característica resaltante en los resultados es que el VCA de la MFC no presentó variaciones significativas a lo largo del tiempo ni un comportamiento característico, mientras que la PMFC sí presentó oscilaciones y variaciones significativas (Numeral 4.1.1), siendo esta característica la principal diferencia observada entre ambos. (Liu *et al.*, 2013) encontró características similares en su investigación: en sus resultados se se muestra una notoria diferencia entre los valores de voltaje de la PMFC y MFC, tanto en comportamiento como en cantidad de voltaje generado.

Dichas diferencias entre ambos tipos de muestra podrían atribuirse a la presencia de una planta en el sistema (PMFC), la cual influye en que se alcancen mayores valores de VCA y que el sistema cuente con un comportamiento horario característico. Según los resultados presentados y lo antes discutido, se resalta la importancia de la presencia de la planta en el sistema para alcanzar una mayor generación eléctrica.

4.2 Evaluación diaria de la generación eléctrica

El registro de los parámetros eléctricos de esta investigación muestra que la PMFC puede generar electricidad utilizando como sustrato al suelo y como catalizadores a las bacterias que están presentes de manera natural en el medio, observándose una clara tendencia en

el comportamiento horario del VCA. En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de la generación eléctrica de la PMFC en un periodo de 46 días, haciendo énfasis en el comportamiento diario de los parámetros de generación eléctrica (4.2.1), en su relación con los parámetros del entorno (4.2.2) y definiendo etapas características de generación eléctrica en el tiempo (4.2.3). Para ello, se registraron los parámetros eléctricos y del entorno de manera interdiaria (Ver Anexo 1).

4.2.1 Comportamiento diario de los parámetros de generación eléctrica

a. Voltaje en circuito abierto (VCA)

En la Figura 27 se muestran los valores registrados del VCA para cada una de las muestras en el tiempo de operación (del 20 de enero al 5 de marzo del 2017), donde se observa que existe una similitud en el comportamiento del VCA en todas las muestras: el voltaje inicia en un valor de 0.758 voltios en promedio, llegando hasta un valor máximo promedio de 1.067 voltios, luego disminuye hasta un promedio de 0.720 voltios, donde finalmente inicia una etapa en la cual el voltaje se mantiene estable.

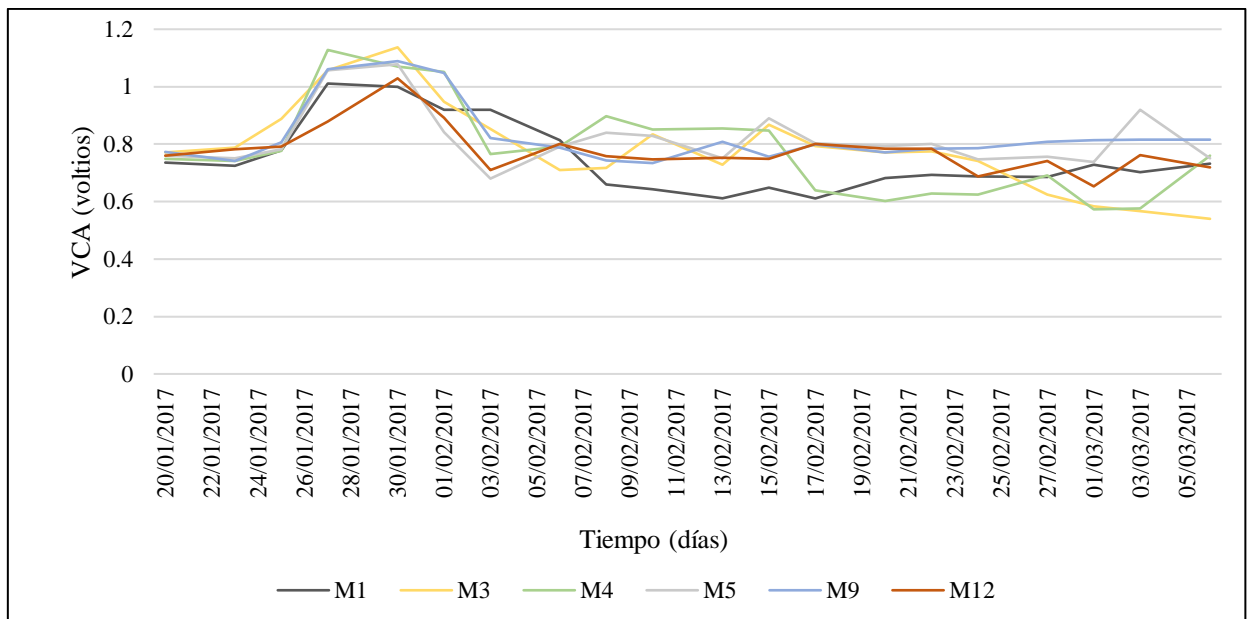


Figura 27: VCA registrado durante el tiempo de toma de datos.

FUENTE: Elaboración Propia.

Esta investigación ha registrado valores mayores a los encontrados en otras investigaciones similares en periodos largos de tiempo. Al respecto, se debe indicar que (Liu *et al.*, 2013) desarrolló una investigación en un periodo semejante de tiempo (40 días) utilizando la planta *Ipomoea aquatica* encontrando que el valor del voltaje iniciaba con un promedio de 0.52 voltios, alcanzando un valor máximo de 0.7 voltios a la mitad del tiempo evaluado y finalmente manteniéndose estable en este valor. De manera semejante, (Cervantes-Alcalá, 2012) desarrolló una investigación en condiciones naturales durante un periodo de 30 días, reportando valores iniciales de VCA de 0.300 voltios, que luego incrementaron hasta alcanzar 0.700 voltios.

En ese sentido, al registrar el VCA de las muestras durante un periodo de 46 días se comprobó que la PMFC genera energía eléctrica de manera continua, y que en este funcionamiento permanente el VCA describe un comportamiento característico en el tiempo, el cual es descrito a detalle en el numeral 4.2.3.

b. Voltaje en circuito cerrado

En el caso del voltaje en circuito cerrado, mostrado en la Figura 28, se alcanzó un valor pico de 0.402 voltios y un promedio de 0.200 voltios, sin embargo, todas las muestras contaron con un comportamiento irregular y distinto entre las mismas.

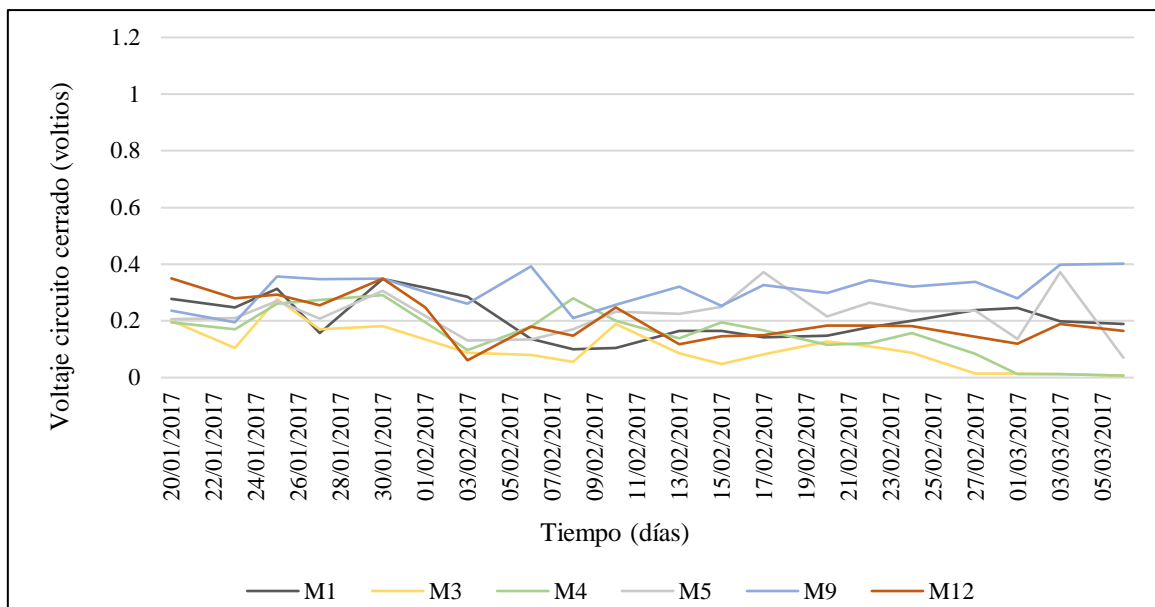


Figura 28: Voltaje en circuito cerrado registrado durante el tiempo de toma de datos.

FUENTE: Elaboración Propia.

Los resultados registrados coinciden con otras investigaciones, donde el voltaje tiene un comportamiento irregular con presencia de valores extremos. Por ejemplo, el estudio de (Moqsud *et al.*, 2015) quien utilizó compost como sustrato y reportó valores irregulares de voltaje en el tiempo, registró valores promedio de 0.3 voltios y valores pico de hasta 0.700 voltios.

Sin embargo, (Moqsud *et al.*, 2014) encontró claras tendencias en el voltaje para otros sustratos. Por ejemplo, al utilizar residuos orgánicos encontró un comportamiento característico en el voltaje, ya que al quinto día de experimentación se incrementó rápidamente hasta llegar a un valor pico de 0.62 voltios y luego disminuyó hasta alcanzar valores mínimos de 0.15 voltios en promedio.

Tabla 8: Medidas resumen del voltaje en circuito cerrado

	M1	M3	M4	M5	M9	M12	Promedio
Voltaje máximo	0.348	0.277	0.291	0.372	0.402	0.350	0.340
Voltaje mínimo	0.100	0.007	0.007	0.070	0.195	0.061	0.073
Voltaje promedio	0.208	0.103	0.157	0.223	0.310	0.199	0.200

FUENTE: Elaboración Propia.

Al respecto, a diferencia del VCA, en la presente investigación no se logró identificar un valor regular promedio ni un comportamiento característico en el voltaje en circuito cerrado, sin embargo, según se presenta en la Tabla 8, se obtuvieron valores promedio de voltaje de 0.200 voltios, alcanzando un máximo de 0.402 voltios en el caso de la muestra M9, lo cual representa valores promedio de voltaje. En ese sentido, se encuentra una oportunidad para que en investigaciones complementarias se haga énfasis en este parámetro.

4.2.2 Relación con parámetros del entorno

Durante la experimentación se midieron los parámetros del entorno (temperatura ambiental, radiación solar y temperatura de suelo). En el análisis de estos parámetros y de los parámetros de generación eléctrica solo se encontró una relación entre el VCA y la temperatura del suelo. Cabe señalar que, a diferencia de otras investigaciones, todas las muestras se encontraban en el mismo ambiente y bajo condiciones climáticas.

a. Temperatura del suelo

Junto a la medición de los parámetros eléctricos, se midió la temperatura de suelo en cada una de las muestras, dicho registro se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9: Registro de la temperatura del suelo por muestra

Medición	Fecha	Temperatura del suelo (C°)					
		M1	M3	M4	M5	M9	M12
1	20/01/2017	26	28	28	26.5	29	28
2	23/01/2017	25.1	26	25.2	25	25.8	25
3	25/01/2017	27.8	27.7	29	27.3	27.6	27.5
4	27/01/2017	32	35.5	32	31	29.2	30.5
5	30/01/2017	33	35	33	33	35	35
6	1/02/2017	30	27.8	33.5	28	28	28.5
7	3/02/2017	28	27.1	27.6	27	25.8	26
8	6/02/2017	26.3	27	29	30.2	32	33
9	8/02/2017	27.6	28	34	32.5	27.5	34
10	10/02/2017	26	24.5	25	25	24.5	26
11	13/02/2017	26.2	27.8	30.8	29	28.6	29
12	15/02/2017	27.5	30	33.5	33	26.2	26.5
13	17/02/2017	25	25	24.5	25	25	26
14	20/02/2017	24.8	24.8	25	27.2	24	29.2
15	22/02/2017	26.3	26	27	32	25.5	30
16	24/02/2017	25	25	26	26.7	25.2	32.5
17	27/02/2017	25.5	25.1	26	26.6	26.5	28.2
18	1/03/2017	26	25.2	25.8	25.5	26.8	27.8
19	3/03/2017	27.5	31.5	32.9	35	30.4	36.2
20	6/03/2017	28.8	30.4	34	33.5	29	34

FUENTE: Elaboración Propia.

En las Figuras 29, 30 y 31 se presentan los registros de la temperatura de suelo y los parámetros eléctricos (VCA y voltaje en circuito cerrado), en ellas se puede observar una tendencia similar entre los parámetros de VCA y temperatura de suelo para todas las muestras, así como coincidencias en los días en los que ambos parámetros alcanzan sus mayores valores, lo cual indica que ambas variables pueden estar relacionadas.

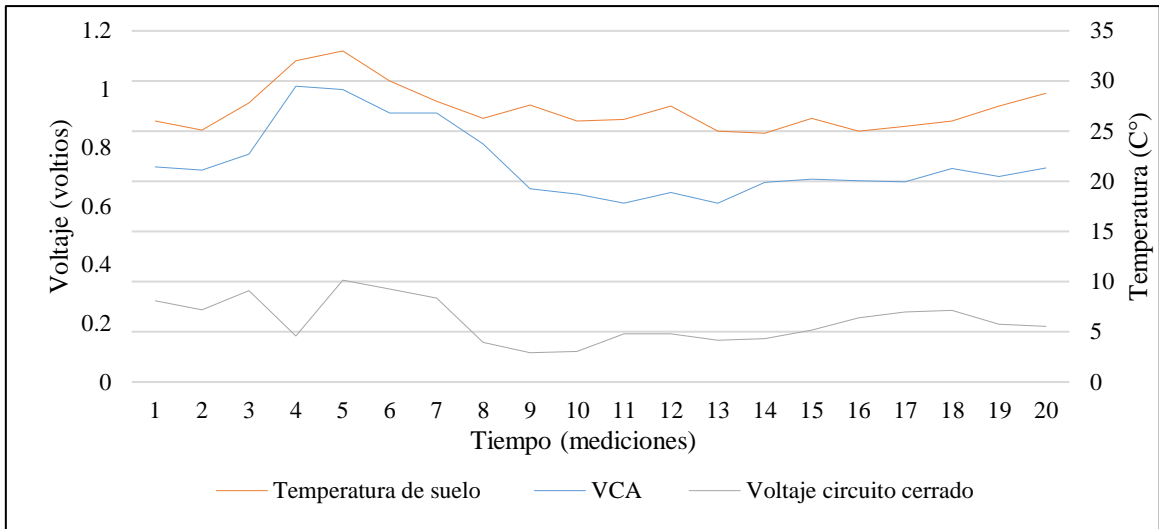


Figura 29: Voltaje y temperatura registrados durante la toma de datos (muestra M1).

FUENTE: Elaboración Propia.

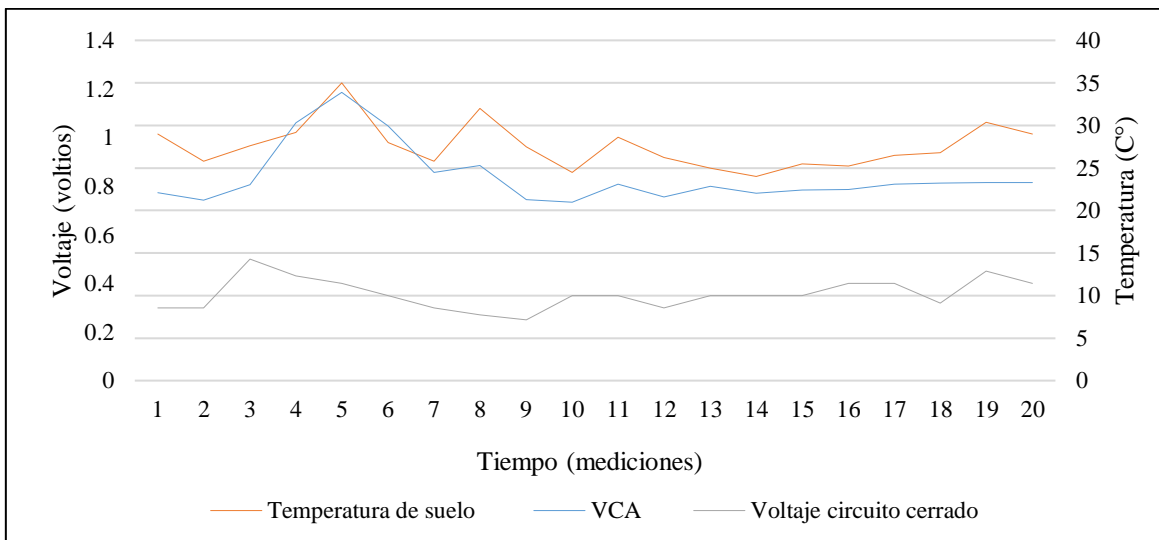


Figura 30: Voltaje y temperatura registrados durante la toma de datos (muestra M9).

FUENTE: Elaboración Propia.

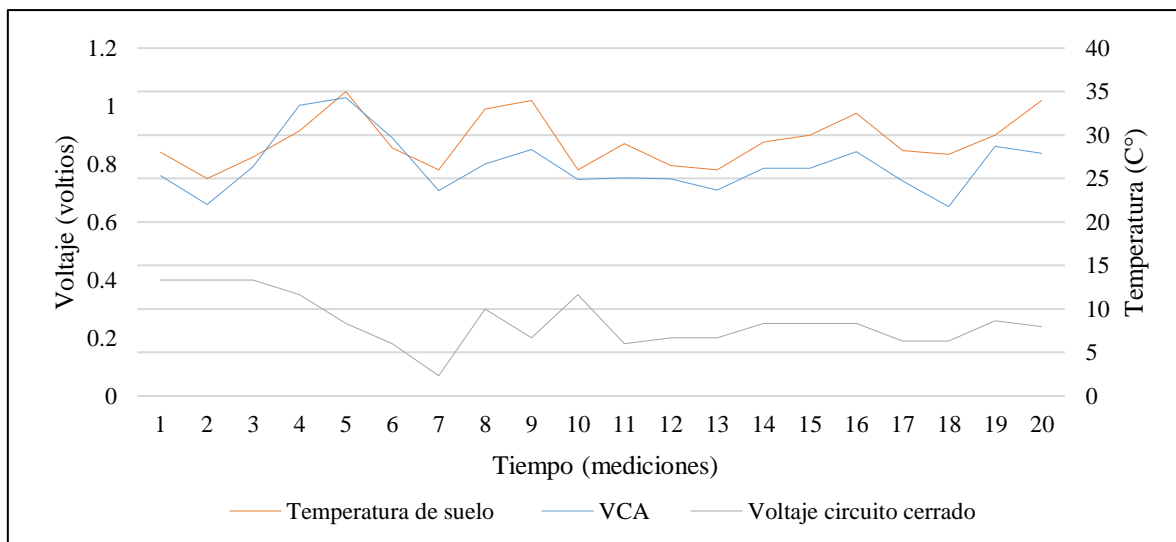


Figura 31: Voltaje y temperatura registrados durante la toma de datos (muestra M12).

FUENTE: Elaboración Propia.

La relación entre estos dos parámetros (utilizando suelo como sustrato) no ha sido desarrollada por otros investigadores: Se encontraron estudios acerca de la influencia de la temperatura del sustrato cuando este es agua, sin embargo, en el caso de sustratos sólidos (suelo, residuos orgánicos o compost) este parámetro no fue registrado. Lo mencionado representó una dificultad en la presente investigación ya que no se pudo discutir los resultados del presente numeral con otras investigaciones. No obstante, la evaluación de este parámetro a una mayor profundidad representa una oportunidad ya que, de comprobarse la relación, implicaría que, mediante el control de la temperatura en suelos o el uso de suelos que se caractericen por estar en zonas de mayor temperatura, podrían obtenerse resultados mayores en la generación eléctrica.

b. Temperatura ambiental

Los registros de la temperatura ambiental se presentan en la Tabla 10 y en las Figuras 32 y 33 se presentan de manera gráfica junto a los parámetros eléctricos (VCA y voltaje en circuito cerrado) correspondientes. Según lo presentado, no se pudo establecer una relación entre los antes mencionados.

En otros estudios se ha profundizado el estudio de la relación entre dichos parámetros utilizando ambientes con temperatura controlada comprobando que sí hay una influencia entre la temperatura y la generación eléctrica. Sin embargo, en la presente investigación solo se estudió este parámetro en condiciones naturales y en dichas condiciones no se observó que la temperatura ambiental afecte a la generación de electricidad.

Tabla 10: Registro de la temperatura ambiental (C°)

Fecha	Temperatura ambiente (°C)
20/01/2017	24.85
23/01/2017	24.2
25/01/2017	24.35
27/01/2017	26.9
30/01/2017	26.95
1/02/2017	26
3/02/2017	24.75
6/02/2017	24.55
8/02/2017	25.25
10/02/2017	23.6
13/02/2017	25.95
15/02/2017	28.65
17/02/2017	24.55
20/02/2017	27.05
22/02/2017	26.35
24/02/2017	25.6
27/02/2017	25.35
1/03/2017	24.85
3/03/2017	27.5
6/03/2017	26.5

FUENTE: Elaboración Propia.

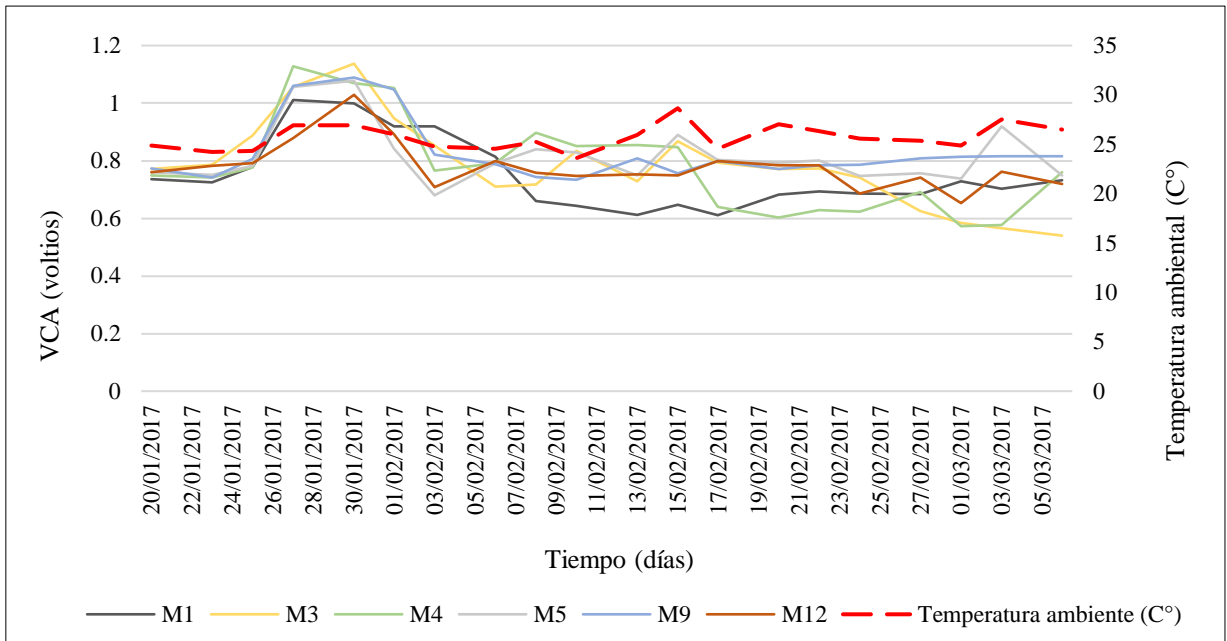


Figura 32: VCA y temperatura ambiental registrados en el tiempo de toma de datos.

FUENTE: Elaboración Propia.

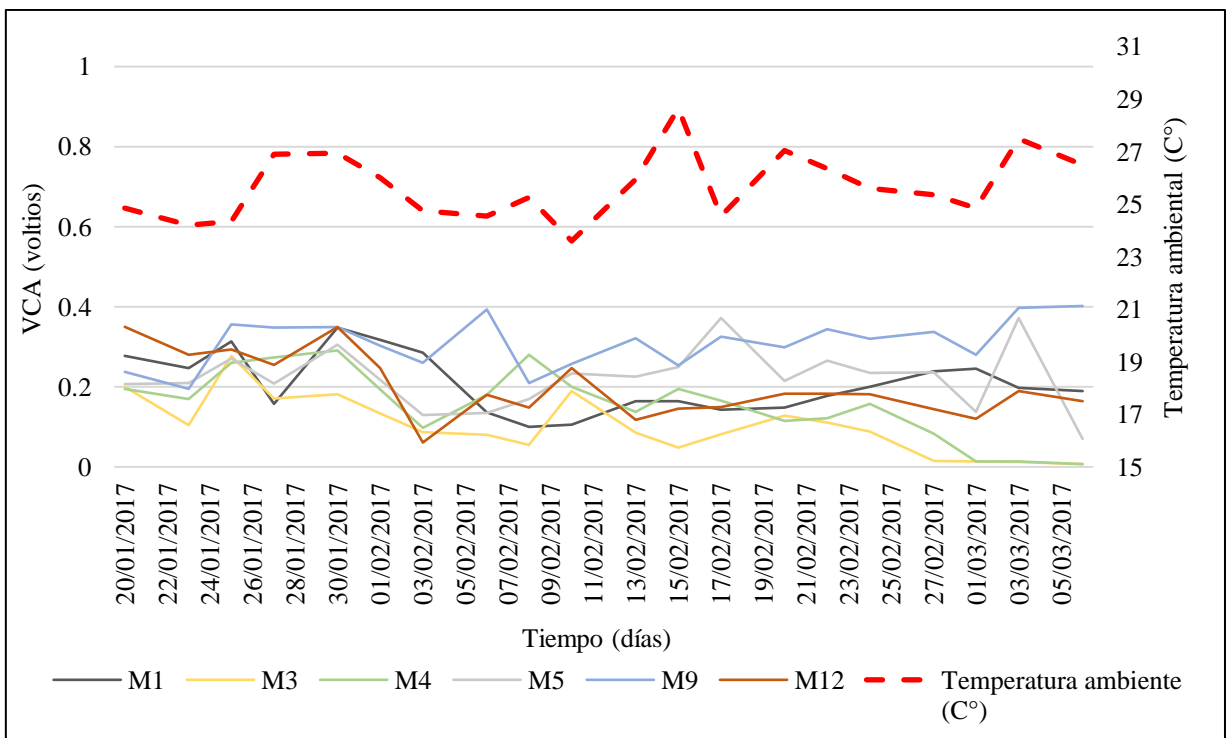


Figura 33: Voltaje y temperatura ambiental registrados en la toma de datos.

FUENTE: Elaboración Propia.

c. Radiación solar

Los registros de la radiación solar se presentan en la Tabla 11 y en las Figuras 34 y 35 se presentan de manera gráfica junto a los parámetros eléctricos (VCA y voltaje en circuito cerrado) correspondientes. Cabe destacar que la experimentación se dio en el verano del 2017, meses en los cuales ocurrió el fenómeno “El Niño costero” por lo que la mayoría de días se presentaron altos valores de radiación y el resto de días fueron nublados o lluviosos, lo mencionado se puede ver representado en la gráfica por la gran cantidad de valores mínimos y máximos de radiación, dicha variación en los registros dificultó establecer una relación entre los parámetros.

En otras investigaciones, como en la de (Moqsud *et al.*, 2015), se indica que la radiación solar tiene algunos efectos en la generación eléctrica a partir de la segunda semana del experimento, ya que los mayores valores fueron coincidieron, sin embargo, una vez que la planta (arroz) se desarrolló, dicha relación disminuyó notablemente. Si bien en la presente investigación la generación eléctrica también disminuyó a partir de la segunda semana, esto no puede atribuirse a la radiación solar.

Por lo antes mencionado, no se determinó una relación entre los parámetros de generación eléctrica y la radiación solar, ya que no se presentaron coincidencias entre los mismos.

Tabla 11: Registro de la radiación solar (watts/m²)

Fecha	Radiación solar (watts/m ²)
20/01/2017	159
23/01/2017	69.5
25/01/2017	128.5
27/01/2017	281
30/01/2017	163.5
1/02/2017	183.5
3/02/2017	66
6/02/2017	182.5
8/02/2017	253.5
10/02/2017	138.5
13/02/2017	225
15/02/2017	342
17/02/2017	94
20/02/2017	314.5
22/02/2017	279
24/02/2017	275
27/02/2017	97
1/03/2017	181.5
3/03/2017	294.5
6/03/2017	259

FUENTE: Elaboración Propia.

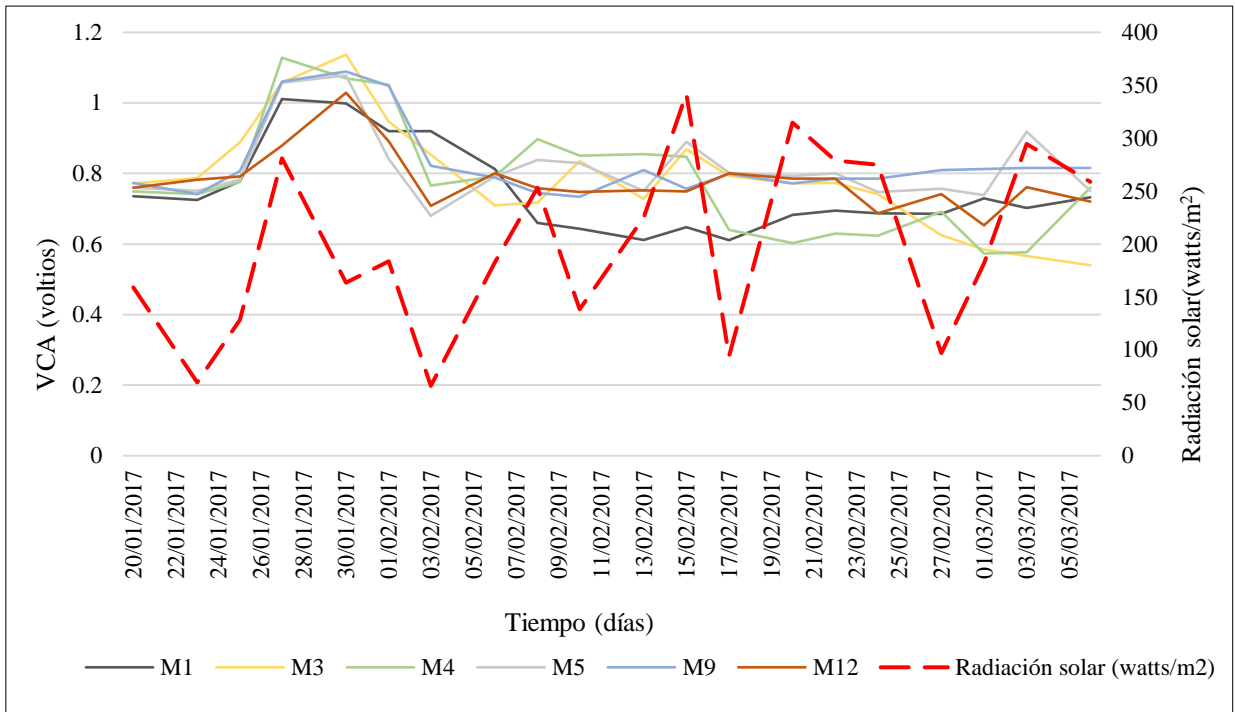


Figura 34: VCA y radiación solar registrados en el tiempo de toma de datos.

FUENTE: Elaboración Propia.

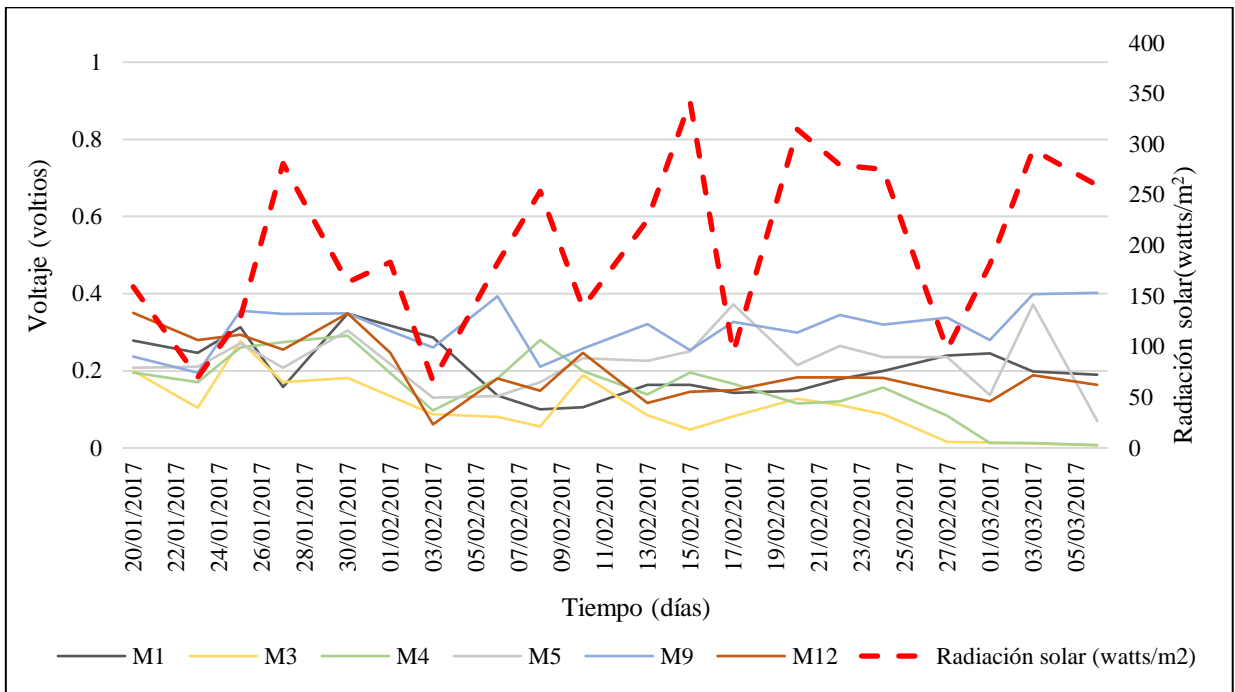


Figura 35: Voltaje y radiación solar registrados en el tiempo de toma de datos.

FUENTE: Elaboración Propia.

4.2.3 Etapas de generación eléctrica

En base al registro y análisis de los parámetros eléctricos (4.2.1) se establecieron las siguientes etapas de generación eléctrica: ascendente, máxima y estable, cuyas características principales se describen en la Tabla 12.

Tabla 12: Características de la generación eléctrica según etapas

	Etapa 1 (Ascendente)	Etapa 2 (Máxima)	Etapa 3 (Estable)
Duración promedio	7 días	8 días	29 días
VCA promedio	0.755 v	0.987 v	0.76 v
Voltaje en circuito cerrado promedio	0.237 v	0.249 v	0.244 v
VCA mínimo	0.66 v	0.778 v	0.1 v
VCA máximo	0.806 v	1.186 v	0.6 v

FUENTE: Elaboración Propia.

Como representación de lo descrito en el cuadro 12, se muestran las Figuras 36 y 37 correspondientes al comportamiento de la generación de energía eléctrica de las muestras M1 y M9, en las cuales las líneas rojas indican la separación entre las etapas: ascendente, máxima y estable.

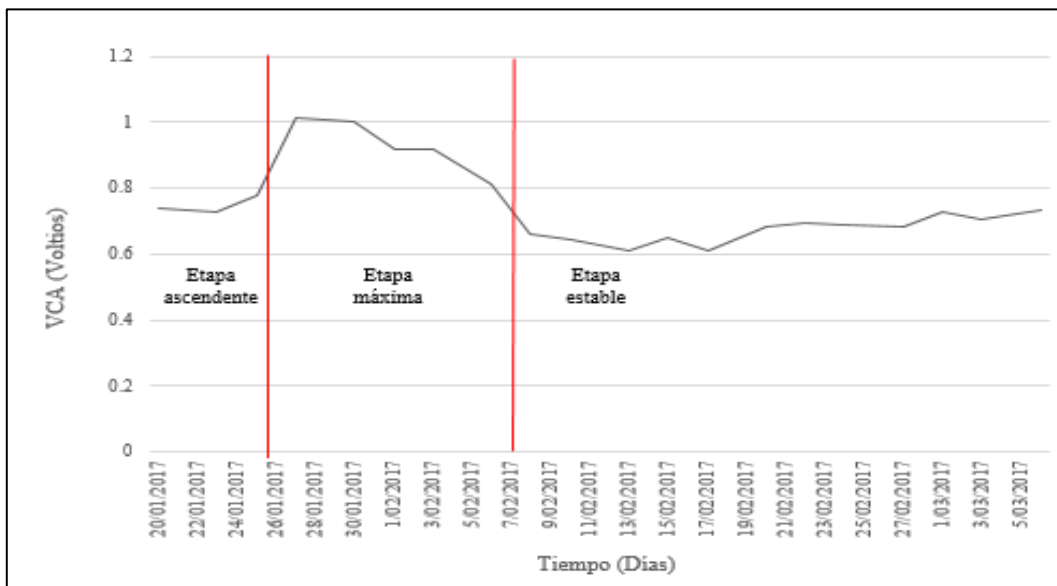


Figura 36: Comportamiento del voltaje en circuito abierto M1.

FUENTE: Elaboración Propia.

La etapa ascendente (inicial) se inició con el experimento y tuvo una duración promedio de 7 días con un valor promedio de VCA de 0.755 voltios. Esta etapa, caracterizada por el incremento del VCA se puede relacionar con la adaptación de los microorganismos ya que, según (Logan *et al.*, 2006), los microorganismos requieren tiempo para colonizar el electrodo y producir las estructuras necesarias para realizar la transferencia de electrones. La etapa máxima (intermedia) tuvo una duración promedio de 8 días y un valor promedio de VCA de 0.987 voltios. Esta etapa, que se distingue por alcanzar un valor máximo de VCA, puede explicarse por un crecimiento exponencial de los microorganismos luego de la adaptación (Larrosa *et al.*, 2009).

La etapa estable (final) tuvo una duración promedio de 29 días y un valor promedio de VCA de 0.760 voltios. Esta etapa, caracterizada por tener un VCA estable cuenta con la presencia de una planta desarrollada en el sistema que entrega constantemente materia orgánica al suelo durante su ciclo de vida mediante la rizodeposición (Strik *et al.*, 2011), dichos rizodepositos funcionan como una fuente de energía, lo cual permite que el sistema pueda continuar generando voltaje de manera estable.

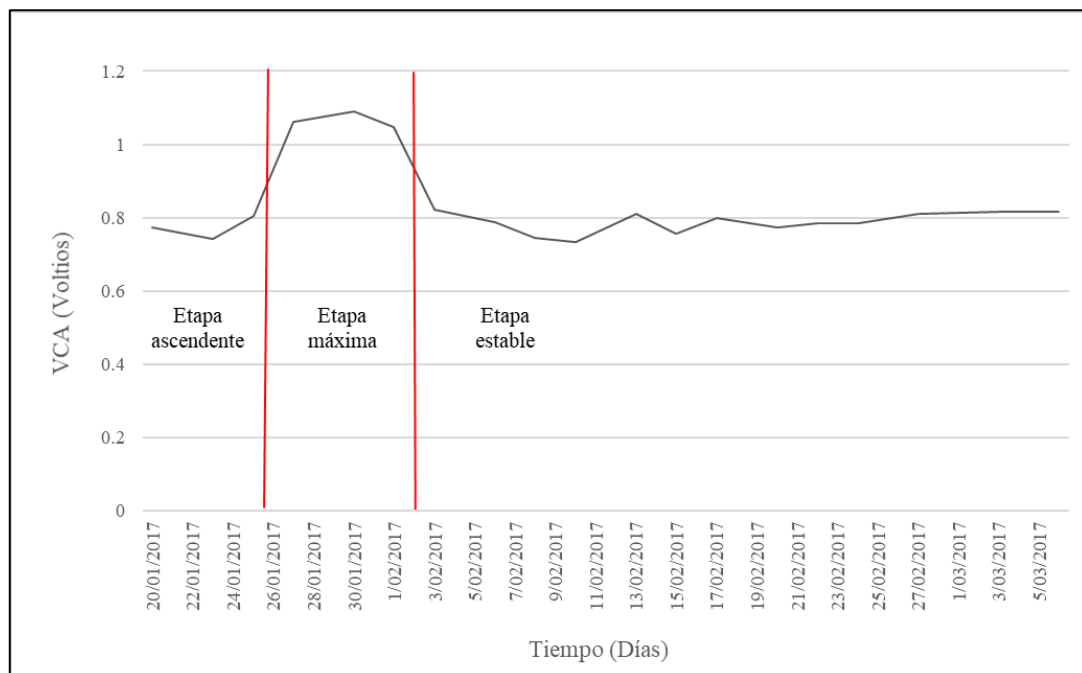


Figura 37: Comportamiento del voltaje en circuito abierto M9.

FUENTE: Elaboración Propia.

Las etapas establecidas en esta investigación fueron planteadas de manera similar por (Moqsud *et al.*, 2015), y Hong (2009) quienes indicaron que la tendencia general del comportamiento en el tiempo del voltaje iniciaba con una etapa de incremento gradual llegando a un pico, manteniéndose estable y finalmente descendiendo.

Por otro lado, (Liu *et al.*, 2013) propone etapas que caracterizan la generación eléctrica en base a un tiempo semejante de experimentación (40 días): inicia con una etapa de adaptación de ocho días para luego pasar a una etapa de incremento (desde el día 8 al 26) y finalmente una etapa estable (del día 26 al día 40).

Cabe resaltar que los resultados de esta investigación y de las otras mencionadas, coinciden en contar con una etapa estable final de mayor duración, con menos valores extremos e irregularidad; dicha característica es relevante, ya que uno de los principales inconvenientes para el uso de la tecnología a una mayor escala es la irregularidad en los valores del voltaje: al conectar celdas con voltajes distintos en serie se genera una caída del voltaje total del circuito, ocasionado por la diferencia de voltaje entre las celdas. Por ello, es importante planificar el uso de la PMFC en periodos donde se tengan los voltajes más homogéneos posibles. En ese sentido, para el sistema utilizado en la presente investigación, es recomendable plantear su uso en la etapa estable definida previamente.

4.3 Evaluación estacional de la generación eléctrica

El registro de los parámetros eléctricos de esta investigación comprueba que la PMFC puede generar electricidad en periodos mayores a 46 días. Por ello, a fin de conocer respuesta del sistema frente a distintos climas y evaluar la generación eléctrica en tiempos más amplios, este inciso evalúa las diferencias en el VCA en tres estaciones climáticas distintas (verano, primavera e invierno) en base a los registros generados en los incisos previos. Por ello, se inicia evaluando las diferencias entre estaciones climáticas (4.3.1) y luego se analiza la relación de la generación eléctrica con los parámetros del entorno (4.3.1).

4.3.1 Comportamiento estacional del VCA

En el presente inciso se evalúa las diferencias en la generación eléctrica por estación climática en base a un parámetro eléctrico: el voltaje en circuito abierto (VCA). En la Tabla 13 se presentan las principales diferencias en los valores promedio del VCA en base a los registros horarios de un día de cada una de las estaciones climáticas (Anexo 1), los cuales se encuentran en la Figura 38. Se observa que, de las tres estaciones evaluadas, se presentó una mayor generación eléctrica en las estaciones de primavera e invierno, las cuales solo se diferencian de la estación verano en unos 0.030 voltios en el VCA promedio. Asimismo, otra característica que resalta en los resultados es que las estaciones de invierno y primavera cuentan con valores promedios altamente semejantes: el VCA promedio entre ambas estaciones se diferencia en 0.003 voltios, el VCA máximo en 0.006 voltios y el VCA mínimo es el mismo. Dichas estas diferencias principales, se entra en mayor detalle en el numeral 4.3.2., donde se consideran los parámetros del entorno, los cuales son las principales diferencias entre las estaciones climáticas.

Tabla 13: Resumen de los registros del VCA según estación climática

	Invierno	Primavera	Verano
Fecha	15/09/2016	3/11/2016	3/1/2017
VCA promedio	0.984	0.987	0.956
VCA mínimo	0.970	0.970	0.930
VCA máximo	1.004	1.010	0.985

FUENTE: Elaboración Propia.

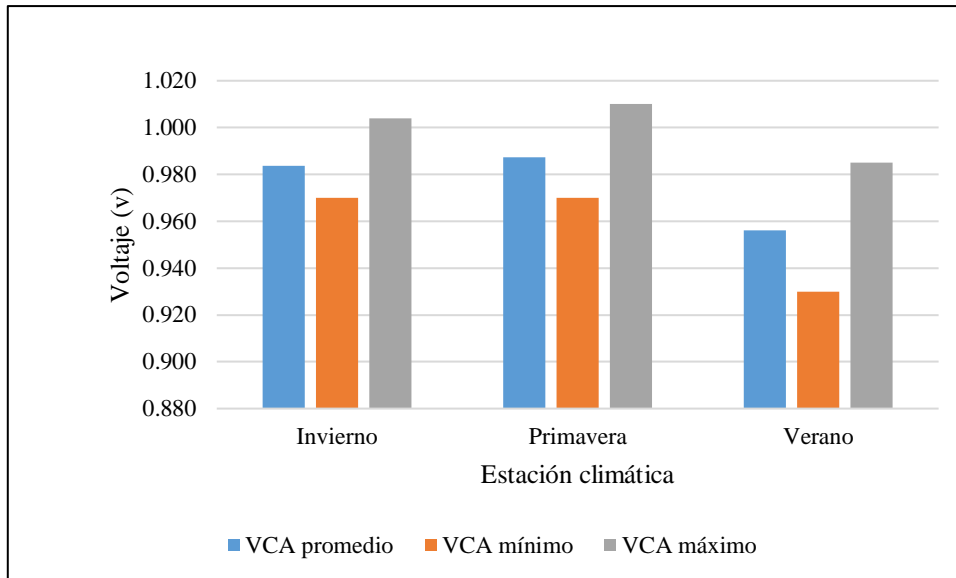


Figura 38: Resumen de VCA registrado según estación climática.

FUENTE: Elaboración Propia.

4.3.2 Relación con parámetros del entorno

a. Temperatura ambiental y radiación solar

En la Tabla 14 se presentan los valores promedio de temperatura ambiente y radiación solar para cada estación climática y de forma gráfica, considerando el VCA, en las Figuras 39 y 40. En ellas se puede ver, como es de esperarse, que ambos parámetros incrementan con el cambio de estación. Sin embargo, este incremento no se encuentra alineado a los valores promedios de VCA para ninguno de los parámetros del entorno, lo cual se destaca al observar las variaciones en verano, ya que se reportó una clara disminución con el incremento de la temperatura ambiental y la radiación solar.

Tabla 14: Resumen de los parámetros del entorno por estación climática

	Invierno	Primavera	Verano
Temperatura ambiente promedio (C°)	16.429	17.513	22.108
Radiación solar promedio (watts/m ²)	71.708	220.70	262.875

FUENTE: Elaboración Propia.

Sobre los resultados presentados y la revisión de la literatura, la investigación de Dai *et al.* (2015) sentó bases para poder discutir la disminución del VCA frente al incremento de los parámetros del entorno en el verano: en su investigación, desarrollada para un periodo de 17 meses donde se evaluó la generación eléctrica en relación a parámetros del entorno (voltaje, temperatura, nivel del agua y precipitación horaria), se encontró que cuando el sistema estaba en un periodo húmedo la generación eléctrica aumentaba considerablemente y disminuía en periodos secos. En ese sentido, se considera probable que las diferencias entre invierno y verano estén relacionadas a que en la estación de invierno se presentan un mayor número de episodios de llovizna, lo cual aporta una mayor humedad al ambiente y en consecuencia incrementa el voltaje. Sin embargo, se considera relevante profundizar en las evaluaciones en periodos de tiempo amplios para poder establecer conclusiones respecto al comportamiento estacional de la generación eléctrica.

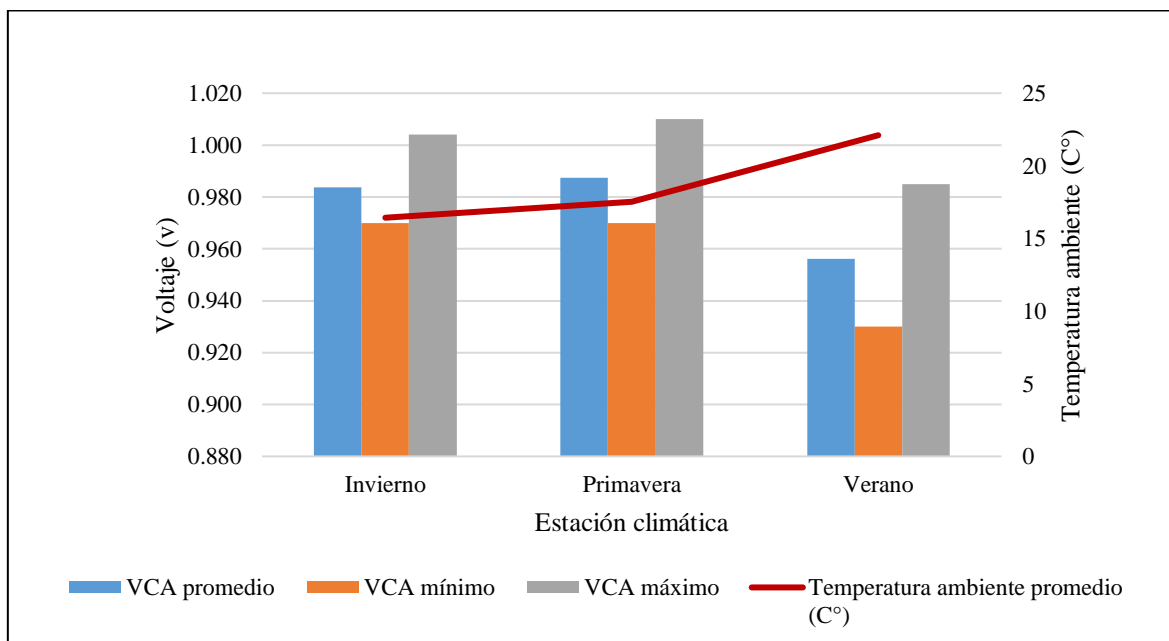


Figura 39: Resumen del VCA y de la temperatura ambiental por estación climática.

FUENTE: Elaboración Propia.

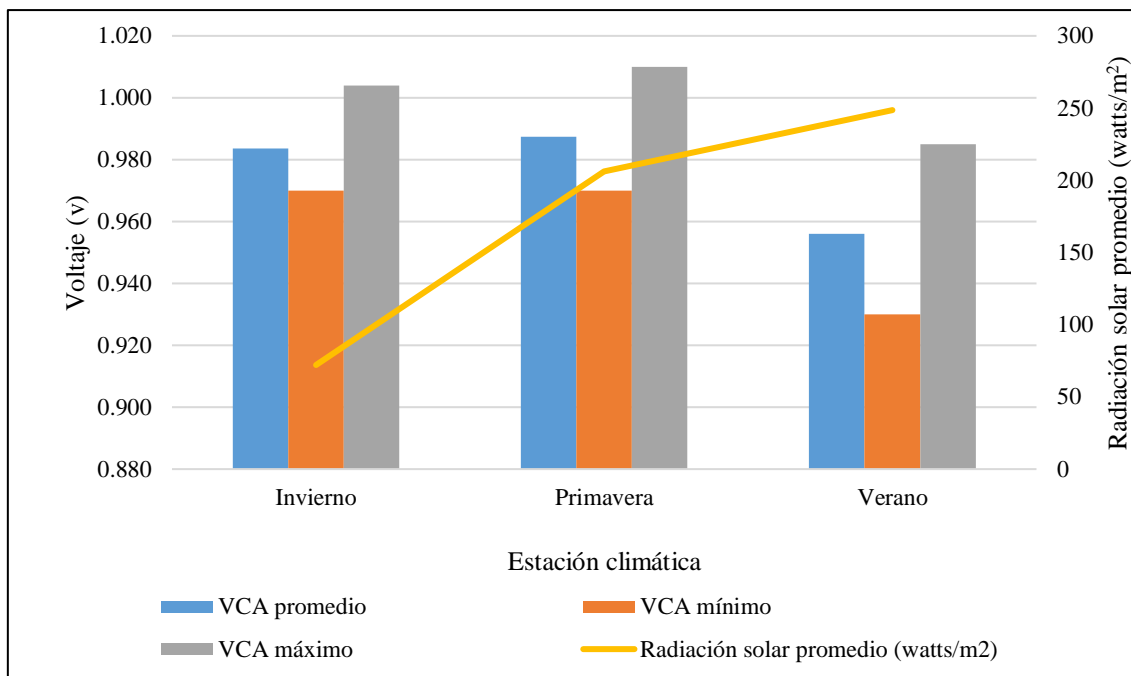


Figura 40: Resumen del VCA y de la radiación solar por estación climática.

FUENTE: Elaboración Propia.

4.4 Estimación de la generación de energía eléctrica

Según los resultados presentados en los incisos previos, se ha demostrado que se puede generar electricidad con el sistema PMFC en periodos prolongados de tiempo. Según ello, esta sección presenta los resultados de la estimación de la generación eléctrica en base a los registros y etapas establecidas previamente en el numeral 4.2.2

En la determinación de la generación eléctrica se tomó en consideración el promedio de los parámetros de generación eléctrica (voltaje en circuito cerrado, VCA e intensidad eléctrica) de las muestras para cada etapa, los cuales se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15: Resumen de las medidas de generación eléctrica por etapas.

	Etapa 1 (Ascendente)	Etapa 2 (Máxima)	Etapa 3 (Estable)
Duración promedio (días)	7	8	29
VCA promedio (v)	0.755	0.987	0.76
Voltaje promedio (v)	0.237	0.249	0.244
Intensidad eléctrica promedio (mA)	0.24	0.25	0.24
Potencia (mW)	0.057	0.062	0.059
Potencia máxima teórica (mW)	0.143	0.244	0.144
Eficiencia (%)	39.91	25.56	40.55
Densidad de potencia (mW/m ²)	28.09	31.00	29.77

FUENTE: Elaboración Propia.

Para el cálculo de la potencia máxima teórica, se consideró que la resistencia externa es equivalente a la interna, así como el valor promedio del VCA, obteniéndose como resultado promedio 0.059 mW de potencia y 29.62 mW /m² de densidad de potencia. Para el cálculo de la densidad de potencia se consideró el área del ánodo (20 cm²) obteniéndose un promedio de 24.66 mW/m² y un máximo de 80 mW/m² al considerar el máximo valor alcanzado por el voltaje en la experimentación.

Dentro del campo de la investigación de las PMFC, la densidad de potencia es el principal parámetro utilizado para comparar los resultados entre investigaciones. Por ejemplo, (Moqsud *et al.*, 2013) al utilizar plantas de arroz con suelo enriquecido con compost registró un máximo de 23 mW/m²; al utilizar residuos orgánicos obtuvo una densidad de potencia máxima de 54.4 mW/m²; al utilizar residuos de bambú y de cocina obtuvo potencias máximas de 60 mW/m² y 40 mW/m² respectivamente (Moqsud *et al.*, 2014). El en caso de (Mitov *et al.*, 2015), al utilizar otro tipo de celdas obtuvo resultados similares, por ejemplo en un estudio de celdas sedimentarias registró valores de entre 26.2 a 35.2 mW/m². Al comparar estos resultados con los de la presente investigación, se encuentra que los valores promedio alcanzados (24.66 mW/m²) son relevantes, y que al considerar el máximo alcanzado (80 mW/m²) se encuentra la posibilidad de obtener una generación mucho mayor al mejorar el sistema utilizado.

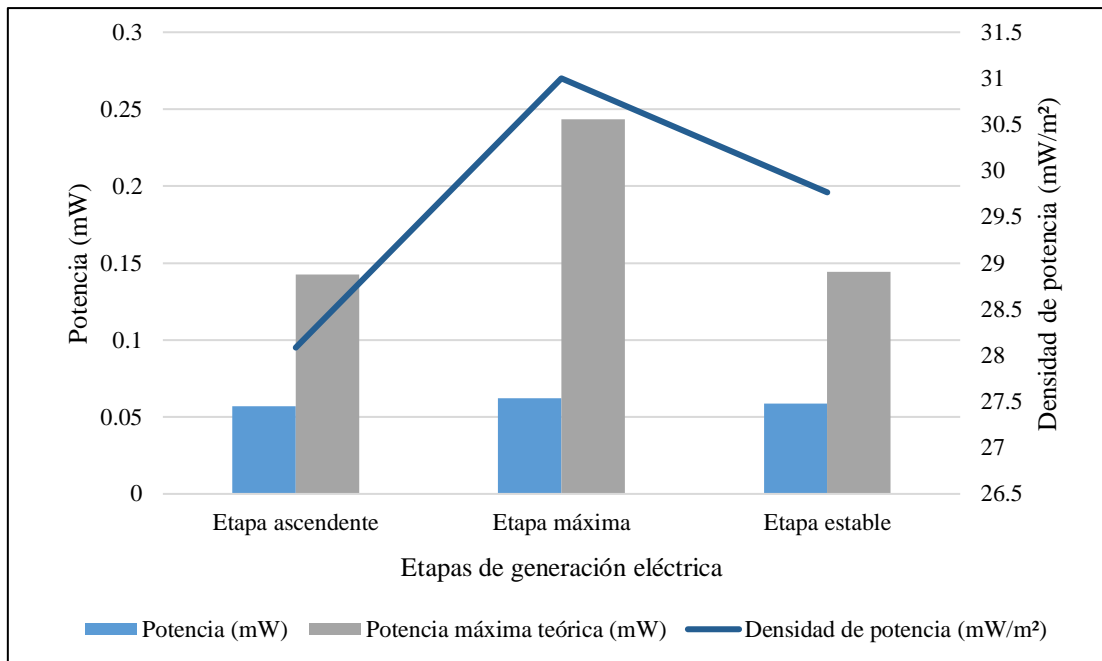


Figura 41: Potencia eléctrica generada según etapas

FUENTE: Elaboración Propia.

En la Figura 41 se presentan de manera gráfica los resultados de la generación eléctrica por etapas, donde se puede observar que la que tiene mejores resultados en términos de potencia y densidad de potencia es la etapa máxima, sin embargo, esta etapa tiene una duración de 8 días en promedio. Por otro lado, al observar la etapa estable se encuentra un valor de densidad de potencia de aproximadamente 30 mW/m² y una eficiencia de 41 por ciento, tomando en cuenta que es la etapa de mayor duración (29 días) y la que tiene menos valores extremos reportados que podrían generar caídas en la generación eléctrica, se considera que es la etapa ideal para el diseño y propuesta de aplicaciones de la tecnología.

4.5 Aplicación propuesta

En esta investigación se comprobó el funcionamiento de las PMFC como fuente de energía eléctrica para iluminación mediante el encendido de tiras de diodos LED color azul (≈ 3.6 v) que contienen treinta unidades LEDS (Ver Figura 42), por lo que en el presente apartado se detallan las características de la aplicación propuesta de uso de la PMFC como luces guía o de señalización con tiras de diodos LED.

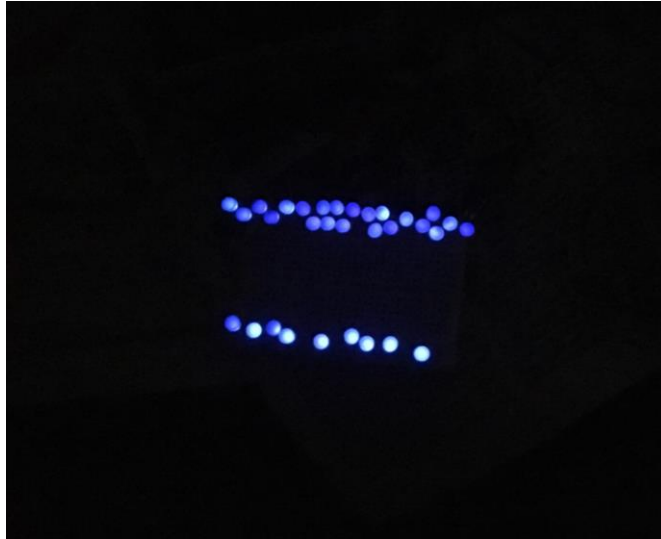


Figura 42: Tira de diodos LED.

FUENTE: Elaboración Propia.

a. Materiales utilizados

Se consideró el uso de PMFC construidas con los materiales especificados en la Tabla 16, los cuales fueron utilizados en la presente investigación.

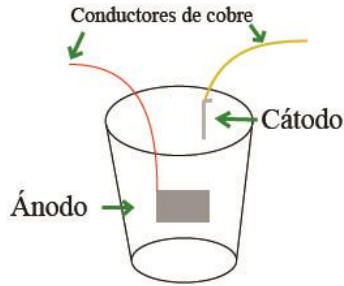
Tabla 16: Características de diseño de la PMFC de la aplicación propuesta.

	Descripción
Cátodo	Alcayata acero estriado
Ánodo	Grafito
Conductor	Cable de cobre
Medio	Suelo
Microorganismos	Presentes en el suelo
Planta	Maíz
Dispositivo eléctrico	Diodos led color azul

FUENTE: Elaboración Propia.

b. Configuración de celdas

Para la construcción interna de las celdas se consideró la configuración utilizada en la presente investigación que se esquematiza en la Figura 43 ya que se comprobó su funcionamiento efectivo para la generación eléctrica.



PMFC (Celda de combustible planta-microbiana)

Figura 43: Configuración de la PMFC para encendido de tiras LED de 1 metro.

FUENTE: Elaboración Propia.

Cada una de las celdas deben conectarse, uniendo el cable de cobre del cátodo de una celda con el cable del ánodo de otra celda, asegurando que exista una separación física entre ambas. Es indispensable que las celdas estén separadas físicamente, ya sea por un aislante colocado entre celda y celda o por macetas, ya que cuando la unión de cátodo y ánodo se da en un mismo suelo o ambiente, no se produce el paso de electrones en el circuito, por ende no hay generación de energía eléctrica.

c. Generación eléctrica

Según el análisis realizado en el inciso 4.4., en el diseño de la aplicación propuesta se consideraron los parámetros eléctricos obtenidos en la etapa estable.

Para lograr el encendido de una tira de 30 diodos LED color azul, cuyo funcionamiento requiere un promedio de 3.6 voltios, se debió superar dicho voltaje por lo cual se conectó en serie 6 unidades de PMFC con lo que se logró alcanzar el voltaje promedio de 4.5 voltios, cantidad que aseguró el funcionamiento de la tira de LEDs. En la Tabla 17 se presentan las medidas resumen del diseño.

Tabla 17: Estimación de la generación eléctrica de la PMFC propuesta.

Parámetro	Valor	Unidad
VCA PMFC promedio	0.75	v
Cantidad de PMFC requeridas	6	Unidades
VCA total	4.5	v
Intensidad promedio PMFC	0.36	mA
Voltaje en circuito cerrado	2.4	v
Potencia	0.864	mW
Densidad de potencia	2880	mW/m ²

FUENTE: Elaboración Propia.

d. Propuesta de aplicación de PMFC

El sistema propuesto permite generar la energía para el encendido de un metro de 30 diodos LEDs conectados en paralelo; en ese sentido, se puede tener “*n*” metros de LED encendidos con “*6n*” PMFC conectadas en serie. En la Figura 44 se representa el referido diseño.

El mencionado sistema puede ser utilizado para el encendido de luces de decoración, así como luces guía o de señalización en lugares sin iluminación o en situaciones de emergencia, donde las tiras de diodos led pueden ser usadas para señalar caminos o direcciones. Asimismo, su aplicación puede priorizarse para lugares rurales de baja densidad poblacional donde no se cuenta con alumbrado público.

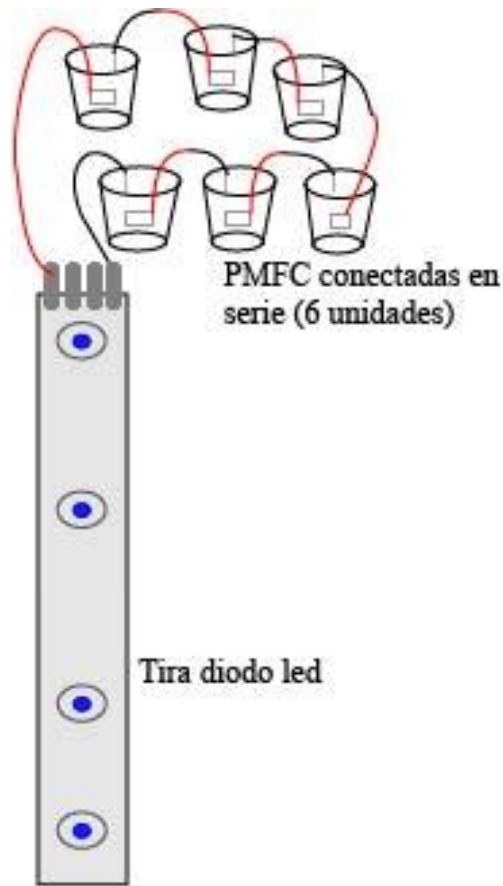


Figura 44: Diseño propuesto para el encendido de tiras LED de 1 metro.

FUENTE: Elaboración Propia.

e. Presupuesto para aplicación de propuesta

Para la aplicación de la propuesta planteada según los incisos previos es necesario contar con los materiales detallados en la Tabla 18, el mismo en el que se detallan las cantidades y costos requeridos. Según se observa, el material de mayor costo son las placas de grafito, costando 16 soles cada unidad, sobre ello, cabe destacar que para la presente experimentación las placas de grafito fueron elaboradas a pedido, por lo cual el costo fue elevado. Por ello, es posible evaluar el uso de otros materiales con otras presentaciones más comerciales del grafito, a fin de aminorar los costos.

Tabla 18: Estimación de los costos para la implementación del sistema

	Descripción	Cantidad	Precio (S/.)	Total (S/.)
Cátodo	Alcayata acero estriado	1 paquete	6.70	6.70
Ánodo	Placa de grafito (5 cm x 4 cm)	6 unidades	16	96
Conductor	Cable de cobre	10 metros	1.50	10.50
Planta	Maíz	1 sobre	2.5	2.5
Dispositivo	Tira de diodos led	1 unidad	30	30
Maceta		6 unidades	6	36
			TOTAL	181.70

FUENTE: Elaboración Propia.

4.6 Evaluación de los efectos de la PMFC en el suelo y la planta

4.6.1 Caracterización del suelo

El suelo utilizado fue arenoso y se caracterizó por tener un pH de 8.09. Asimismo, contó con una conductividad eléctrica de 21.51 ds/m y un porcentaje de materia orgánica de 10.32 por ciento. La caracterización del suelo utilizado al iniciar el experimento se presenta en la Tabla 19. En la Tabla 20 se presenta el análisis de microorganismos aeróbicos, anaeróbicos y actividad microbiana del suelo utilizado para el experimento.

Tabla 19: Análisis inicial de caracterización del suelo (Parámetros físico-químicos).

Parámetro		Valor
pH		8.09
C.E		21.51 (ds/m)
P Disponible		427 mg/kg
K Disponible		7494 mg/kg
Análisis textural	Arena	86 %
	Limo	12 %
	Arcilla	2 %
	Clase textural	Arena
Capacidad de intercambio catiónico	Ca ⁺⁺	8.8 (meq/100g)
	Mg ⁺⁺	4.69 (meq/100g)
	K +	4.91 (meq/100g)
	Na +	0.67 (meq/100g)
	Al +3	<0.01(meq/100g)
	Suma de cationes	19.07 (meq/100g)
	CIC	19.07 (meq/100g)
M.O		10.32 %
C		5.92 %
CO ₃ Ca		3.36 %
Elementos disponibles	Ca ⁺⁺	4748 mg/kg
	Mg ⁺⁺	1011 mg/kg
	SO ₄ =	1372 mg/kg
	B	13.37 mg/kg
	Cu	4.61 mg/kg
	Fe	61.61 mg/kg
	Mn	24.4 mg/kg
	Zn	36.78 mg/kg

FUENTE: Elaboración Propia.

Tabla 20: Análisis inicial de microorganismos y actividad microbiana

Parámetro	Valor
Aerobios mesófilos	13 x 10 ⁷ UFC/g
Anaerobios	6.9 x 10 ³ UFC/g
Actividad microbiana	0.0791 mgCO ₂ mL.H

FUENTE: Elaboración Propia.

a. Variación de características físico químicas del suelo

A continuación, se presentan los resultados primordiales donde se puede apreciar la variación de cada parámetro entre el inicio y el final del experimento en las muestras. Todos los análisis son presentados en el Anexo 2. En base a estos resultados, se puede decir que la PMFC no altera las características del suelo.

– pH

En la Figura 45, donde se representa el valor de pH al inicio y final del experimento, se observa que este parámetro disminuyó en todas las muestras en un promedio de 0.18 (2.27 por ciento), obteniéndose un valor promedio final de 7.9.

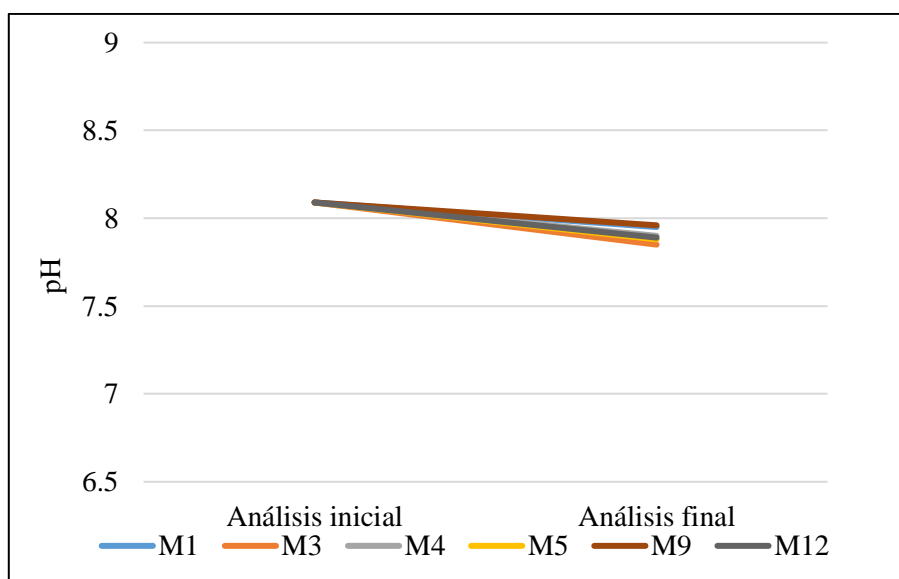


Figura 45: Variación del pH de las muestras de suelo.

FUENTE: Elaboración Propia.

La disminución del valor de pH puede explicarse ya que mientras el sustrato es consumido por los microorganismos, se liberan protones en el ánodo, lo cual implica una caída del pH (Logan, 2008). Cabe resaltar que, se ha demostrado que un menor pH mejora la actividad biocatalítica y/o la disponibilidad de protones lo cual resulta en una mayor intensidad eléctrica generada (Strik *et al.*, 2013), sin embargo, no se pudo establecer una relación entre el cambio de pH y la generación eléctrica para la presente investigación.

– Conductividad eléctrica

En la Figura 46, donde se representa el valor de la conductividad eléctrica al inicio y final del experimento, se observa que este parámetro disminuyó en todas las muestras (excepto en la muestra M4) en un promedio de 1.04 ds/m (4.81 por ciento), obteniéndose un valor promedio final de 20.4 ds/m.

Se ha determinado, en otras investigaciones, que una menor conductividad eléctrica implica una mayor resistencia interna y una respuesta electroquímica menor (Santoro *et al.*, 2014). Esta premisa puede aplicarse a la presente investigación ya que se encontró una disminución en el valor promedio de conductividad eléctrica (-4.8 por ciento) que coincidió con una disminución de la energía eléctrica. Dicha característica fue más notable en la muestra M1 ya que esta tuvo la mayor disminución de conductividad eléctrica (-2.17 ds/m) así como también la mayor disminución de voltaje en circuito (-0.057 v).

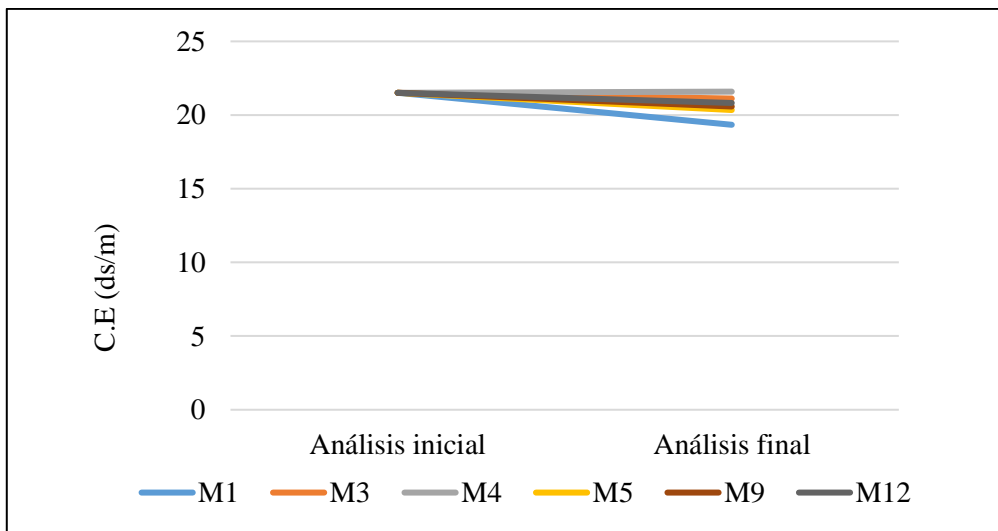


Figura 46: Variación de la conductividad eléctrica de las muestras de suelo.

FUENTE: Elaboración Propia.

– Carbono (%)

En la Figura 47; donde se representa el porcentaje de carbono al inicio y al final del experimento, se observa que este parámetro disminuyó en algunas muestras e incremento en otras, en un promedio de 0.3 por ciento y 1.3 por ciento, respectivamente.

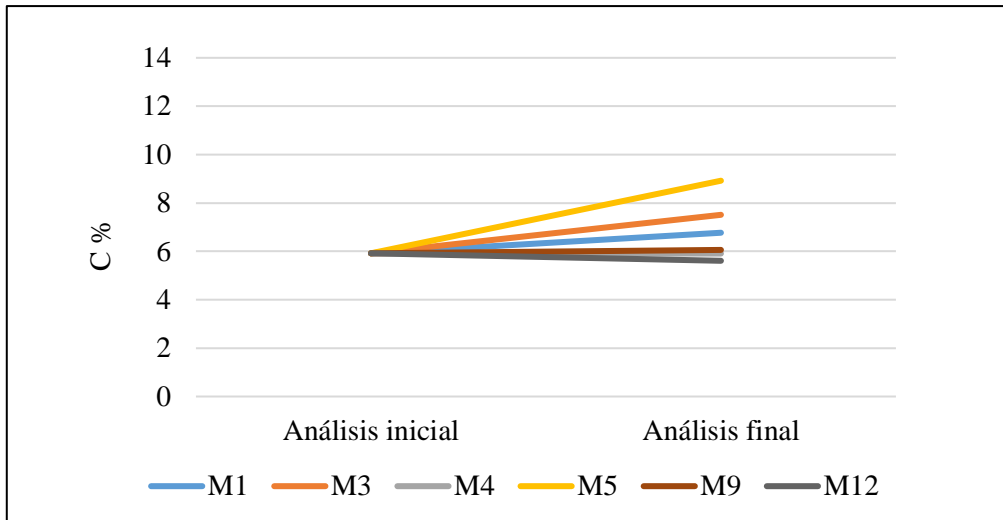


Figura 47: Variación del carbono de las muestras de suelo.

FUENTE: Elaboración Propia.

Al relacionar el porcentaje de carbono con los parámetros eléctricos no se encontró ninguna relación notable.

El incremento del porcentaje de carbono en algunas celdas puede explicarse al considerar que el requisito del laboratorio para el análisis requería una muestra de peso mínimo de 500 gramos, de manera que se recolectó suelo tanto de la zona que estaba en contacto con el ánodo (donde los microorganismos realizan electrogénesis y consumen la materia orgánica) como también de la zona que no estaba en contacto con el ánodo (donde los rizodepósitos no son utilizados por la celda), resultando un incremento o estabilidad del porcentaje de carbono.

– Nutrientes (P y K)

En las Figuras 48 y 49, donde se representa la cantidad de fósforo y de potasio al inicio y al final del experimento, se puede observar que la cantidad de fósforo disminuyó en todas las muestras en un promedio de 35 por ciento y que el potasio disminuyó en un promedio de 11 por ciento. Dichos cambios se explican ya que al estar el maíz en crecimiento vegetativo, este toma los nutrientes del medio, como el potasio y el fósforo, de manera rápida y sostenida (Ritchie y Hanway, 1982).

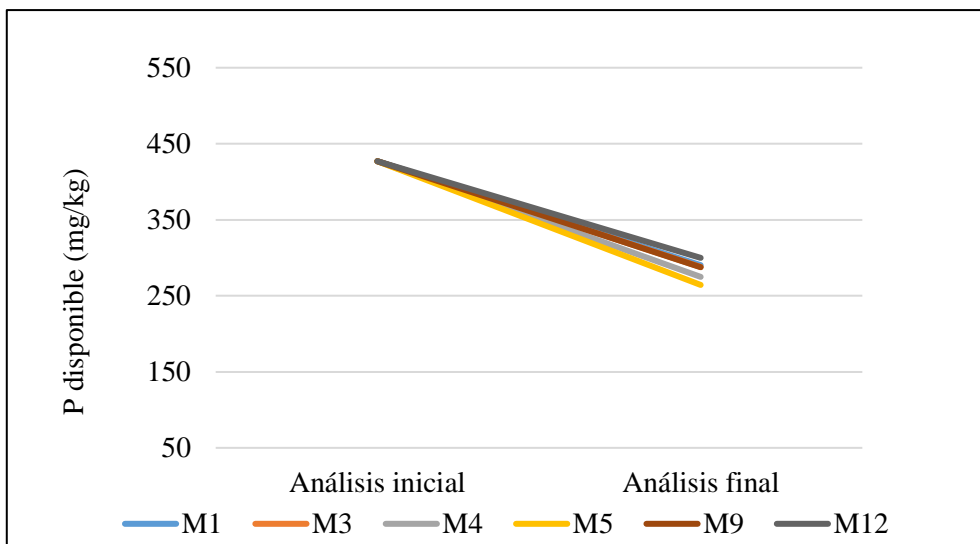


Figura 48: Variación del P disponible de las muestras de suelo.

FUENTE: Elaboración Propia.

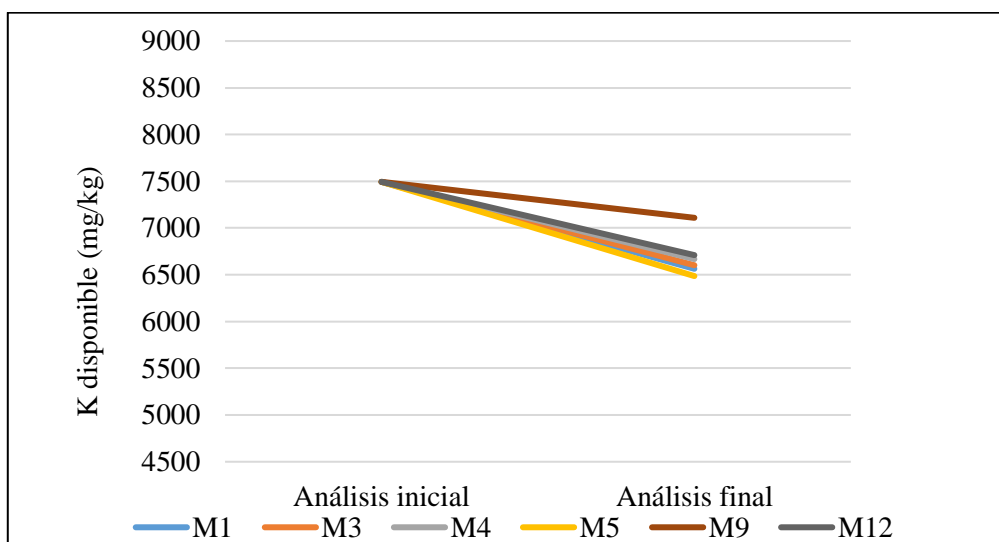


Figura 49: Variación del K disponible de las muestras de suelo.

FUENTE: Elaboración Propia.

4.6.2 Crecimiento de la planta

A través de los 42 días en los que se desarrolló la experimentación descrita en el numeral 4.2., se registró el crecimiento de las plantas de maíz, el cual es representado en la Figura 49, observándose que el crecimiento de todas las muestras es constante, progresivo y similar entre las mismas llegando a alcanzar tamaños finales similares (Tabla 21). Dicho

crecimiento sostenido indica que la tecnología utilizada no tiene efectos negativos en el desarrollo de la plántula. El crecimiento de todas las muestras se detalla en el Anexo 3.

Otros investigadores también han observado el crecimiento de las plantas a lo largo de su experimentación, como por ejemplo (Moqsud *et al.*, 2015), al experimentar con plantas de arroz que tienen diferentes cantidades de compost en su medio de crecimiento, reportó un crecimiento regular de las plantas el cual fue más acelerado en las que contenían mayor cantidad de compost, concluyendo que la generación de electricidad no tiene ninguna influencia negativa en el desarrollo de la planta. Es importante señalar que esto demuestra que se puede generar energía eléctrica a través de la tecnología PMFC sin perjudicar el crecimiento normal de la planta.

Tabla 21: Medidas finales de los parámetros de crecimiento de las plantas.

Muestra	Altura final (cm)	Tamaño final de hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento final
M1	44.5	52	V12
M3	43	52	V13
M4	49	51	V11
M5	47	62	V12
M9	48	52	V12
M12	52	60	V11

FUENTE: Elaboración Propia.

Finalmente, en la Figura 50 se muestra el crecimiento y los valores promedio de los parámetros eléctricos (VCA y voltaje en circuito cerrado), en la que no se determinó una relación entre ambos, por lo que no se puede concluir que el desarrollo de la planta tenga un rol determinante en la generación eléctrica.

Cabe destacar que, el haber utilizado una maceta transparente que permitió el ingreso de luz puede haber afectado el crecimiento de las raíces y por consecuencia, el desarrollo normal de la planta debido a que en un ambiente natural las raíces crecen en ausencia de luz.

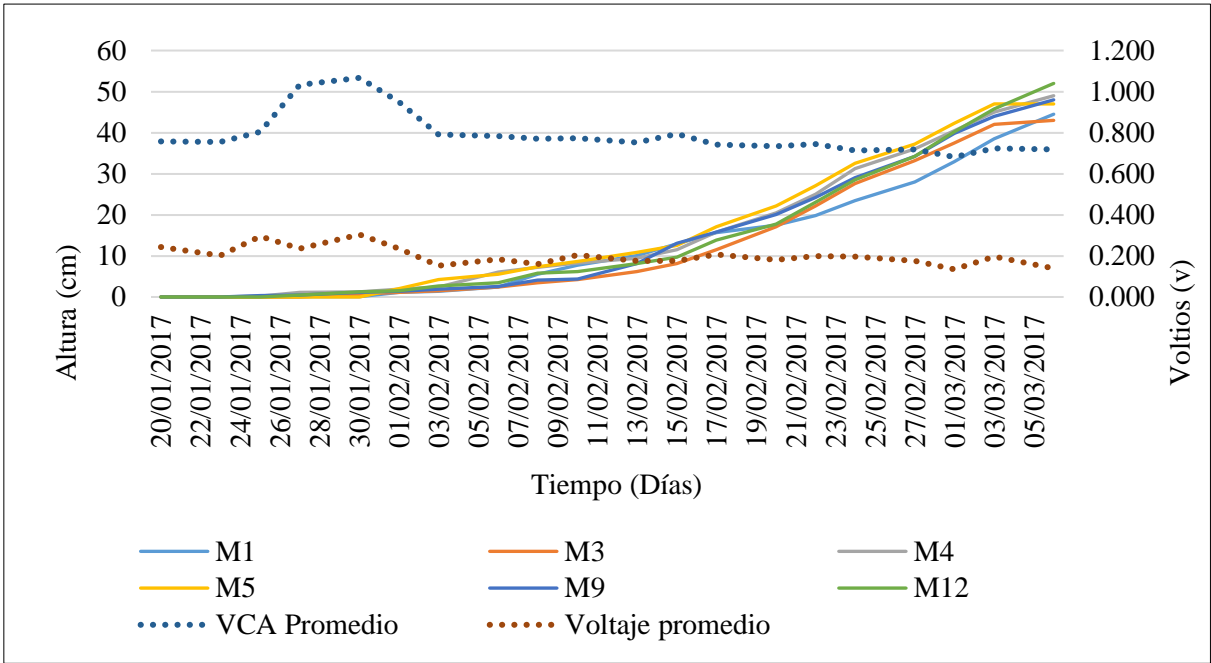


Figura 50: Registro de la altura de plantas y de los parámetros eléctricos.

FUENTE: Elaboración Propia.

V. CONCLUSIONES

- Con el funcionamiento permanente de la celda de combustible planta microbiana (PMFC) para la producción de electricidad bajo condiciones climáticas de La Molina, se determinó una potencia eléctrica de 0.059 mW y una densidad de potencia de 29.77 mW/m² en base al área del ánodo (20 cm²) utilizándose suelo como sustrato y como catalizadores a las bacterias presentes en ella, como planta el maíz, grafito como electrodo anódico y acero como electrodo catódico.
- Al relacionar los parámetros del entorno (temperatura ambiente, temperatura del sustrato y radiación solar) con la generación eléctrica se concluyó que los periodos sin radiación solar (horas nocturnas) coinciden con los menores valores reportados de VCA.
- Al analizar la generación eléctrica de la PMFC en el tiempo de manera horaria y en un periodo prolongado, se determinó que la magnitud del voltaje toma un comportamiento típico donde alcanza valores máximos promedio de 0.99 voltios entre las 7 y 12 pm, y disminuye hasta llegar a valores mínimos promedio de 0.96 voltios, mientras que en periodos prolongados (46 días) se determinaron tres etapas (etapa ascendente, etapa máxima, etapa estable) caracterizadas por un VCA promedio de 0.755, 0.987 y 0.76 voltios, respectivamente. Siendo la etapa estable la de mayor duración (29 días) y la que presentó una menor variación, por lo cual se considera que esta etapa es la ideal para establecer aplicaciones a una escala mayor.
- Se determinó que las características físico químicas del suelo no tuvieron cambios notables al finalizar la experimentación, por lo que se concluye que la operación de la PMFC construida no afecta las mismas y que el suelo utilizado es adecuado para la generación de electricidad. Por ello, se establecen como aplicaciones

ideales, el uso del sistema propuesto en iluminación de diodos LED como luces guía en zonas sin acceso a luz y rurales para la identificación de senderos o caminos, mediante la conexión en serie de celdas de combustible planta-microbianas de manera que se mantenga una separación física entre las mismas, utilizando distintas macetas o contenedores o colocando un aislante entre celdas.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar el experimento bajo condiciones controladas de laboratorio a fin de analizar con mayor precisión la relación entre la generación eléctrica y los parámetros del entorno.
- Reducir la resistencia interna eléctrica de la celda mediante el uso de otros materiales o configuraciones de sistema para obtener mejores rendimientos dado que la potencia máxima alcanzada por esta investigación representa al 41.1 por ciento de la potencia máxima teórica.
- Analizar el funcionamiento de la PMFC en periodos de tiempo más amplios con la finalidad de evaluar la sostenibilidad de la tecnología propuesta en el tiempo, así como las necesidades de mantenimiento del sistema.
- La tecnología propuesta es de aplicación práctica y de bajo costo, por lo cual, se recomienda evaluar su aplicación a escalas mayores o en campo.
- Realizar las mediciones de voltaje en circuito cerrado de manera permanente acoplado al uso de un instrumento de almacenamiento de información.
- Se recomienda utilizar macetas oscuras que no permitan el ingreso de la luz ya que esta puede influir en el crecimiento de las raíces de la planta. De esta manera se asegura que las plantas se desarrollen en un ambiente similar al natural.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BBC (British Broadcasting Corporation). 2015. Las plantas que "dieron luz" a los poblados de la selva amazónica en Perú (en línea). Reino Unido. Consultado 24 de enero 2018. Disponible en https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151109_tecnologia_plantalampar_as_energia_electrica_selva_indigenas_luz_peru_amazonas_utec_lb.
- Cabezas, A; Pommerenke, B; Boon, N; Friedrich, MW. 2015. *Geobacter*, *Anaeromyxobacter* and *Anaerolineae* populations are enriched on anodes of root exudate-driven microbial fuel cells in rice field soil (en línea). *Environmental Microbiology Reports* 7(3): 489-497. Consultado 2 de mayo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12277>.
- Carrette, L; Friedrich, A; Stimming, U. 2001. Fuel Cells - Fundamentals and Applications (en línea). *Fuel Cells* 1(1): 1- 39. Consultado 5 de enero 2018. Disponible en [https://doi.org/10.1002/1615-6854\(200105\)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1615-6854(200105)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G).
- Cervantes-Alcalá, R. 2012. Electricity generation in sediment plant microbial fuel cells (SPMFC) in warm climates using *Typha domingensis* Pers (en línea). *International Research Journal of Biotechnology* 3(9): 166-173. Consultado 15 de enero 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/303389161_Electricity_generation_in_sediment_plant_microbial_fuel_cells_SPMFC_in_warm_climates_using_Typha_domingensis_Pers.
- Dai, J; Wang, J; Chow, A; Conner, W. 2015. Electrical energy production from forest detritus in a forested wetland using microbial fuel cells (en línea). *GCB Bioenergy* 7: 244-252. Consultado 22 de enero 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1111/gcbb.12117>.
- Deng, H; Chen, Z; Zhao, F. 2012. Energy from plants and microorganisms: Progress in plant-microbial fuel cells (en línea). *ChemSusChem* 5: 1006-1011. Consultado 20 de diciembre 2017. Disponible en

- <https://doi.org/10.1002/cssc.201100257>.
- Dennis, PG; Miller, AJ; Hirsch, PR. 2010. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? (en línea). *FEMS Microbiol Ecol* 72: 313-327. Consultado 24 de enero 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x>.
 - Doherty, L; Zhao, Y; Zhao, X; Hu, Y; Hao, X; Xu, L; Liu, R. 2015. A review of a recently emerged technology: Constructed wetland - Microbial fuel cells (en línea). *Water Research* 85: 38-45. Consultado 2 de febrero 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.016>.
 - Esteve-Núñez, A. 2008. Bacterias productoras de electricidad (en línea). *Actualidad SEM* 45: 34-39. Consultado 12 de enero 2018. Disponible en <http://crinoidea.semicrobiologia.org/pdf/actualidad/45/Geobacter.pdf>.
 - Helder, H; Chen, W; van der Harst, E; Strik, D. 2013. Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell (en línea). *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 7: 52-64. Consultado 15 de diciembre 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1002/bbb.1373>.
 - Helder, M. 2012. Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell Electricity generation with living plants – from lab to application (en línea). PhD. thesis. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. 148 p. Consultado 10 de diciembre 2017. Disponible en <https://edepot.wur.nl/239054>.
 - Hong, S; Chang, I; Choi, Y; Chung, T. 2009. Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell (en línea). *Bioresource Technology* 100: 3029-3035. Consultado 25 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.030>.
 - Hubenova, Y; Mitov, M. 2012. Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in Direct Photosynthetic Plant Fuel Cell (en línea). *Bioelectrochemistry* 87: 185-191. Consultado 25 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2012.02.008>.
 - INEI. (2018). Pobreza monetaria afectó al 21,7% de la población del país durante el año 2017. Consultado 24 de enero 2018. Disponible en <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/pobreza-monetaria-afecto-al-217-de-la-poblacion-del-pais-durante-el-ano-2017-10711/>
 - IPCC. 2011. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. *Renewable Energy and Climate Change* (en línea). p. 174. Consultado 16 de junio

2018. Disponible en <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.
- Kaku, N; Yonezawa, N; Kodama, Y; Watanabe, K. 2008. Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field (en línea). *Applied Microbiology and Biotechnology* 79: 43-49. Consultado 14 de mayo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>.
 - Kumar, RV; Sarakonsri, T. 2010. Introduction to Electrochemical Cells (en línea). *High Energy Density Lithium Batteries: Materials, Engineering, Applications* 1: 1-25. Consultado 20 de mayo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1002/9783527630011.ch1>.
 - Kuzyakov, Y. 2002. Review : Factors affecting rhizosphere priming effects (en línea). *J. Plant Nutr, Soil Sci.* 165: 382-396. Consultado 10 de mayo 2018. Disponible en [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-%23).
 - Kuzyakov, Y; Schneckenberger, K. 2004. Review of estimation of plant rhizodeposition and their contribution to soil organic matter formation (en línea). *Archives of Agronomy and Soil Science* 50 (1): 115-132. Consultado 10 de mayo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1080/03650340310001627658>.
 - Lafitte, HR; Edmeades, GO. 1994. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize I . Selection criteria (en línea). *Field Crops Research* 39: 1-14. Consultado 20 de mayo 2018. Disponible en [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90066-3).
 - Larrosa, A; Lozano, LJ; Katuri, KP; Head, I; Scott, K; Godinez, C. 2009. On the repeatability and reproducibility of experimental two-chambered microbial fuel cells (en línea). *Fuel* 88:1852-1857. Consultado 25 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.04.026>.
 - Liu, S; Song, H; Li, X; Yang, F. 2013. Power generation enhancement by utilizing plant photosynthate in microbial fuel cell coupled constructed wetland system. *International Journal of Photoenergy* 2013: 1-10. Consultado 29 de mayo 2018. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1155/2013/172010>
 - Logan, B. 2008. *Microbial Fuel Cells. Voltage Generation* (en línea). John Wiley & Sons. p. 29-43. Consultado 10 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1002/9780470258590.ch3>.
 - Logan, B. 2008. *Microbial Fuel Cells. Power Generation* (en línea). John Wiley

- & Sons. p. 44-60. Consultado 12 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1002/9780470258590.ch4>.
- Logan, B. 2008. Microbial Fuel Cells. Introduction (en línea). John Wiley & Sons. p. 1-11. Consultado 2 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1002/9780470258590.ch1>.
 - Logan, B. 2009. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells (en línea). *Nature Reviews Microbiology* 7:375-381. Consultado 10 de abril 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1038/nrmicro2113>.
 - Logan, B.; Hamelers, B; Rozendal, R; Schroder, U; Keller, J; Freguia, S; Aelterman, P; Verstraete, W; Rabaey, K. 2006. Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology (en línea). *Environmental Science & Technology* 40(17): 5181-5192. Consultado 25 de junio 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1021/es0605016>.
 - Logan, B.; Regan, J. 2006. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells (en línea). *Trends in Microbiology* 14(12): 512-518. Consultado 5 de abril 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.10.003>.
 - Lovley, D. 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms (en línea). *Nature Reviews. Microbiology* 4: 497-508. Consultado 15 de abril 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1038/nrmicro1442>.
 - Lovley, D. 2008. The microbe electric: conversion of organic matter to electricity (en línea). *Current Opinion in Biotechnology* 19: 564-571. Consultado 22 de junio 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.10.005>.
 - MINEM. 2013. Plan de Acceso Universal a la Energía 2013-2022.
 - MINEM. 2015. Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) Periodo 2016-2025.
 - Mitov, M; Bardarov, I; Mandjukov, P; Hubenova, Y. 2015. Chemometrical assessment of the electrical parameters obtained by long-term operating freshwater sediment microbial fuel cells (en línea). *Bioelectrochemistry* 106: 105-114. Consultado en 20 de enero 2018. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26073675>.
 - Moqsud, M; Bushra, Q; Hannan, M; Omine, K. 2015. Assessment of factors influencing bioelectricity generation in paddy plant microbial fuel cell (en línea). *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science*. 4(12): 840-850.

- Consultado 20 de julio 2018. Disponible en <http://garj.org/garjas/12/2015/4/12/assessment-of-factors-influencing-bioelectricity-generation-in-paddy-plant-microbial-fuel-cells>.
- Moqsud, M; Omine, K; Yasufuku, N; Bushra, Q; Hyodo, M; Nakata, Y. 2014. Bioelectricity from kitchen and bamboo waste in a microbial fuel cell (en línea). *Waste Management and Research* 32(2): 124-130. Consultado 21 de agosto 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1177/0734242X13517160>.
 - Moqsud, M; Omine, K; Yasufuku, N; Hyodo, M; Nakata, Y. 2013. Microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation from organic wastes (en línea). *Waste Management* 33: 2465-2469. Consultado 2 de setiembre 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.026>.
 - Moqsud, M; Yoshitake, J; Bushra, Q; Hyodo, M; Omine, K; Strik, D. 2015. Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation (en línea). *Waste Management* 36: 63-69. Consultado 12 junio 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.004>.
 - Murillo, V; Garcia, E; Carcausto, D. 2015. Mapa Energético: Herramienta de gestión para el acceso universal a la energía. Proyecto FISE- Osinergmin, Perú.
 - Nabors, M. 2006. Introducción a la botánica. Pearson Educación. Madrid.
 - Nguyen, C. 2003. Rhizodeposition of organic C by plants : mechanisms and controls. *Agronomic* 23: 375-396.
 - OMS. 2018. 7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica. Consultado 24 de enero 2018. Disponible en <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>
 - Ritchie, S; Hanway, J. 1982. Como se desarrolla la planta de maíz.
 - Wild, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa.
 - Santoro, C; Babanova, S; Artyushkova, K; Atanassov, P; Greenman, J; Cristiani, P; Trasatti, S; Schuler, AJ; Li, B; Ieropoulos, I. 2014. The effects of wastewater types on power generation and phosphorus removal of microbial fuel cells (MFCs) with activated carbon (AC) cathodes (en línea). *International Journal of Hydrogen Energy* 39: 21796-21802. Consultado 20 de agosto 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.09.167>.
 - Strik, D; Hamelers, H; Snel, J; Buisman, C. 2012. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell (en línea). *International Journal of*

- Energy Research 32: 870- 876. Consultado 22 de agosto 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1002/er.1397>.
- Strik, D; Picot, M; Buisman, C; Barrière, F. 2013. PH and Temperature Determine Performance of Oxygen Reducing Biocathodes (en línea). *Electroanalysis* 25(3): 652-655. Consultado 10 de marzo 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1002/elan.201200358>.
 - Strik, D; Timmers, R; Helder, M; Steinbusch, K; Hamelers, H; Buisman, C. 2011. Microbial solar cells: Applying photosynthetic and electrochemically active organisms (en línea). *Trends in Biotechnology* 29(1): 41-49. Consultado 13 de abril 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.10.001>.
 - Vázquez-Larios, A; Esparza-García, F; Vázquez-Huerta, G; Solorza-Feria, O; Poggi-Varaldo, H. 2010. Determination of internal resistance of two types of microbial fuel cells by the polarization curve and impedance spectroscopy methods (en línea). *Journal of Biotechnology* 150: 144-145. Consultado 7 de junio 2018. Disponible en <https://doi.org/10.14447/jnmes.v14i2.117>.
 - Vincent, M; Hartemann, P; Engels-Deutsch, M. 2016. Antimicrobial applications of copper (en línea). *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 219(7): 585-591. Consultado 10 de agosto 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.06.003>.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Registro de mediciones de parámetros eléctricos y del entorno

Registro horario y estacional

Fecha	Estación climática	Hora	VCA de PMFC (v)	VCA de MFC (v)	Temperatura ambiental (°C)	Radiación (Watt/m ²)
15/09/2016	Invierno	9:00	0.991	0.964	16.4	65
15/09/2016	Invierno	10:00	0.999	0.964	16.7	107
15/09/2016	Invierno	11:00	1.004	0.957	16.8	148
15/09/2016	Invierno	12:00	0.998	0.959	17.4	158
15/09/2016	Invierno	13:00	0.982	0.954	17.7	237
15/09/2016	Invierno	14:00	0.984	0.952	19.1	321
15/09/2016	Invierno	15:00	0.99	0.953	19.3	326
15/09/2016	Invierno	16:00	0.986	0.955	19.0	216
15/09/2016	Invierno	17:00	0.979	0.958	17.7	97
15/09/2016	Invierno	18:00	0.973	0.959	16.8	13
15/09/2016	Invierno	19:00	0.981	0.952	16.3	0
15/09/2016	Invierno	20:00	0.976	0.952	16.1	0
15/09/2016	Invierno	21:00	0.973	0.955	16.0	0
15/09/2016	Invierno	22:00	0.981	0.956	16.0	0
15/09/2016	Invierno	23:00	0.982	0.957	15.9	0
16/09/2016	Invierno	0:00	0.98	0.956	15.8	0
16/09/2016	Invierno	1:00	0.975	0.957	15.5	0
16/09/2016	Invierno	2:00	0.97	0.950	15.4	0
16/09/2016	Invierno	3:00	0.978	0.950	15.2	0
16/09/2016	Invierno	4:00	0.989	0.955	15.0	0
16/09/2016	Invierno	5:00	0.982	0.954	14.9	0
16/09/2016	Invierno	6:00	0.984	0.954	15.0	0
16/09/2016	Invierno	7:00	0.987	0.966	15.0	2
16/09/2016	Invierno	8:00	1.000	0.966	15.3	31
3/11/2016	Primavera	9:00	1.01	0.961	20.5	450
3/11/2016	Primavera	10:00	1.003	0.945	20.4	597
3/11/2016	Primavera	11:00	1.007	0.949	21.6	622
3/11/2016	Primavera	12:00	0.995	0.948	22.6	386
3/11/2016	Primavera	13:00	0.986	0.95	23.3	871
3/11/2016	Primavera	14:00	0.985	0.949	22.5	790

Continuación...

3/11/2016	Primavera	15:00	0.993	0.954	22.7	659
3/11/2016	Primavera	16:00	0.987	0.949	21.4	474
3/11/2016	Primavera	17:00	0.99	0.955	20.5	257
3/11/2016	Primavera	18:00	0.99	0.951	18	65
3/11/2016	Primavera	19:00	0.993	0.959	16.5	0
3/11/2016	Primavera	20:00	0.989	0.941	15.9	0
3/11/2016	Primavera	21:00	0.993	0.941	15.6	0
3/11/2016	Primavera	22:00	0.985	0.946	15.1	0
3/11/2016	Primavera	23:00	0.982	0.93	14.1	0
4/11/2016	Primavera	0:00	0.975	0.931	13.9	0
4/11/2016	Primavera	1:00	0.97	0.936	13.6	0
4/11/2016	Primavera	2:00	0.976	0.939	13.5	0
4/11/2016	Primavera	3:00	0.98	0.94	13.3	0
4/11/2016	Primavera	4:00	0.975	0.942	13.2	0
4/11/2016	Primavera	5:00	0.977	0.943	14	0
4/11/2016	Primavera	6:00	0.978	0.948	15.1	0
4/11/2016	Primavera	7:00	0.98	0.953	15.8	35
4/11/2016	Primavera	8:00	0.998	0.957	17.2	93
3/01/2017	Verano	9:00	0.983	0.961	24.3	432
3/01/2017	Verano	10:00	0.984	0.957	25.5	661
3/01/2017	Verano	11:00	0.985	0.958	25.9	801
3/01/2017	Verano	12:00	0.974	0.958	26.5	627
3/01/2017	Verano	13:00	0.972	0.957	27.6	874
3/01/2017	Verano	14:00	0.959	0.952	27.2	933
3/01/2017	Verano	15:00	0.954	0.957	26.7	636
3/01/2017	Verano	16:00	0.973	0.951	26	681
3/01/2017	Verano	17:00	0.955	0.958	24.9	384
3/01/2017	Verano	18:00	0.951	0.957	23.4	84
3/01/2017	Verano	19:00	0.959	0.956	21.7	7
3/01/2017	Verano	20:00	0.961	0.954	20.7	0
3/01/2017	Verano	21:00	0.961	0.96	20.1	0
3/01/2017	Verano	22:00	0.956	0.952	19.6	0
3/01/2017	Verano	23:00	0.93	0.959	18.9	0
4/01/2017	Verano	0:00	0.931	0.95	19	0
4/01/2017	Verano	1:00	0.936	0.949	18.5	0
4/01/2017	Verano	2:00	0.939	0.957	18.4	0
4/01/2017	Verano	3:00	0.94	0.953	18.3	0
4/01/2017	Verano	4:00	0.942	0.957	18.9	0
4/01/2017	Verano	5:00	0.943	0.952	19.1	0
4/01/2017	Verano	6:00	0.948	0.955	19	0
4/01/2017	Verano	7:00	0.953	0.958	20.1	58
4/01/2017	Verano	8:00	0.957	0.954	20.3	131

Registro diario

Muestra	Medición	Fecha	Circuito abierto		Circuito cerrado	
			Voltaje (v)	Intensidad eléctrica (mA)	Voltaje (v)	Intensidad eléctrica (mA)
M1	1	20/01/2017	0.736	0.7	0.278	0.25
	2	23/01/2017	0.725	0.7	0.247	0.3
	3	25/01/2017	0.778	0.75	0.313	0.35
	4	27/01/2017	1.011	0.75	0.158	0.3
	5	30/01/2017	0.999	1	0.348	0.35
	6	1/02/2017	0.92	1	0.317	0.3
	7	3/02/2017	0.92	0.7	0.286	0.25
	8	6/02/2017	0.813	0.35	0.136	0.2
	9	8/02/2017	0.66	0.3	0.1	0.1
	10	10/02/2017	0.643	0.4	0.105	0.15
	11	13/02/2017	0.612	0.45	0.164	0.22
	12	15/02/2017	0.648	0.45	0.164	0.22
	13	17/02/2017	0.611	0.45	0.143	0.2
	14	20/02/2017	0.682	0.35	0.148	0.2
	15	22/02/2017	0.694	0.3	0.178	0.25
	16	24/02/2017	0.687	0.4	0.2	0.3
	17	27/02/2017	0.685	0.3	0.239	0.3
	18	1/03/2017	0.729	0.29	0.245	0.36
	19	3/03/2017	0.703	0.42	0.198	0.26
	20	6/03/2017	0.732	0.45	0.19	0.27
M3	1	20/01/2017	0.772	0.2500	0.2000	0.2500
	2	23/01/2017	0.787	0.1000	0.1040	0.1000
	3	25/01/2017	0.888	0.4500	0.2770	0.2500
	4	27/01/2017	1.057	0.4200	0.1710	0.2500
	5	30/01/2017	1.137	0.5000	0.1820	0.3000
	6	1/02/2017	0.947	0.2500	0.1340	0.2000
	7	3/02/2017	0.853	0.1500	0.0870	0.1000
	8	6/02/2017	0.710	0.1500	0.0800	0.1000
	9	8/02/2017	0.717	0.1000	0.0550	0.0500
	10	10/02/2017	0.835	0.1000	0.1890	0.2500
	11	13/02/2017	0.728	0.1000	0.0850	0.1000
	12	15/02/2017	0.868	0.2600	0.0480	0.0500
	13	17/02/2017	0.793	0.1500	0.0820	0.1000
	14	20/02/2017	0.772	0.2000	0.1280	0.1700
	15	22/02/2017	0.774	0.1000	0.1110	0.1500
	16	24/02/2017	0.742	0.1200	0.0880	0.0900
	17	27/02/2017	0.625	0.0150	0.0150	0.0150
	18	1/03/2017	0.584	0.0110	0.0140	0.0120
	19	3/03/2017	0.566	0.0030	0.0120	0.0100
	20	6/03/2017	0.540	0.0060	0.0070	0.0070

Continuación...

M4	1	20/01/2017	0.7490	0.5000	0.1950	0.2500
	2	23/01/2017	0.7410	0.5600	0.1700	0.3200
	3	25/01/2017	0.7770	0.8900	0.2600	0.3500
	4	27/01/2017	1.1280	0.7000	0.2740	0.3500
	5	30/01/2017	1.0700	0.7000	0.2910	0.3500
	6	1/02/2017	1.0520	0.6000	0.1940	0.2500
	7	3/02/2017	0.7660	0.3000	0.0970	0.1500
	8	6/02/2017	0.7920	0.3700	0.1800	0.2700
	9	8/02/2017	0.8970	0.5000	0.2800	0.3500
	10	10/02/2017	0.8510	0.4500	0.2000	0.2600
	11	13/02/2017	0.8550	0.3600	0.1380	0.2000
	12	15/02/2017	0.8480	0.4000	0.1950	0.2500
	13	17/02/2017	0.6400	0.2000	0.1660	0.2400
	14	20/02/2017	0.6030	0.3000	0.1150	0.1500
	15	22/02/2017	0.6290	0.2500	0.1210	0.1500
	16	24/02/2017	0.6240	0.2500	0.1570	0.2200
	17	27/02/2017	0.6920	0.2300	0.0830	0.1200
	18	1/03/2017	0.5730	0.0120	0.0130	0.0120
	19	3/03/2017	0.5770	0.0130	0.0130	0.0110
	20	6/03/2017	0.7600	0.0070	0.0070	0.0070
M5	1	20/01/2017	0.760	0.500	0.207	0.200
	2	23/01/2017	0.751	0.500	0.210	0.300
	3	25/01/2017	0.783	0.900	0.271	0.340
	4	27/01/2017	1.057	1.000	0.208	0.420
	5	30/01/2017	1.078	0.950	0.305	0.400
	6	1/02/2017	0.842	0.450	0.217	0.200
	7	3/02/2017	0.680	0.300	0.130	0.200
	8	6/02/2017	0.792	0.500	0.135	0.200
	9	8/02/2017	0.839	0.600	0.170	0.250
	10	10/02/2017	0.829	0.500	0.233	0.300
	11	13/02/2017	0.750	0.500	0.225	0.300
	12	15/02/2017	0.890	0.600	0.250	0.300
	13	17/02/2017	0.802	0.550	0.372	0.450
	14	20/02/2017	0.793	0.400	0.215	0.300
	15	22/02/2017	0.801	0.550	0.265	0.340
	16	24/02/2017	0.747	0.450	0.235	0.300
	17	27/02/2017	0.756	0.450	0.236	0.320
	18	1/03/2017	0.738	0.270	0.137	0.200
	19	3/03/2017	0.919	0.420	0.372	0.250
	20	6/03/2017	0.750	0.140	0.070	0.100

Continuación...

M9	1	20/01/2017	0.773	0.5	0.237	0.3
	2	23/01/2017	0.742	0.45	0.195	0.3
	3	25/01/2017	0.806	1.22	0.356	0.5
	4	27/01/2017	1.061	0.9	0.348	0.43
	5	30/01/2017	1.089	0.9	0.349	0.4
	6	1/02/2017	1.048	0.65	0.303	0.35
	7	3/02/2017	0.822	0.55	0.26	0.3
	8	6/02/2017	0.788	0.4	0.393	0.27
	9	8/02/2017	0.744	0.45	0.21	0.25
	10	10/02/2017	0.734	0.45	0.257	0.35
	11	13/02/2017	0.809	0.5	0.321	0.35
	12	15/02/2017	0.756	0.44	0.254	0.3
	13	17/02/2017	0.799	0.45	0.326	0.35
	14	20/02/2017	0.772	0.45	0.299	0.35
	15	22/02/2017	0.785	0.4	0.344	0.35
	16	24/02/2017	0.786	0.45	0.32	0.4
	17	27/02/2017	0.809	0.46	0.338	0.4
	18	1/03/2017	0.813	0.48	0.28	0.32
	19	3/03/2017	0.816	0.5	0.398	0.45
	20	6/03/2017	0.816	0.5	0.402	0.4
M12	1	20/01/2017	0.76	0.8	0.35	0.4
	2	23/01/2017	0.782	0.75	0.28	0.4
	3	25/01/2017	0.792	0.92	0.293	0.4
	4	27/01/2017	0.879	0.7	0.255	0.35
	5	30/01/2017	1.029	0.45	0.349	0.25
	6	1/02/2017	0.891	0.25	0.247	0.18
	7	3/02/2017	0.709	0.1	0.061	0.07
	8	6/02/2017	0.8	0.5	0.18	0.3
	9	8/02/2017	0.758	0.35	0.148	0.2
	10	10/02/2017	0.747	0.65	0.247	0.35
	11	13/02/2017	0.752	0.3	0.117	0.18
	12	15/02/2017	0.749	0.35	0.145	0.2
	13	17/02/2017	0.8	0.35	0.15	0.2
	14	20/02/2017	0.785	0.35	0.183	0.25
	15	22/02/2017	0.785	0.32	0.183	0.25
	16	24/02/2017	0.687	0.3	0.182	0.25
	17	27/02/2017	0.742	0.4	0.144	0.19
	18	1/03/2017	0.653	0.34	0.12	0.19
	19	3/03/2017	0.762	0.22	0.189	0.26
	20	6/03/2017	0.72	0.2	0.164	0.24

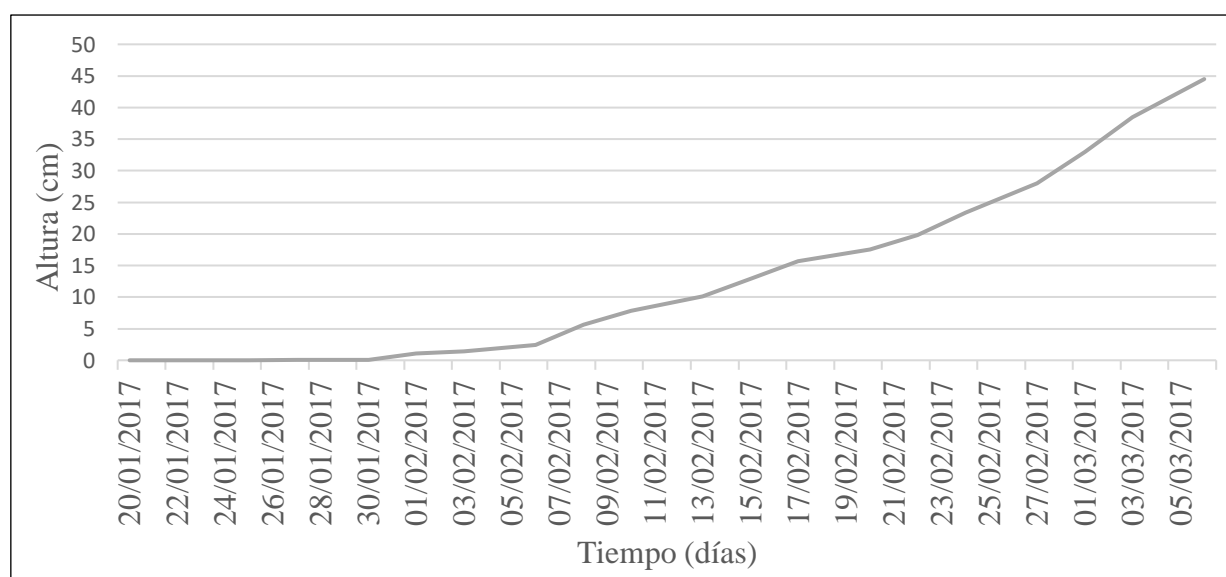
FUENTE: Elaboración Propia.

Anexo 2: Crecimiento de plantas de maíz de muestras

Crecimiento de muestra M1

Fecha	Altura (cm)	Tamaño hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento
20/01/2017	0	0	VE
23/01/2017	0	2.8	V2
25/01/2017	0	3.4	V2
27/01/2017	0.1	3.8	V2
30/01/2017	0.1	4.3	V2
1/02/2017	1.1	4.6	V3
3/02/2017	1.4	5.9	V3
6/02/2017	2.4	7.5	V4
8/02/2017	5.6	8.2	V5
10/02/2017	7.8	10.3	V6
13/02/2017	10.1	16.4	V6
15/02/2017	12.9	17.8	V7
17/02/2017	15.7	23.2	V7
20/02/2017	17.5	28.2	V8
22/02/2017	19.8	31.2	V8
24/02/2017	23.4	34	V9
27/02/2017	28	39.5	V10
1/03/2017	33	43.1	V11
3/03/2017	38.5	50	V12
6/03/2017	44.5	52	V12

FUENTE: Elaboración propia

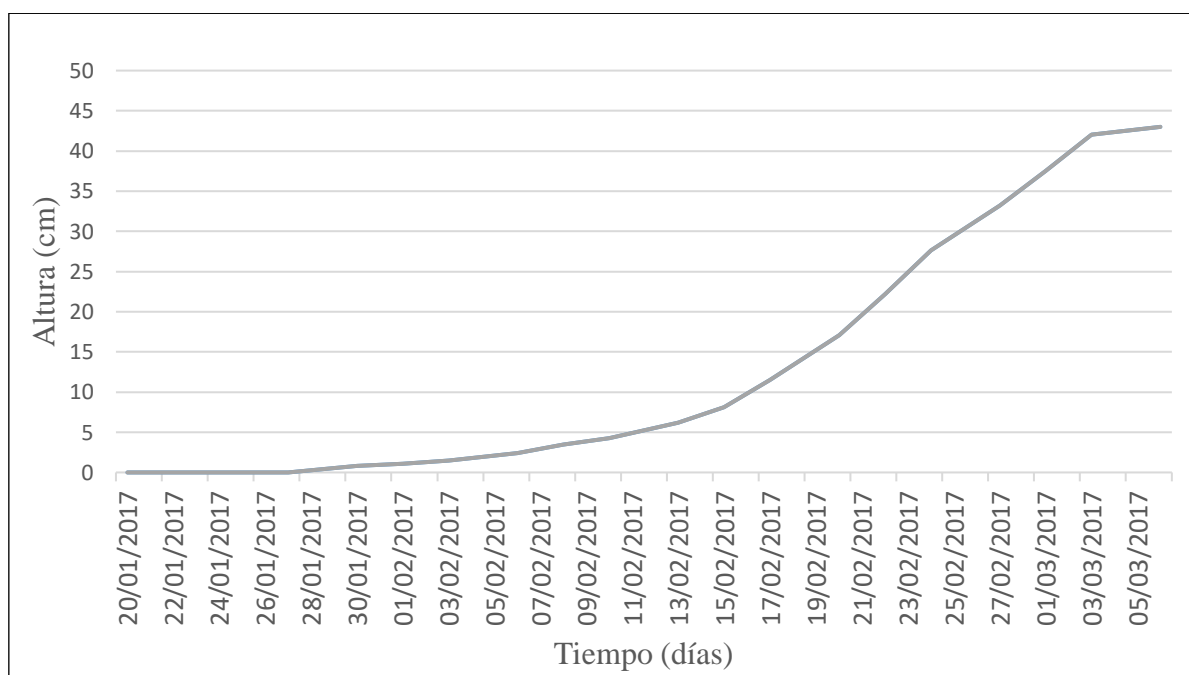


FUENTE: Elaboración propia

Crecimiento de muestra M3

Fecha	Altura (cm)	Tamaño hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento
20/01/2017	0	0	VE
23/01/2017	0	0.4	VE
25/01/2017	0	2	V2
27/01/2017	0	4.2	V2
30/01/2017	0.8	6.1	V2
1/02/2017	1.1	7.2	V2
3/02/2017	1.5	11	V3
6/02/2017	2.4	12.2	V3
8/02/2017	3.5	13.5	V4
10/02/2017	4.3	15.2	V5
13/02/2017	6.2	16	V6
15/02/2017	8.1	21	V7
17/02/2017	11.5	24.3	V7
20/02/2017	17.1	29.4	V8
22/02/2017	22.2	33.1	V9
24/02/2017	27.6	37.3	V9
27/02/2017	33.2	41.2	V10
1/03/2017	37.5	45.5	V11
3/03/2017	42	50	V12
6/03/2017	43	52	V13

FUENTE: Elaboración propia

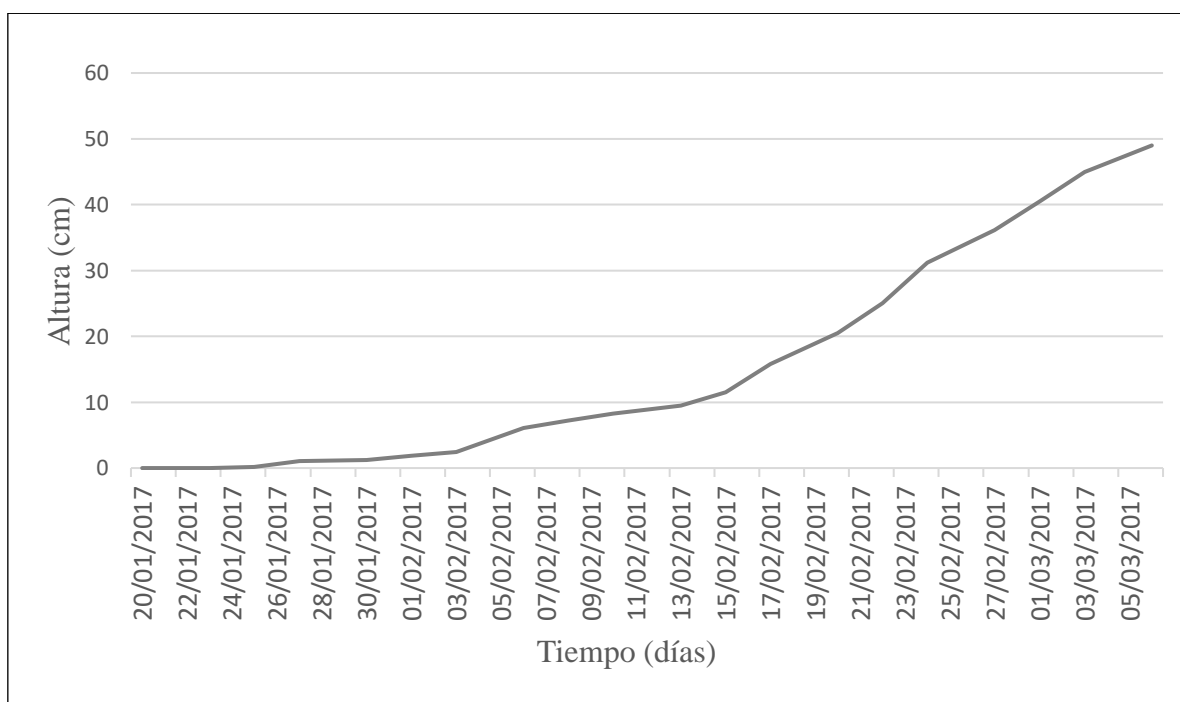


FUENTE: Elaboración propia

Crecimiento de muestra M4

Fecha	Altura (cm)	Tamaño hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento
20/01/2017	0	1	V1
23/01/2017	0	1.8	V1
25/01/2017	0.2	2.1	V1
27/01/2017	1.1	2.5	V2
30/01/2017	1.2	3.2	V3
1/02/2017	1.9	4.8	V3
3/02/2017	2.4	6.5	V4
6/02/2017	6.1	8.4	V4
8/02/2017	7.2	9.8	V5
10/02/2017	8.3	10.3	V6
13/02/2017	9.5	13.5	V7
15/02/2017	11.5	15.6	V7
17/02/2017	15.8	18.9	V8
20/02/2017	20.5	22.1	V8
22/02/2017	25	24.3	V8
24/02/2017	31.2	28.8	V9
27/02/2017	36.1	32.4	V9
1/03/2017	40.5	37.2	V10
3/03/2017	45	45	V10
6/03/2017	49	51	V11

FUENTE: Elaboración propia

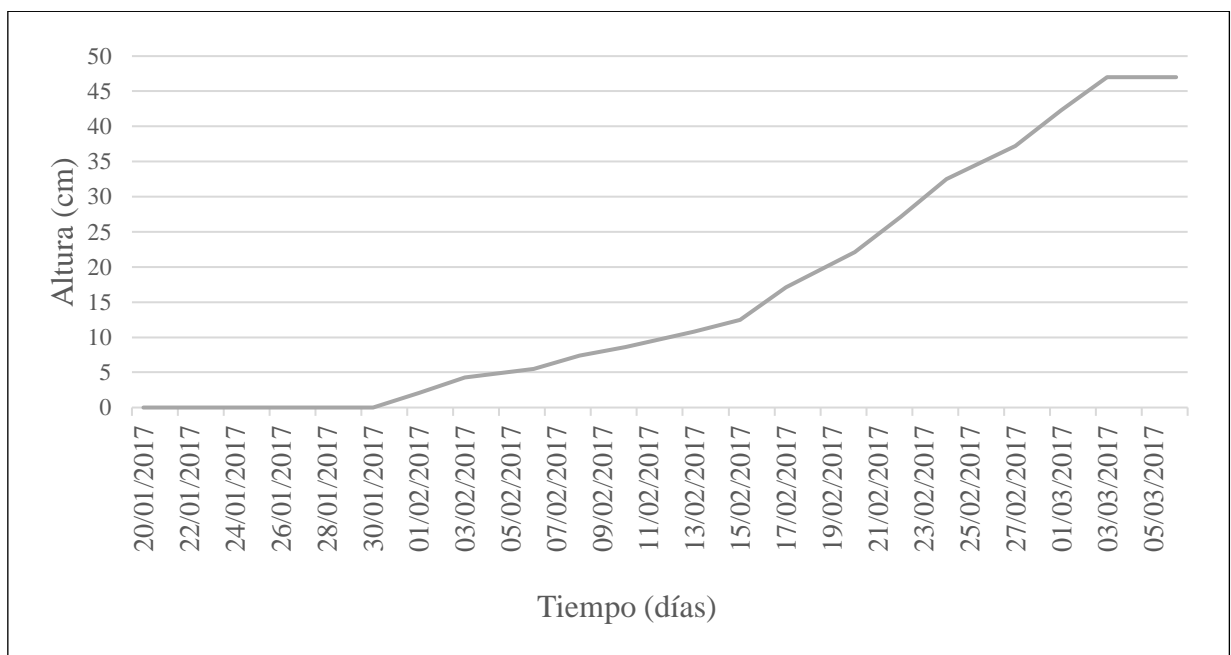


FUENTE: Elaboración propia

Crecimiento de muestra M5

Fecha	Altura (cm)	Tamaño hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento
20/01/2017	0	0	VE
23/01/2017	0	0.5	VE
25/01/2017	0	1.1	V1
27/01/2017	0	2	V2
30/01/2017	0	3.1	V2
1/02/2017	2.1	5.2	V3
3/02/2017	4.3	7.1	V4
6/02/2017	5.5	9.2	V4
8/02/2017	7.4	11.9	V4
10/02/2017	8.6	14.2	V5
13/02/2017	10.8	15.1	V6
15/02/2017	12.5	17.2	V6
17/02/2017	17.1	23.7	V7
20/02/2017	22.1	31.2	V7
22/02/2017	27.1	36.2	V7
24/02/2017	32.5	41.1	V8
27/02/2017	37.2	46.3	V8
1/03/2017	42.3	52.4	V10
3/03/2017	47	59	V11
6/03/2017	47	62	V12

FUENTE: Elaboración propia

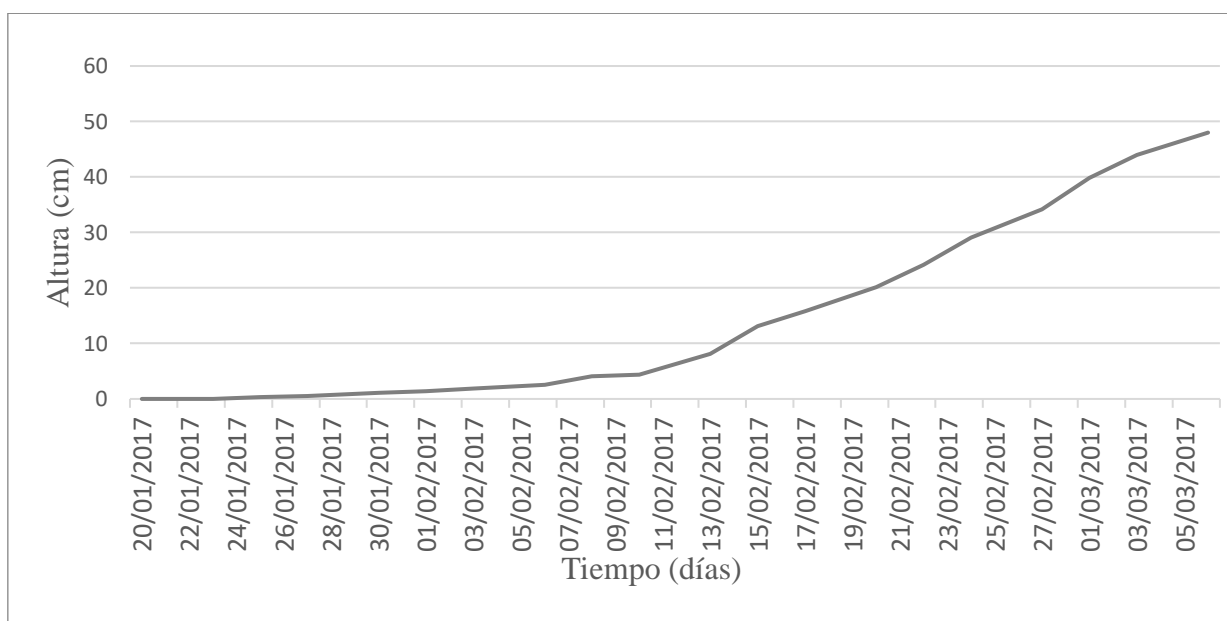


FUENTE: Elaboración propia

Crecimiento de muestra M9

Fecha	Altura (cm)	Tamaño hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento
20/01/2017	0	0	VE
23/01/2017	0	1.1	V1
25/01/2017	0.3	1.5	V2
27/01/2017	0.5	3.2	V2
30/01/2017	1.1	4.2	V2
1/02/2017	1.4	5.4	V3
3/02/2017	1.9	7.5	V4
6/02/2017	2.5	9.2	V5
8/02/2017	4.1	10.1	V5
10/02/2017	4.4	13.2	V5
13/02/2017	8.1	16.7	V5
15/02/2017	13.1	20.1	V6
17/02/2017	15.8	24.2	V7
20/02/2017	20.1	28.8	V8
22/02/2017	24.2	33.2	V8
24/02/2017	29.1	36.1	V9
27/02/2017	34.2	41.1	V9
1/03/2017	39.8	45.2	V10
3/03/2017	44	48	V11
6/03/2017	48	52	V12

FUENTE: Elaboración propia

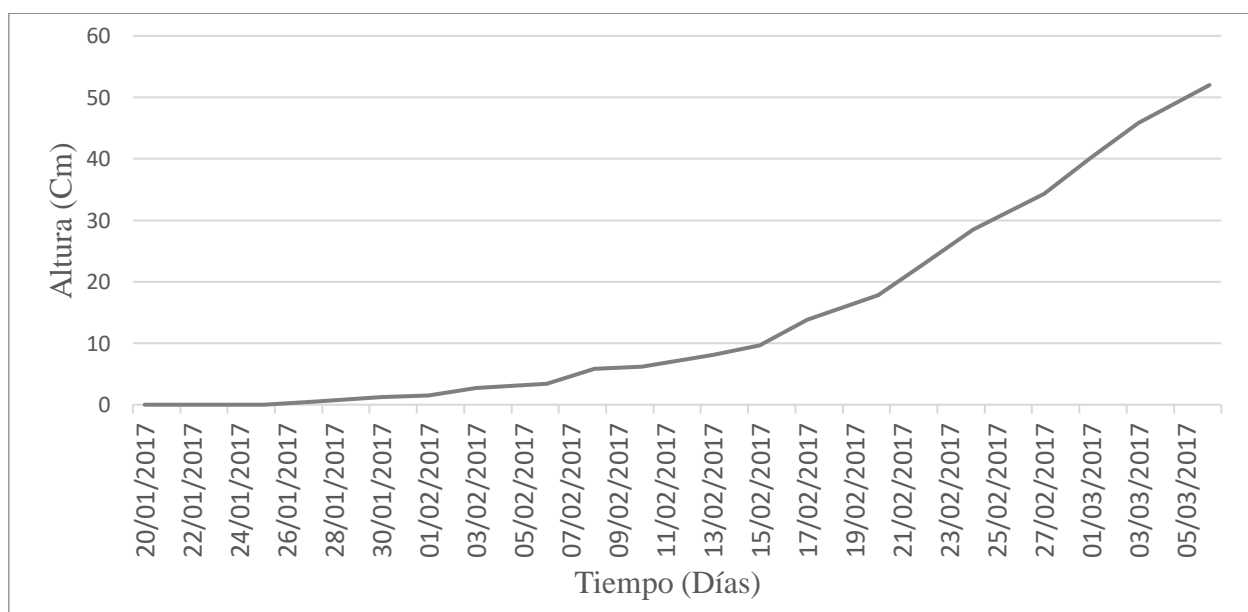


FUENTE: Elaboración propia

Crecimiento de muestra M12

Fecha	Altura (cm)	Tamaño hoja más larga (cm)	Etapas de crecimiento
20/01/2017	0	0	V1
23/01/2017	0	0	V2
25/01/2017	0	1.5	V3
27/01/2017	0.5	2.3	V3
30/01/2017	1.2	4.1	V3
1/02/2017	1.5	5.6	V3
3/02/2017	2.7	8.2	V4
6/02/2017	3.4	10	V4
8/02/2017	5.8	11.8	V5
10/02/2017	6.2	12.9	V5
13/02/2017	8.1	14.4	V6
15/02/2017	9.7	19.2	V7
17/02/2017	13.8	24.3	V7
20/02/2017	17.8	29.1	V8
22/02/2017	23.1	35.2	V8
24/02/2017	28.5	41	V8
27/02/2017	34.3	45.2	V9
1/03/2017	40.2	49.5	V10
3/03/2017	45.8	54	V11
6/03/2017	52	60	V11

FUENTE: Elaboración propia



FUENTE: Elaboración propia

Anexo 3: Análisis de caracterización físico química de suelo - CERPER

MUESTRA M1



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Codigo :	Muestra M1
Fecha de recepción	2017-03-15	Fecha de muestreo	2017-03-14
Fecha de inicio del ensayo	2017-03-16	Fecha de término del ensayo	2017-03-23
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	*C.E (ds/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g						M.O. %	CO ₂ Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg								
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SUMA DE CATIONES			C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Muestra M1	7.95	19.34	290.30	8584.00	82	14	4	Arena Franca	8.73	4.83	4.07	0.47	<0,01	18.10	18.10	10.58	3.20	3208.00	840.30	2374.00	3.94	3.78	48.28	11.98	35.82

(*) Pasta Saturada

MUESTRA M3



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Codigo :	Muestra M3
Fecha de recepción	2017-03-15	Fecha de muestreo	2017-03-14
Fecha de inicio del ensayo	2017-03-16	Fecha de término del ensayo	2017-03-23
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	°C.E (da/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g							M.O. %	CO ₂ Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg							
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SUMA DE CATIONES	C.I.C.			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Muestra M3	7.85	21.12	287.90	6802.00	80	18	2	Arena Franca	8.48	4.94	3.84	0.42	<0,01	17.68	17.68	8.32	3.51	3297.00	962.30	2266.00	4.75	3.65	48.03	8.85	35.10

(*) Pasta Saturada

MUESTRA M4



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Código :	Muestra M4
Fecha de recepción	2017-03-15	Fecha de muestreo	2017-03-14
Fecha de inicio del ensayo	2017-03-16	Fecha de término del ensayo	2017-03-23
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	°C.E (ds/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g						M.O. %	CO ₂ Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg								
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺	SUMA DE CATIONES			C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Muestra M4	7.90	21.59	274.90	8668.00	80	16	4	Arena Franca	7.18	4.26	3.36	0.30	<0,01	15.10	15.10	12.39	3.43	3314.00	868.70	2121.00	4.74	3.48	42.05	11.39	33.96

(*) Pasta Saturada

MUESTRA M5



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Codigo :	Muestra M5
Fecha de recepción	2017-03-15	Fecha de muestreo	2017-03-14
Fecha de inicio del ensayo	2017-03-16	Fecha de término del ensayo	2017-03-23
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	°C.E (ds/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g						M.O. %	CO ₂ Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg								
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SUMA DE CATIONES			C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Muestra M5	7.88	20.34	264.30	6486.00	82	16	2	Arena Franca	9.73	5.38	3.65	0.29	<0,01	19.05	19.05	9.81	3.17	3341.00	846.30	1564.00	4.71	3.94	47.09	17.75	35.35

(*) Pasta Saturada

MUESTRA M9



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Codigo :	Muestra M9
Fecha de recepción	2017-03-15	Fecha de muestreo	2017-03-14
Fecha de inicio del ensayo	2017-03-16	Fecha de término del ensayo	2017-03-23
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	*C.E (ds/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g						M.O. %	CO ₂ Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg								
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SUMA DE CATIONES			C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Muestra M9	7.96	20.58	287.60	7109.00	100	0	0	Arena	11.18	5.86	3.68	0.25	<0,01	20.97	20.97	8.43	3.83	3497.00	924.70	1563.00	5.17	4.04	41.63	12.16	36.45

(*) Pasta Saturada

MUESTRA M12



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Codigo :	Muestra M12
Fecha de recepción	2017-03-15	Fecha de muestreo	2017-03-14
Fecha de inicio del ensayo	2017-03-16	Fecha de término del ensayo	2017-03-23
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	°C.E (ds/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g						M.O. %	CO ₂ Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg								
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SUMA DE CATIONES			C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Muestra M12	7.89	20.82	299.90	6710.00	84	14	2	Arena Franca	12.04	6.01	3.73	0.28	<0,01	22.06	22.06	8.95	3.89	3414.00	881.70	1236.00	5.40	3.73	43.53	12.41	34.11

(*) Pasta Saturada

MUESTRA INICIAL



PROTOCOLO CERPER

Solicitante	Universidad Nacional Agraria La Molina	Fundo:	
Domicilio Legal		Cultivo :	
Procedencia		Codigo :	Tierra Preparada
Fecha de recepción	2017-01-17	Fecha de muestreo	
Fecha de inicio del ensayo	2017-01-18	Fecha de término del ensayo	2017-01-25
Identificado con H/S	17000728	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	*C.E (ds/m)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g						M.O. %	CO ₂ /Ca %	ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg								
					%ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺	SUMA DE CATIONES			C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Tierra Preparada	8.09	21.51	427.00	7494.00	86	12	2	Arena	8.80	4.69	4.91	0.67	<0,01	19.07	19.07	10.32	3.36	4748.00	1011.00	1372.00	13.37	4.61	61.61	24.40	36.78

(*) Pasta Saturada

Anexo 4: Análisis especial de Suelo-LASPAF



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE AGRONOMIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : ARACELLI RAMOS PEREZ-EGAÑA
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA
REFERENCIA : H.R. 57789
BOLETA : 128
FECHA : 06/03/2017

Número Muestra		C %
Lab	Claves	
1709	Muestra Inicial	5.92

Dr. Sady García Bendejú
Jefe del Laboratorio



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : ARACELLI RAMOS PEREZ EGAÑA
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ LA MOLINA
REFERENCIA : H.R. 58057
BOLETA : 182
FECHA : 06/04/2017

Lab	Número Muestra	C %
	Claves	
2368	Muestra M1	6.77
2369	Muestra M2	5.51
2370	Muestra M3	7.51
2371	Muestra M4	5.91
2372	Muestra M5	8.92
2373	Muestra M6	5.42
2374	Muestra M7	6.83
2375	Muestra M8	5.56
2376	Muestra M9	6.06
2377	Muestra M10	4.78
2378	Muestra M11	6.56
2379	Muestra M12	5.61



Sally García Bendezú
Jefe del Laboratorio

Anexo 5: Análisis de laboratorio de microbiología - marino Tabusso



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Av. La Molina s/n La Molina - Lima - Perú
Teléfono: 6147800 anexo 274



INFORME DE ENSAYO Nº 1703110- LMT

SOLICITANTE : ARACELLI RAMOS PEREZ AGAÑA

DESCRIPCIÓN DEL OBJETO ENSAYADO

MUESTRA : SUELO
1703110) M1

PROCEDENCIA : Tierra preparada para maceta UNALM
TIPO DE ENVASE : Botella de plástico
CANTIDAD DE MUESTRA : 01 muestra x 01 und. x 500 g. aprox.
ESTADO Y CONDICIÓN : En buen estado y cerrado
FECHA DE MUESTREO : 2017 - 03 - 10
FECHA DE RECEPCIÓN : 2017 - 03 - 10
FECHA DE INICIO DE ENSAYO : 2017 - 03 - 10
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO : 2017 - 04 - 06

RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA

Análisis Microbiológico	Muestra 1703110
¹ Recuento de aerobios mesófilos viables (UFC/g)	39 x 10 ⁵
¹ Recuento de anaerobios (UFC/mL)	31 x 10
² Enumeración de <i>Pseudomonas</i> sp. (NMP/g)	< 3
³ Enumeración de bacterias fijadoras de vida libre (NMP/mL)	23 x 10
⁴ Actividad microbiana (mg CO ₂ .mL ⁻¹ .h ⁻¹)	0.0184

NOTA: El valor < 10² indica ausencia de microorganismos en ensayo.

Métodos:

¹International Commission on Microbiological Specifications for Foods. 1983. 2da Ed. Vol 1 Part II, (Trad. 1988) Reimp. 2000. Editorial Acribia.

²American Public Health Association. 1992. Compendium of methods for the Microbiological Examination of foods. 3rd Ed. Chapter 13.

³Zapater J. 1975. Evaluación en el maíz del coeficiente rizósfera-suelo (R/S) referidos a bacterias libres fijadoras de N₂. Anales científicos de la UNALM 13:45-57.

⁴Anderson J. 1982. Soil respiration. En: Page A., Miller R., Kenney D. (Eds.) Methods of Soil Analysis Part II. Chemical and Microbiological

Observaciones:

Informe de ensayo emitido sobre la base de resultados de nuestro laboratorio en muestras proporcionadas por el solicitante.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin nuestra autorización escrita.

Validez del documento:

Este documento tiene validez sólo para la muestra descrita.

La Molina, 07 de abril de 2017



DRA. DORIS ZÚÑIGA DÁVILA

Jefe del Laboratorio de Ecología Microbiana
y Biotecnología "Marino Tabusso"
Universidad Nacional Agraria La Molina

Teléfono: 6147800 anexo 274

E-mail: lmt@lamolina.edu.pe

LABORATORIO DE ECOLOGIA MICROBIANA Y BIOTECNOLOGIA "MARINO TABUSSO"

☐ (511) 614-7800 anexo 274 - E-mail: lmt@lamolina.edu.pe