

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Generación de bioelectricidad a partir de plantas acuáticas:
Eichhornia crassipes, Lemnaceae Spirodela y Pistia stratiotes en
celdas de combustibles microbiana (CCM-P)**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Aldo Marcelo Vargas Tapia
Jonathan Gabriel Paz Gallegos

Asesor:

Mg. Joel Hugo Fernandez Rojas

Lima, 16 de mayo de 2023

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

Mg. Ing. Joel Hugo Fernandez Rojas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“GENERACIÓN DE BIOELECTRICIDAD A PARTIR DE PLANTAS ACUÁTICAS: EICHHORNIA CRASSIPES, LEMNACEAE SPIRODELA Y PISTIA STRATIOTES EN CELDAS DE COMBUSTIBLES MICROBIANA (CCM-P)”** constituye la memoria que presenta el (la) / los Bachiller(es) (Aldo Marcelo Vargas Tapia y Jonathan Gabriel Paz Gallegos) para obtener el título Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 16 días del mes de mayo del año 2023.



Joel Hugo Fernandez Rojas

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los **16 días día(s) del mes de mayo del año 2023 siendo las 11:30 horas**, se reunieron en modalidad virtual u online sincrónica, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Mg. Milda Amparo Cruz Huaranga**, el secretario: **Ing. Orlando Alan Poma Porras**, y los demás miembros: **Mg. Jackson Edgardo Pérez Carpio y el Ing. Cesar Asbel Aranda Castillo**, y el asesor **Mg. Joel Hugo Fernández Rojas**, con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Generación de bioelectricidad a partir de plantas acuáticas: Eichhornia crassipes, Lemnaceae Spirodela y Pistia stratiotes en celdas de combustibles microbiana (CCM-P)"

de el(los)/la(las) bachiller/es: a) **ALDO MARCELO VARGAS TAPIA**

.....b) **JONATHAN GABRIEL PAZ GALLEGOS**

conducente a la obtención del título profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**

(Nombre del Título profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **ALDO MARCELO VARGAS TAPIA**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	19	A	EXCELENTE	EXCELENCIA


Candidato (b): **JONATHAN GABRIEL PAZ GALLEGOS**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
APROBADO	19	A	EXCELENTE	EXCELENCIA

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente
Mg. Milda Amparo
Cruz Huaranga



Secretario
Ing. Orlando Alan
Poma Porras

Asesor
Mg. Joel Hugo
Fernandez Rojas

Miembro
Mg. Jackson Edgardo
Pérez Carpio

Miembro
Ing. Cesar Asbel
Aranda Castillo

Candidato/a (a)
Aldo Marcelo

Candidato/a (b)
Jhonatan Gabriel

Generación de bioelectricidad a partir de plantas acuáticas: *Eichhornia crassipes*, *Lemnaceae spirodela* y *Pistia stratiotes* en celdas de combustibles microbiana (CCM-P)

Bioelectricity generation from aquatic plants: *Eichhornia crassipes*, *Lemnaceae spirodela* and *Pistia stratiotes* in microbial fuel cells (MFC-P)

Aldo Marcelo Vargas Tapia¹, Jonathan Gabriel Paz Gallegos¹ y Hugo Fernandez¹

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Carretera Central Km 19.5 Ñaña, Chosica, Lima, Perú.

*Autor para correspondencia; aldovargas@upeu.edu.pe y gabriepaz@upeu.edu.pe

RESUMEN

La demanda de energías renovables es creciente en nuestros días. En el presente trabajo se evaluó la generación de Bioelectricidad a partir de tres especies de plantas acuáticas: *Eichhornia crassipes*, *Lemnaceae spirodela* y *Pistia stratiotes* en Celdas de combustibles microbiana (CCM-P) y se determinó cuál de ellas fue la más eficiente en la generación de energía. El diseño experimental fue “Diseño de Bloques Completamente Aleatorio” con tres tratamientos en cuatro periodos de tiempo diferentes 0, 30, 45, 60 días, con el propósito de comparar la producción de energía generada por las tres celdas de combustible microbianas y la remoción de los macronutrientes con una confiabilidad del 95%; se construyeron tres CCM-P en las que se colocaron las tres especies de plantas las cuales tuvieron mecanismos de adaptación, crecimiento y reproducción. Se analizó la biodegradación de Nitrógeno, Fósforo, Potasio y Materia Orgánica. También a partir del voltaje (V), se logró obtener la Intensidad de Corriente (mA) generada por cada CCM-P siendo la Lechuga de Agua la de mayor generación (0.05 mA) seguida del Jacinto de agua (0.02 mA) y finalmente la Lenteja de agua (0.01 mA); así mismo se obtuvo la Densidad de Potencia (DP) para cada CCM-P, siendo la Lechuga de Agua la que generó mayor DP (0.06 mW/m²), seguida del Jacinto de Agua (0.02 mW/m²) y por último la Lenteja de agua (5.14e-4 mW/m²), llegando a determinar que la Lechuga de agua fue la más eficiente en la generación de Bioelectricidad.

Palabras clave: Celdas de Combustible Microbianas, Bioelectricidad, Biodegradación, Especies Acuáticas.

ABSTRACT

The demand for renewable energy is growing nowadays. In the present work, the generation of Bioelectricity from three species of aquatic plants was evaluated: *Eichhornia crassipes*, *Lemnaceae spirodela* and *Pistia stratiotes* in Microbial Fuel Cells (CCM-P) and it was determined which of them was the most efficient in the generation. of energy. The experimental

design was "Completely Random Block Design" with three treatments in four different time periods 0, 30, 45, 60 days, with the purpose of comparing the energy production generated by the three microbial fuel cells and the removal of macronutrients with a reliability of 95%; Three CCM-P were built in which the three plant species were placed, which had adaptation, growth and reproduction mechanisms. The biodegradation of Nitrogen, Phosphorus, Potassium and Organic Matter was analyzed. Also from the voltage (V), it was possible to obtain the Current Intensity (mA) generated by each CCM-P being the Water Lettuce the one with the highest generation (0.05 mA) followed by the Water Hyacinth (0.02 mA) and finally the Duckweed (0.01 mA); Likewise, the Power Density (DP) was obtained for each CCM-P, being the Water Lettuce the one that generated the highest DP (0.06 mW/m²), followed by the Water Hyacinth (0.02 mW/m²) and finally the Lentil. of water (5.14e-4 mW/m²), arriving to determine that the Lettuce of water was the most efficient in the generation of Bioelectricity.

Keywords: Microbial Fuel Cells, Bioelectricity, Biodegradation, Aquatic Species.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías depende en su mayoría del aprovechamiento de dichas fuentes, entre ellas: El carbón, el petróleo, la energía nuclear, el gas natural, etc. Lamentablemente, la demanda excesiva de estas energías ha puesto en riesgo la salud de muchos seres humanos, provocando afecciones, tales como: enfermedades respiratorias, bronquitis crónica, tos crónica, crisis aguda de asma, mortalidad crónica, enfermedades cardiovasculares y mortalidad aguda (García, Corredor, Calderón, & Gómez, 2013). Estas fuentes de energía también representan una amenaza para los seres vivos, los ecosistemas y el planeta en general debido a los impactos negativos causados por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), ozono, etc (Universidad Nacional de Educación a Distancia. UNED, 2016). Debido a esto, muchos investigadores, han buscado formas de reemplazar el uso de estas fuentes incorporando métodos amigables con el ambiente.

Entre las muchas alternativas desarrolladas, la tecnología de las Celdas de Combustible Microbianas (CCM) para la producción de bioenergía, es una de las más estudiadas en las últimas décadas (Pant, Bogaert, Diels, & Vanbroekhoven, 2010). Una CCM, es un sistema que consta de dos cámaras unidas entre sí mediante una membrana semipermeable o un puente salino que permite el paso de protones de una cámara a la otra (Rozo et al., 2007). En la primera cámara se coloca un electrodo anódico y en la segunda un electrodo catódico. Los electrodos son una parte fundamental de las CCM, ya que están involucrados en la formación de biopelículas por parte de los microorganismos y la transferencia de electrones gracias a los electrolitos presentes en el sistema (Du, Li, & Gu, 2007).

El proceso de generación de bioenergía en las CCM se da de la siguiente manera: en el primer compartimento se lleva a cabo un proceso bioquímico en el que un grupo de microorganismos catalizan subproductos de fuentes de carbono, y transforman los compuestos orgánicos en electricidad (Yong et al., 2012). En este proceso los microorganismos liberan electrones, los cuales son transferidos al electrodo anódico en vez de cederlos al oxígeno (aceptor natural de electrones). Una vez que estos se encuentran en el electrodo, son transferidos a través de un circuito externo a una cámara catódica, donde se encuentra ubicado el segundo electrodo; en esta cámara los electrones se combinan con los protones, y el acepto de electrones para producir agua (Li, Zhang, Zeng, & Lei, 2009).

Por lo general, este sistema es realizado de forma anaerobia a partir de agua residual empleada como sustrato para el desarrollo microbiano y la producción de electricidad. Sin embargo, con el propósito de mejorar su funcionamiento, se ha indagado sobre la posibilidad de realizar adaptaciones que permitan al sistema ser mucho más eficiente. Para ello, se ha intentado aprovechar la energía proveniente de las plantas por medio de un sistema que lleva el nombre de “Celda de Combustible Microbiana de la Planta (CCM-P)”, propuesto por Strik, Hamelers, Snel, & Buisman, 2008.

Este sistema se enfoca en la capacidad bacteriana para generar electricidad a través de la oxidación de compuestos orgánicos junto con la descomposición de los mismos en la rizósfera de las plantas, transformando la energía solar en energía eléctrica mediante la oxidación de rizodepósitos a través de bacterias electroquímicamente activas. En otras palabras, las plantas producen rizodepósitos, principalmente en forma de hidratos de carbono, donde los microorganismos se encargan de convertirlos en energía eléctrica a través de la CCM (Timmers, Strik, Hamelers, & Buisman, 2010). Por ello, se trabajó con tres especies de plantas acuáticas: Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de agua (*Lemnaceae Spirodela*) y Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*), cuyo objetivo fue lograr la generación de Bioelectricidad a partir de Plantas Acuáticas: *Eichhornia Crassipes*, *Nymphaea* Spp. Y *Pistia Stratiotes* En Celdas De Combustibles Microbiana (CCM-P)

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales empleados para la elaboración de CCM

Para la elaboración de las CCM-P se utilizaron: 6 organizadores plásticos con una capacidad de 50 litros respectivamente (23.20 cm³); 3 tubos de PVC de 4 pulgadas y 8 cm de longitud, silicona en barra transparente, teflón y taípe negro, Agar Agar al 5% y NaCl al 10% para la elaboración de 3 puentes salinos; carbones vegetales como electrodos; alambre de cobre para la transferencia de electrones; agua residual para los compartimentos anódicos obtenida de estanques ubicados en el barrio de Monserrate, sector Conocoto; Agua destilada para los compartimentos catódicos y tres especies acuáticas: Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de agua (*Lemnaceae Spirodela*) y Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*). Estas especies acuáticas fueron adquiridas de la siguiente manera: Los Jacintos de agua se obtuvieron del Jardín Botánico del “Parque de La Carolina” ubicado al norte de Quito, entre la Avenida Amazonas y Naciones Unidas; mientras que las Lechugas de Agua y las Lentejas de Agua fueron obtenidas del acuario botánico “Aqua Life” ubicado en el sector de Carapungo al norte de la ciudad de Quito en las calles: De los Ciruelos y De las Acacias, 170155. Las plantas fueron trasladadas a la zona del proyecto y se las sometió a un proceso de aclimatación a las condiciones climáticas del sector. Se diseñaron tres sistemas de CCM-P para la generación de bioelectricidad a partir de los especímenes de plantas adquiridos. Estos sistemas fueron instalados en el área del proyecto y fueron monitoreados constantemente durante el tiempo de operación. Se siguió el siguiente proceso (**fig. 1**).

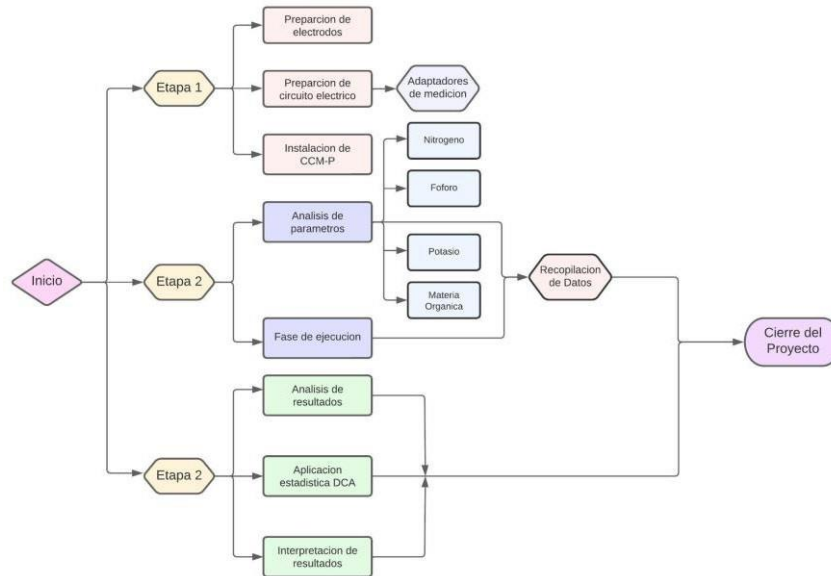


Fig. 1. Mapa de procesos para la elaboración de las CCM-P

Elaboración de cámaras anódicas y catódicas

Se elaboraron 3 configuraciones de CCM-P tipo H para las cámaras anódica y catódica construidas a partir de 6 organizadores plásticos de 50 litros de capacidad. El volumen de las cámaras se estableció a partir del volumen del sustrato empleado, considerando que los sistemas se elaboraron a escala de laboratorio.

Según Du et al. (2007) el volumen de las cámaras no debe de sobrepasar los 50 litros. A cada organizador se le realizó un orificio circular de 4 pulgadas de diámetro en la parte central, con el propósito de unir dos de ellos mediante un puente salino contenido dentro de un tubo de PVC de 4 pulgadas y 8 cm de longitud. El puente salino actuó como un intercambiador de protones en cada uno de los sistemas. Por otro lado, en la parte lateral de los organizadores se colocaron unas bases de madera sujetadas con tornillos de acero inoxidable que sirvieron de soporte para una segunda viga de madera que se utilizó como soporte para los electrodos y el alambre de cobre empleado en la siguiente fase del proceso para el intercambio de electrones. En cada orificio se colocó una unión de PVC que sirvió de soporte para los tubos que unieron las dos cámaras, tal como se muestra en la (fig. 2).



Fig. 2. Sistema de cámaras anódicas y catódicas de CCM-P

Elaboración de los puentes salinos

Se utilizó Agar - Agar con un electrolito de Cloruro de Sodio (NaCl) para la elaboración del puente salino debido a su bajo costo. Es importante resaltar que lo que hace posible que haya la transferencia de protones de una cámara a la otra en el puente intercambiador es el electrolito. El agar por otro lado evita que haya algún contacto entre cualquier fluido presente en las cámaras anódica y catódica.

La preparación de los puentes salinos para los tres sistemas, se realizó a partir de 3 tubos de PVC de 8 cm de largo y 4 pulgadas de diámetro. En cada uno de los tubos, se depositó la mezcla de 22.5 gr (5%) de agar - agar y 45 gr (10%) de NaCl (Esto para cada tubo respectivamente), de acuerdo a las investigaciones de Kumar, Kumar, & Babu (2012). Las respectivas cantidades fueron pesadas en una balanza analítica y posteriormente disueltas en 450 ml de agua destilada hervida en un vaso precipitado erlenmeyer. Se empleó una varilla de vidrio para agitar el NaCl hasta diluirlo por completo. Posteriormente se agregó el agar - agar y se agitó por cinco minutos hasta obtener una mezcla homogénea.

Limpieza y activación de los electrodos

Los electrodos para las CCM-P fueron elaborados a partir de carbón vegetal debido al bajo costo y fácil acceso. En total se prepararon 6 electrodos de 477 cm² para cada una de las cámaras. En este caso no se consideró alguna medida estandarizada, debido a que en estudios anteriores no se ha logrado determinar una relación directa entre la generación de energía eléctrica con el volumen y el área de los electrodos (Santoro, 2017).

Para la activación de los carbones (electrodos), se los sometió a un proceso de esterilización. Para ello, se preparó una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 1 Molar y otra de Hidróxido de sodio (NaOH) al 1 molar (Chandhuri & Lovley, 2003), posteriormente los electrodos fueron sumergidos en esta solución por una hora aproximadamente y por último, estos fueron colocados en una campana extractora para que todos los gases liberados del proceso pudiesen ser expulsados. Por último, los electrodos fueron introducidos en los compartimentos anódicos y catódicos de los 3 sistemas de CCM-P.

Instalación del circuito externo

El circuito externo para los tres sistemas de CCM-P, estuvo conformado por los electrodos esterilizados en el paso anterior, un cableado externo de alambre de cobre para cada sistema y tres resistencias de 1000 Ω . Este circuito tuvo como propósito el transporte de los electrones desde la cámara del ánodo hacia la del cátodo. Para su instalación, se envolvió el alambre de cobre a los carbones de las dos cámaras y se dejó un sobrante de alambre en cada extremo para ser envuelto en la viga de madera ubicada en la parte externa de cada una de las cámaras. Por último, al final de esos sobrantes de alambre, se colocó la resistencia de 1000 Ω conectando los dos extremos para impedir que los electrones se dirijan de una cámara a la otra, tal como se muestra en la (**fig. 3**). En el lugar donde se colocó las resistencias, se conectaron los empalmes encargados de transmitir a los Multitester (marca PRASEK PREMIUM PR-36) los valores del flujo de energía que se producían en cada uno de los tres sistemas.

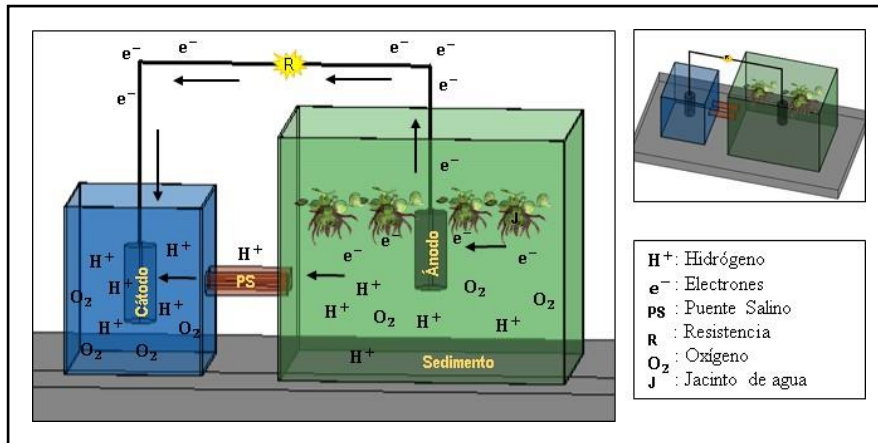


Fig. 3. Esquematación de las CCM-P y su comportamiento bioeléctrico.

Instalación de equipos

Una vez que fue hecha la instalación de los tres sistemas de CCM-P, se empezaron a generar las primeras lecturas por parte del conductor externo (cables cocodrilo), que estaba conectado a la resistencia que unía el circuito de la cámara del ánodo y del cátodo. La medición del voltaje (V) se logró gracias a que cada uno de los 3 sistemas de CCM estaban conectados a unos Multímetros Digitales PRASEK PREMIUM PR-36, auto rango RMS (valor real) de alta precisión con interfaz USB, mismos que fueron conectados a tres computadores diferentes, donde se lograron almacenar los datos (**fig. 4**).

Las lecturas generadas por parte de los multímetros se dieron en mili voltios (mV) y fueron programadas para un intervalo de un minuto respectivamente. Por último, los datos que se obtuvieron de las lecturas de un día (24 h) fueron exportados a una hoja de excel para su posterior análisis.



Fig. 4. Instalación de equipos de medición y lectura de datos

Caracterización eléctrica de las CCM-P

El desempeño eléctrico llevado a cabo por las 3 CCM-P, se determinó a partir de la medición del voltaje, definido como la diferencia de potencial eléctrico para que los electrones (cargas) fluyan de un punto de alto potencial a uno de menor potencial (Mantilla & González, 1977).

Su medición se llevó a cabo mediante los multímetros digitales conectados a las resistencias de cada uno de los sistemas. Además, se tuvieron en consideración algunos parámetros básicos que fueron analizados con el fin de evaluar el comportamiento eléctrico de los sistemas, estos fueron: la densidad de potencia (DP), la eficiencia Coulómbica (EC) y la resistencia interna (RI) (Rismani-Yazdi et al., 2011).

Se partió del voltaje (V), conocido como la relación entre la intensidad de corriente (I) y la resistencia externa (R_{ext}) (Lopez, 2014).

$$V = I \times R_{ext}$$

También se llegó a considerar que la intensidad de corriente producida por una CCM no es alta, por lo que su cálculo fue desarrollado a partir de la caída de voltaje a través de un resistor (Lopez, 2014), por lo que se empleó la siguiente ecuación.

$$I = \frac{V}{R_{ext}}$$

Potencia (P): Para conseguir que las CCM, sean una metodología confiable en generación de potencia, resultó necesario optimizar el sistema para que esta fuera producida. Por ello, esta se calculó a partir del voltaje y la corriente de la siguiente manera.

$$P = I \times V \quad \text{ó} \quad P = \frac{V^2}{R_{ext}}$$

Por otro lado, considerando que la Potencia (P) generada en una CCM no es suficiente para describir cuán eficiente un sistema resulta ser, fue necesario que los cálculos se expresaran en función del Área superficial del electrodo (A_{an}) disponible para los consorcios microbianos el cual tiene un efecto directo en la potencia generada.

Densidad de Potencia (DP): expresada como la potencia por unidad de área del electrodo anódico (Wang, Chen, & Huang, 2010) o la potencia por unidad de volumen del sustrato (Luo et al., 2010), se calculó de la siguiente manera:

$$PA_n = \frac{V^2}{A_{an} \times R_{ext}} \quad \text{ó} \quad DP = \frac{\text{Potencia (mW)}}{\text{Área de contacto del electrodo (m}^2\text{)}}$$

Donde (V) es el Potencial en milivoltios, (R_{ext}) es la resistencia externa y (A_{an}) Es el área superficial geométrica del electrodo disponible para que los microorganismos puedan formar la biopelícula. Esta última se consiguió aplicando la siguiente ecuación:

$$A_{an}(m^2) = 2 \times \pi \times r \times h + 2 \times \pi \times r^2$$

Análisis de parámetros

En el mecanismo de adaptación, crecimiento, reproducción y desarrollo de las especies acuáticas utilizadas durante la etapa del proyecto; se analizaron Nitrógeno, Fósforo, Potasio (N,P,K) y Materia Orgánica (MO) que son los macronutrientes que más regulan el crecimiento las plantas (Acosta & Agüero, 2006).

El análisis de estos cuatro parámetros, se efectuó partiendo de una muestra inicial del agua residual empleada en todo el proyecto y de otras tres muestras adicionales tomadas de los tres sistemas ya instalados y en pleno funcionamiento. El laboratorio encargado de realizar el análisis de las muestras fue ELICROM Cia. Ltda. Ubicado en la ciudad de Guayaquil-Ecuador. Para el transporte de las muestras, se dispuso de botellas plásticas de 1 litro de capacidad (según las especificaciones del laboratorio) utilizadas para contener las muestras de agua recolectadas de los tres sistemas y una hielera para conservar las muestras

Además, se registró diariamente la temperatura atmosférica a la que estaban sometidos los tres sistemas y se midió los valores de pH del agua de cada una de las cámaras anódicas de los tres sistemas, con el fin de determinar su influencia en la generación de bioenergía.

Análisis Estadístico para el procesamiento de la información

Para determinar la eficiencia en la generación de bioelectricidad, se empleó el modelo estadístico “Diseño de Bloques Completamente Aleatorio” con tres tratamientos en cuatro periodos de tiempo diferentes 0, 30, 45, 60 días, con el propósito de comparar la producción de energía generada por las tres celdas de combustible microbianas y la remoción de los macronutrientes. Se trabajó con una confiabilidad del 95%; aplicando análisis de varianzas, considerando la normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos para luego aplicar el test de Fisher en la comparación múltiple de medias; se utilizó el programa estadístico R-studio v. 2022.12.0 Build 353.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Variación de Nitrógeno (N)

El análisis de varianza (ANOVA), mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P no tuvieron un efecto significativo en la remoción de Nitrógeno ya que su p-value =0.15893, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de Homocedasticidad cumplieron para los datos obtenidos y la prueba LSD de Fisher, indicó que las tres especies vegetales acuáticas lograron una remoción de N de manera semejante (**Fig. 5**).

Por otro lado, el ANOVA determinó que los días de tratamiento, si tuvieron un efecto significativo en la remoción de Nitrógeno (p-value=00154), y el test de Fisher determinó una mayor remoción a los 45 días de tratamiento (**Fig. 5**).

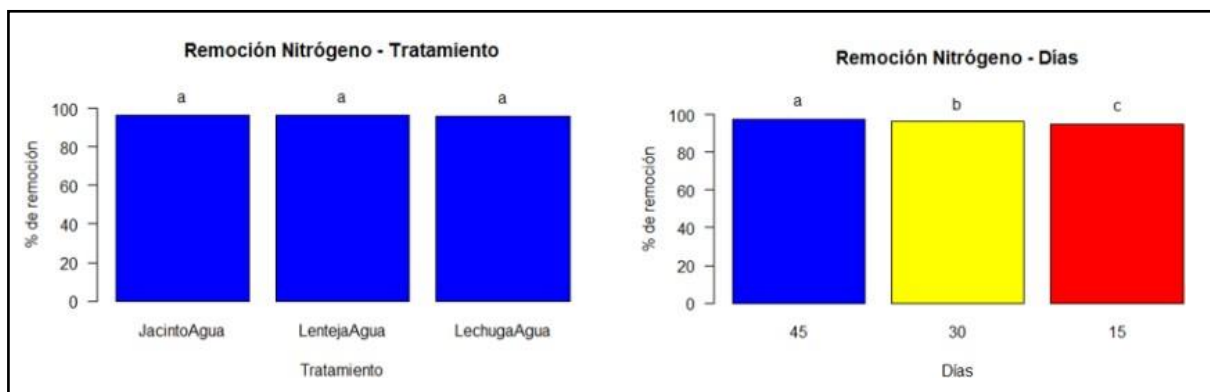


Fig. 5. Remoción de Nitrógeno (N) en relación a los tratamientos y los días.

La razón por la cual el N disminuyó significativamente en el transcurso de los días, se debió a la capacidad que tienen las plantas acuáticas para metabolizar ciertos compuestos presentes en los cuerpos de agua; además, gracias a la ayuda proporcionada por los microorganismos que viven en la rizósfera de estas plantas, se generaron metabolitos producto de la degradación de la MO, los cuales fueron absorbidos por las plantas junto con el Nitrógeno y otros compuestos (Garbisu, Becerril, Epelde, & Alkorta, 2007). Es por esta razón, que las raíces de las plantas acuáticas jugaron un papel especial como sustrato para la comunidad microbiana, cuya actividad redujo de manera notoria los niveles de Nitrógeno, los cuales posteriormente fueron asimilados, transformados y acumulados por las plantas gracias a sus procesos metabólicos (Aurelio, López, Meas, Ortega, & Olguín, 2004)

Variación de Fósforo (P)

El análisis de varianza (ANOVA), mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P si tuvieron un efecto significativo en la remoción de Fósforo ya que su p-value =0.000703, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de Homocedasticidad cumplieron para los datos obtenidos y la prueba LSD de Fisher, indicó que el Jacinto de agua fue el que realizó mayor remoción de Fósforo que las otras dos especies (**Fig. 6**).

Por otro lado, el ANOVA determinó que los días de tratamiento, no tuvieron un efecto significativo en la remoción de Fósforo (p-value=0.868096), y el test de Fisher determinó la semejanza de remoción de Fósforo a través de los días de tratamiento (**Fig. 6**).

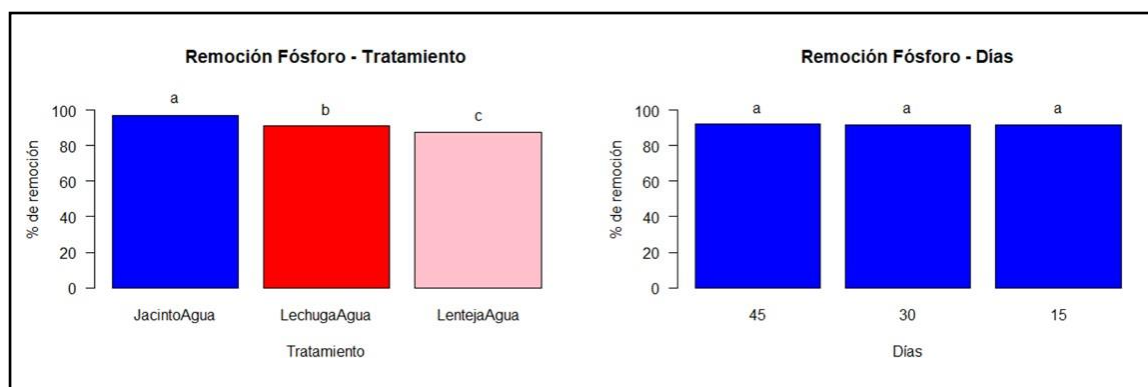


Fig. 6. Remoción de Fósforo (P) en relación a los tratamientos y los días.

La razón por la cual este elemento fue consumido por las tres especies acuáticas casi en su totalidad, tal como lo mostró el modelo estadístico; se debió a que, de todos los nutrientes, este se considera como el de mayor influencia en el crecimiento de las plantas acuáticas, ya que solo una pequeña porción es capaz de aumentar la biomasa de las plantas acuáticas (Acosta & Agüero, 2006). Esto ayudó a que las malezas se reprodujeran aumentando su población a medida que pasaba el tiempo, lo cual explica su consumo a lo largo del tiempo.

Variación de Potasio (K)

El análisis de varianza (ANOVA), mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P si tuvieron un efecto significativo en la remoción de Potasio ya que su p-value=0.00109, la

prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de Homocedasticidad cumplieron para los datos obtenidos y la prueba LSD de Fisher, indicó que la Lenteja de agua fue el que realizó mayor remoción de Potasio mientras que las otras dos especies aumentaron su potasio (**Fig. 7**).

Por otro lado, el ANOVA determinó que los días de tratamiento, si tuvieron un efecto significativo en la remoción de Potasio ($p\text{-value}=0.04910$), y el test de Fisher determinó el incremento de Potasio a través de los días de tratamiento (**Fig. 7**).

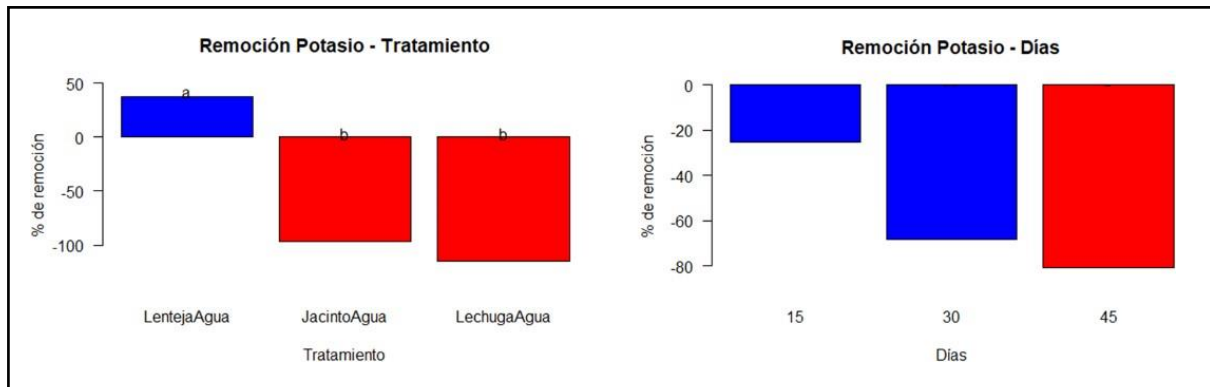


Fig. 7. Remoción de Potasio (K) en relación a los tratamientos y los días.

Si bien es cierto el K es considerado como uno de los nutrientes más importantes en el desarrollo y crecimiento de las plantas acuáticas, ya que participa en procesos esenciales, tales como: activación enzimática, osmorregulación, síntesis de proteínas, actividad osmótica, fotosíntesis, transferencia de energía, etc. Además, este elemento permite a las plantas mantener niveles elevados de turgencia, es decir, elevados niveles de agua, gracias a un grupo de células conocidas como células guarda, las mismas que acumulan este elemento para lograr la apertura y cierre de las estomas gracias al hinchamiento producido por el agua. Lamentablemente, el suministro inadecuado de potasio, disminuye la velocidad de apertura y cierre de las estomas provocando pérdida de agua (Intagri S.C., 2017). Esta pérdida ocasiona que los niveles de transpiración excedan los niveles de agua absorbida por las raíces de las plantas provocando estrés hídrico. Durante el proyecto, el consumo de Potasio se vio afectado en las tres CCM-P, porque las plantas iban presentando problemas de expansión a medida que transcurría el tiempo ya que su rápida capacidad de proliferación iba haciendo que las nuevas plántulas tuvieran dificultad para absorber este elemento, razón por la cual su crecimiento se vio limitado habiendo una disminución en la expansión foliar y dificultades en el aumento del crecimiento radicular (Potters, Pasternak, Guisez, Palme, & Jansen, 2007).

Variación de Materia Orgánica (MO)

El análisis de varianza (ANOVA), mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P no tuvieron un efecto significativo en la remoción de Materia orgánica ya que su $p\text{-value}=0.171$, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de Homocedasticidad cumplieron para los datos obtenidos y la prueba LSD de Fisher, indicó que las tres especies vegetales acuáticas lograron remover la Materia orgánica de manera semejante (**Fig. 8**).

Por otro lado, el ANOVA determinó que los días de tratamiento, no tuvieron un efecto significativo en la remoción de Materia orgánica ($p\text{-value}=0.951$), y el test de Fisher determinó la semejanza en la remoción en los días de tratamiento (**Fig. 8**).

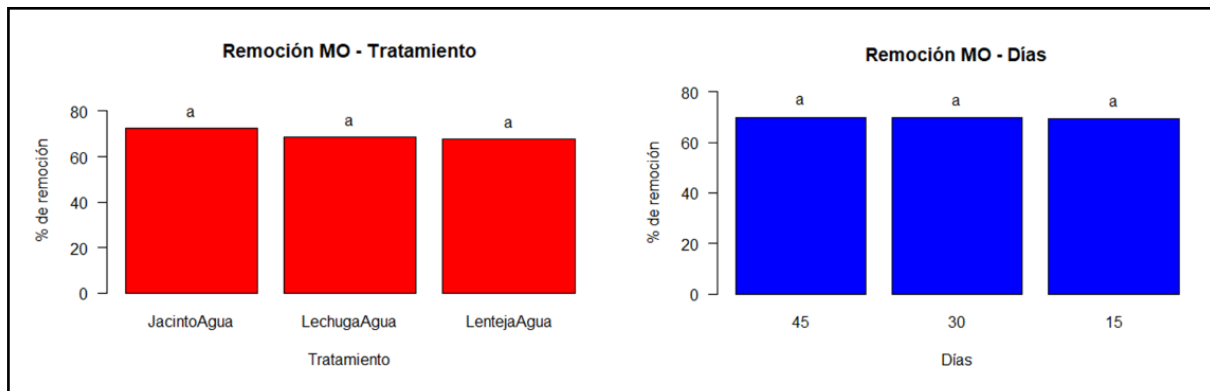


Fig. 8. Remoción de Materia orgánica (MO) en relación a los tratamientos y los días.

La Materia Orgánica no fue consumida de manera significativa en las CCM-P; pues en estudios realizados por Buitrón y Pérez (2011), se llegó a demostrar que la separación existente entre electrodos de una cámara a la otra ocasiona una degradación lenta de la misma, además ellos observaron que la disminución de MO estuvo acompañada por la generación de voltaje, el cual tuvo su mayor auge después que se produjera una rápida disminución de la MO. Pasada esta etapa, disminuyó la velocidad de remoción de MO como también la generación de bioelectricidad. En el caso del presente trabajo, la MO si fue disminuyendo lentamente, pero la bioelectricidad fue en aumento en los tres sistemas. La razón por la cual este parámetro repercutió de forma directa en la generación de Bioelectricidad, fue gracias a su aporte como fuente natural de carbono (nutrientes), energía y combustible para el desarrollo de los microorganismos (Pant et al., 2010), mismos que ayudan a la oxidación (mineralización) de esta MO, permitiendo la producción de electrones encargados de generar bioelectricidad (Logan et al., 2006).

Evaluación de la Intensidad de Corriente (mA) en las CCM-P

El análisis de varianza (ANOVA), mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P si tuvieron un efecto significativo en la intensidad de corriente (mA) ya que su $p\text{-value}=2 \times 10^{-16}$, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Homocedasticidad de Levene indicaron que los datos no tienen distribución normal ni cumple la homogeneidad de varianzas, por lo tanto, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, la cual mostró que la mediana de los tres sistemas de CCM-P en la Intensidad de Corriente (mA) son diferentes, donde la Celda Microbiana con Lechugas de Agua generó mayor Intensidad de Corriente en relación a las Celdas con Jacintos y Lentejas de Agua (**fig. 9**).

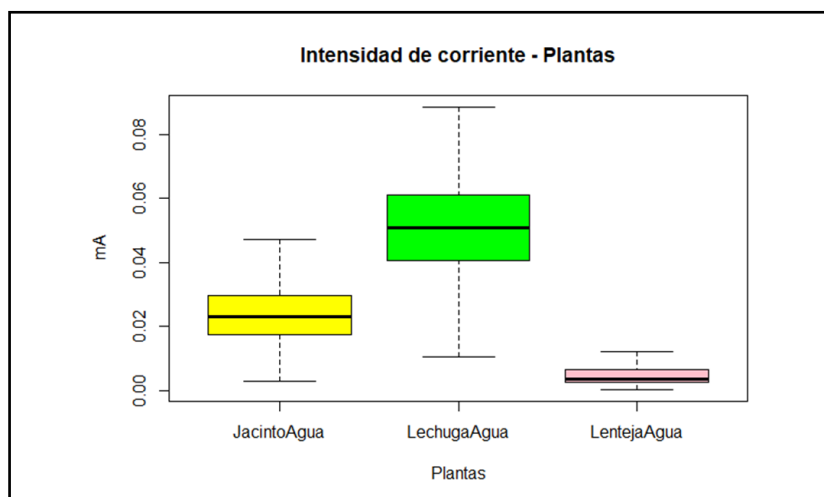


Fig. 9. Variación de la intensidad de corriente en las plantas en los tratamientos.

El análisis de variación en la intensidad de corriente, demostró que la lechuga de agua fue el espécimen en obtener un valor mayoritario equivalente 0.00009 Amp, seguido del Jacinto y la Lechuga de agua. La producción de este parámetro, se dio gracias al movimiento de electrones a través de los sistemas, producto de una diferencia de potencial, generada por el recorrido de los mismos desde el electrodo anódico con el mayor flujo de eléctrico hacia el electrodo catódico con un flujo mínimo (Mantilla & González, 1977).

Evaluación de la Densidad de Potencia en las CCM-P

El análisis de varianza, mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P si tuvieron un efecto significativo en la Densidad de potencia (mW/m^2) ya que su $p\text{-value} = 2 \times 10^{-16}$, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Homocedasticidad de Levene indicaron que los datos no tienen distribución normal ni cumple la homogeneidad de varianzas, por lo tanto, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, la cual mostró que la mediana de los tres sistemas de CCM-P en la Densidad de potencia (mW/m^2) son diferentes, donde la Celda Microbiana con Lechugas de Agua generó mayor Densidad de potencia en relación a las Celdas con Jacintos y Lentejas de Agua (**fig. 10**).

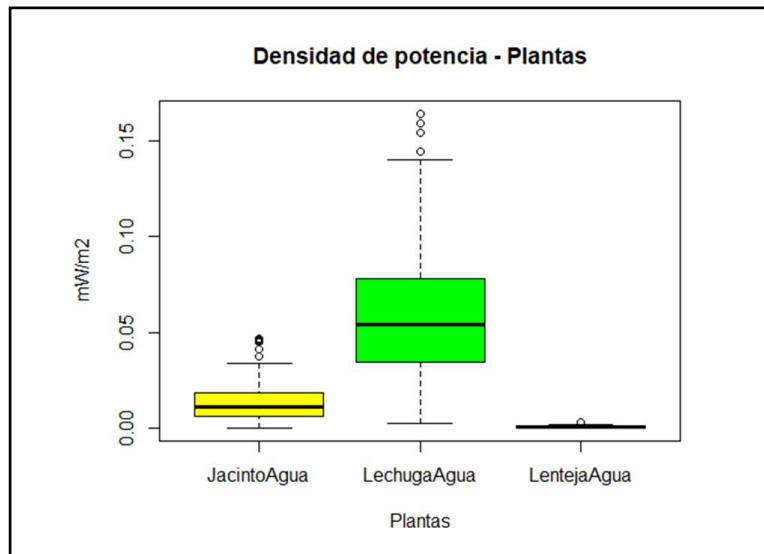


Fig. 10. Modelo estadístico de varianza ANOVA de la variación de la densidad de potencia en las plantas de los tratamientos.

El análisis de la capacidad de watts generados por cada m^2 de superficie de contacto del electrodo, demostró notablemente una diferencia sobresaliente de las lechugas de agua en comparación con los jacintos y lentejas de agua, obteniendo una densidad (DP) máxima de $0.164404327 \text{ mW}/m^2$. Este resultado es bajo en comparación con el promedio de $14 \text{ mW}/m^2$ de una investigación similar, en la que la fuente de regeneración de energía era agua residual (Buitrón & Pérez, 2011). Finalmente, la lechuga de agua resultó ser la más potente al generar mayor cantidad de watts por cada metro cuadrado de electrodo, demostrando una mayor eficiencia con respecto a los demás especímenes.

Evaluación del voltaje de la Bioelectricidad en las CCM-P

El análisis de varianza, mostró que los tratamientos aplicados en las tres CCM-P si tuvieron un efecto significativo en la Bioelectricidad (mV) ya que su $p\text{-value} = 2 \times 10^{-16}$, la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de Homocedasticidad de Levene indicaron que los datos no tienen distribución normal ni cumple la homogeneidad de varianzas, por lo tanto, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, la cual mostró que la mediana de los tres sistemas de CCM-P en la Bioelectricidad (mV) son diferentes, donde la Celda Microbiana con Lechugas de Agua generó mayor Bioelectricidad (mV) en relación a las Celdas con Jacintos y Lentejas de Agua (**fig. 11**).

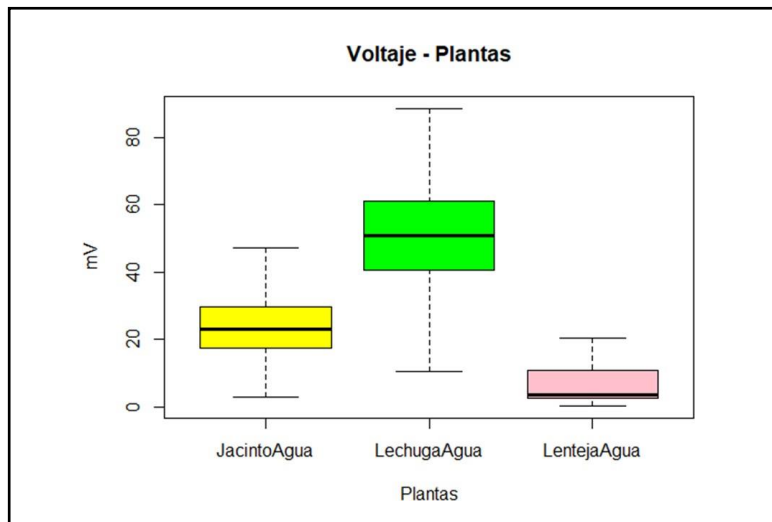


Fig. 11. Modelo estadístico de varianza ANOVA de la variación del voltaje, tensión eléctrica o diferencia de potencial en las plantas de los tratamientos.

Se pudo evidenciar que la mayor diferencia de potencial se dio entre los electrodos de la celda con Lechugas de agua, con un valor máximo de voltaje de 88.56 mV; seguido por las celdas con Jacintos y Lentejas de agua con valores máximos de 47.21 mV y 20.24 mV respectivamente. Es muy probable, que la actividad microbiana no haya sido muy estable en las cámaras anódicas de estos tres sistemas debido a la presencia del oxígeno (O₂), lo que significó una degradación aeróbica de la MO. El resultado de este proceso, se vio reflejado en valores inestables del voltaje y por ende una afectación negativa en la densidad de potencia y en la intensidad de corriente (Lu, Shun-gui, Li, Jin-tao, & Jin-ren, 2009).

Análisis de la remoción de Nitrógeno (N) en CCM-P

El comportamiento del N en los tres sistemas de CCM-P, pudo relacionarse con la generación de bioelectricidad mediante una cinética de remoción, medida como Nitrógeno total. Se pudo observar un comportamiento similar en los sistemas, donde los niveles de N fueron disminuyendo paulatinamente, mientras que los valores de bioelectricidad iban aumentando en los sistemas. Si bien es cierto, el espécimen que tuvo mejor interacción con el N, fue la lechuga de agua alcanzando un valor máximo de 83.10 mV, seguido del Jacinto y la Lenteja de agua con valores de 47.21 mV y 20.24 mV respectivamente.

El Nitrógeno como parámetro es un macro nutriente imprescindible para el desarrollo de las especies vegetativas, cerca del 0.02 - 0.4 % de Nitrógeno que se encuentra en los suelos y el 98% de este es de la materia orgánica (Neira, 2020), misma que fue la fuente de nutrición de los sistemas en estudio; esta necesidad de las especies mencionadas se ve reflejada en la (**fig.12**) mediante un alto consumo de Nitrógeno durante el primer mes debido al desarrollo de las 3 especies (Jacintos, Lechugas y lentejas) en su etapa joven en donde se observa que el % N se vuelve inversamente proporcional al % corriente generada, demostrando que para las todas las especies el crecimiento por nutrición con nitrógeno impacta positivamente en el crecimiento de las plantas, produciendo así mayor cantidad de bioelectricidad.

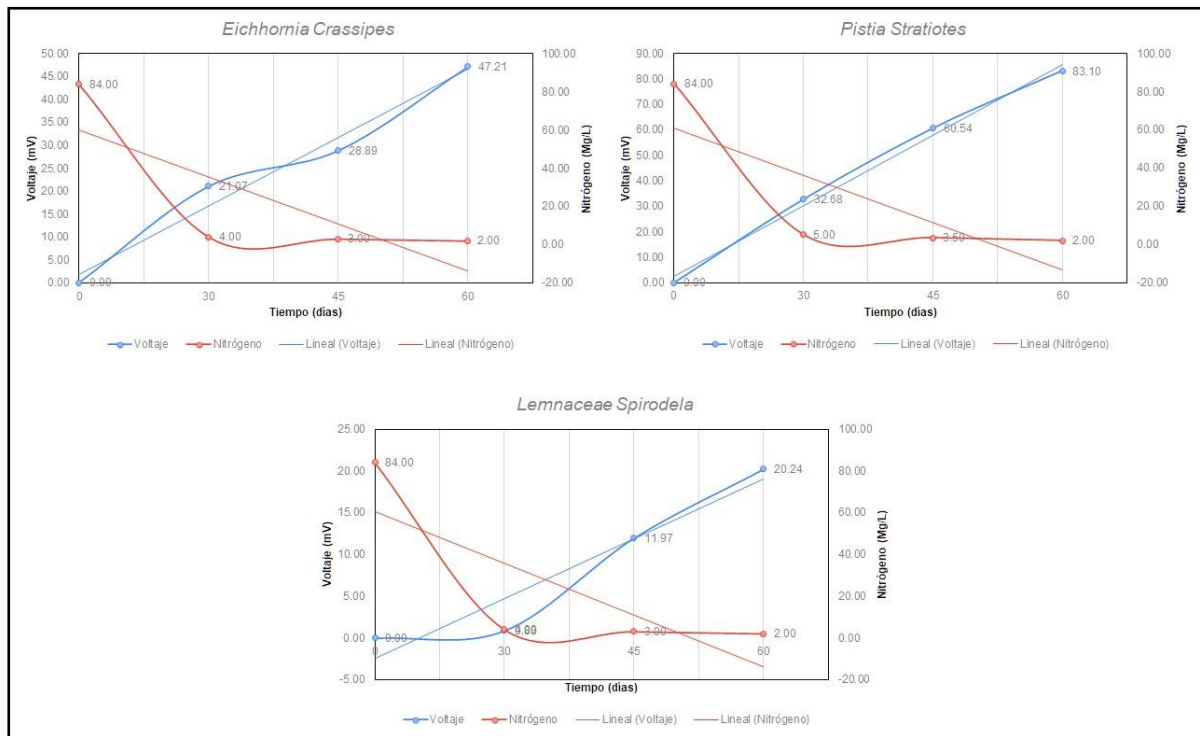


Fig. 12. Cinéticas de remoción del Nitrógeno (N) y generación de voltaje (mV) para las tres CCM-P estudiadas.

Evaluación del análisis para la degradación del Fósforo en CCM-P

El Fósforo es el macro elemento encargado de acelerar los procesos metabólicos como la fotosíntesis, la transferencia de energía, la síntesis y degradación de los carbohidratos (Neira, 2020). De este modo, se puede entender la razón por la cual la concentración de fósforo se vio reducida o consumida desde los 84 mg/l hasta los 2 mg/l aproximadamente para la mayoría de los casos mientras que la generación de Voltaje iba incrementando repentinamente. De este modo, la (Fig. 13) permite comprender la interacción existente entre el consumo de fósforo para una mayor y más eficiente transferencia energética, y por ende, mayor producción de bioenergía traducida en corriente eléctrica.

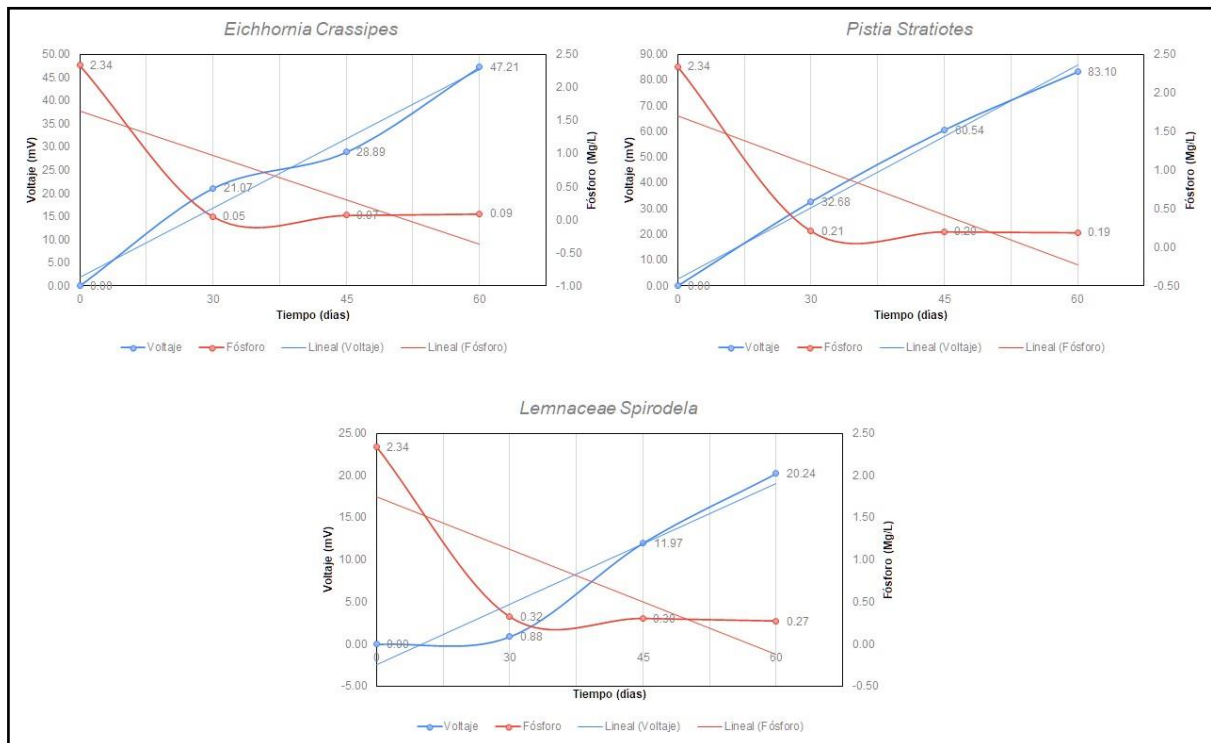


Fig. 13. Cinéticas de remoción de Fósforo (P) y generación de voltaje (mV) para las tres CCM-P estudiadas.

Evaluación del análisis para la degradación del Potasio en CCM-P

El potasio también se incluye entre los macroelementos esenciales y las plantas lo requieren en grandes cantidades (3-4 veces más que el fósforo y casi lo mismo que el nitrógeno). además de considerarse primario porque interviene en funciones primarias de las especies vegetativas. Este elemento se presenta como K_2O en suelos y fertilizantes, pero se absorbe en forma de iones K (Larriva, 2006), sin embargo, se observa en la (Fig. 14) que la concentración de potasio en el caso de los jacintos y lechugas incrementa levemente hasta que se va estabilizando. Se puede comprender que posiblemente estas especies cuentan con suficiente K para la asimilación de otros componentes; no obstante, para el caso de la lenteja de agua ocurre una remoción repentina al mes, pero en un mes más vuelve a elevar su concentración y por consiguiente se estabiliza, a pesar de ello en todos los casos de tratamientos, existe un buen performance en la generación de bioelectricidad.

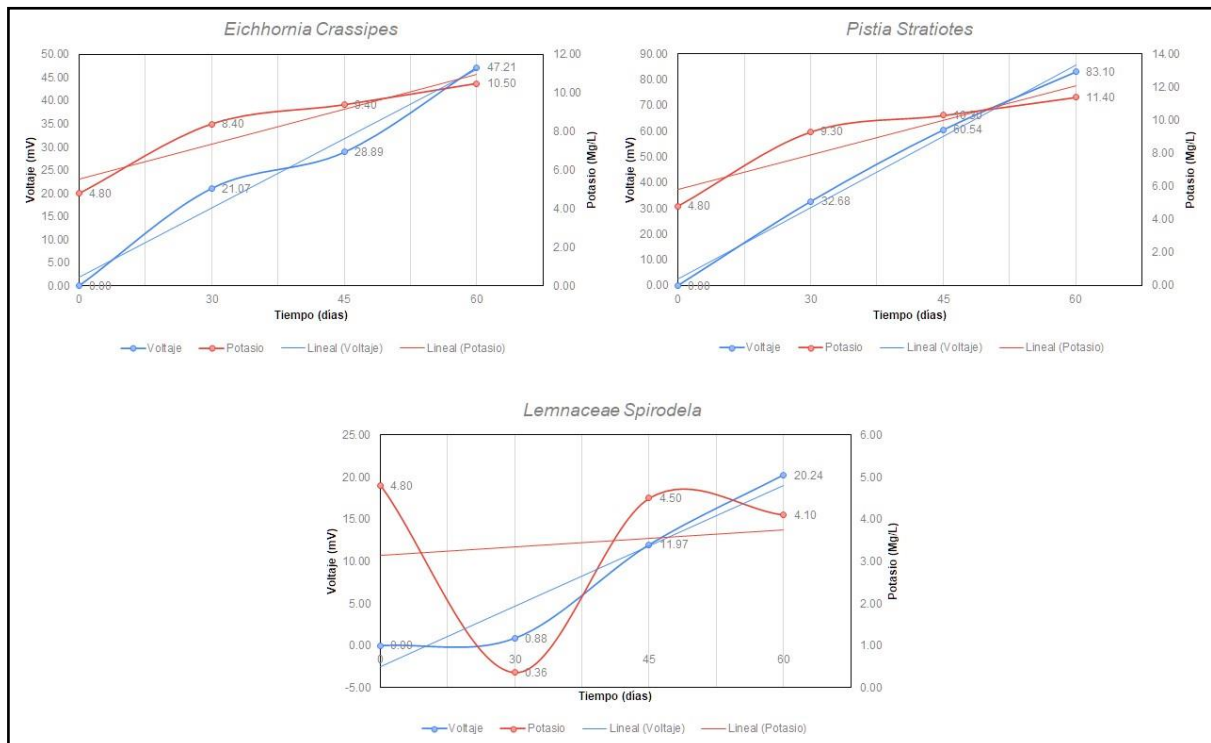


Fig. 14. Cinéticas de remoción del Potasio (K) y generación de voltaje (mV) para las tres CCM-P estudiadas.

Evaluación del análisis para la degradación del sustrato en CCM-P

La degradación del sustrato como proceso degenerativo influye directamente en la producción de bioelectricidad, esta se analizó a través de una cinética de remoción medida como Materia Orgánica Total. Para los tres tratamientos de *Eichhornia Crassipes*, *Lemnaceae Spirodela* y *Pistia Stratiotes* existió gran relación entre la remoción de sustrato y generación de corriente en paralelo, puesto que al momento de haberse degradado o reducido la materia orgánica incrementó de forma inmediata la generación del voltaje presentándose una sinergia para ambas indirectamente proporcional, esta etapa es conocida como etapa rápida de remoción y se postula que el tiempo en el periodo de duración de ésta es influida por la longitud de separación de los electrodos, lo cual causa que la materia orgánica se degrade más lentamente, aumentando por consecuencia el tiempo de generación de bioelectricidad o corriente eléctrica (Buitrón & Pérez, 2011).

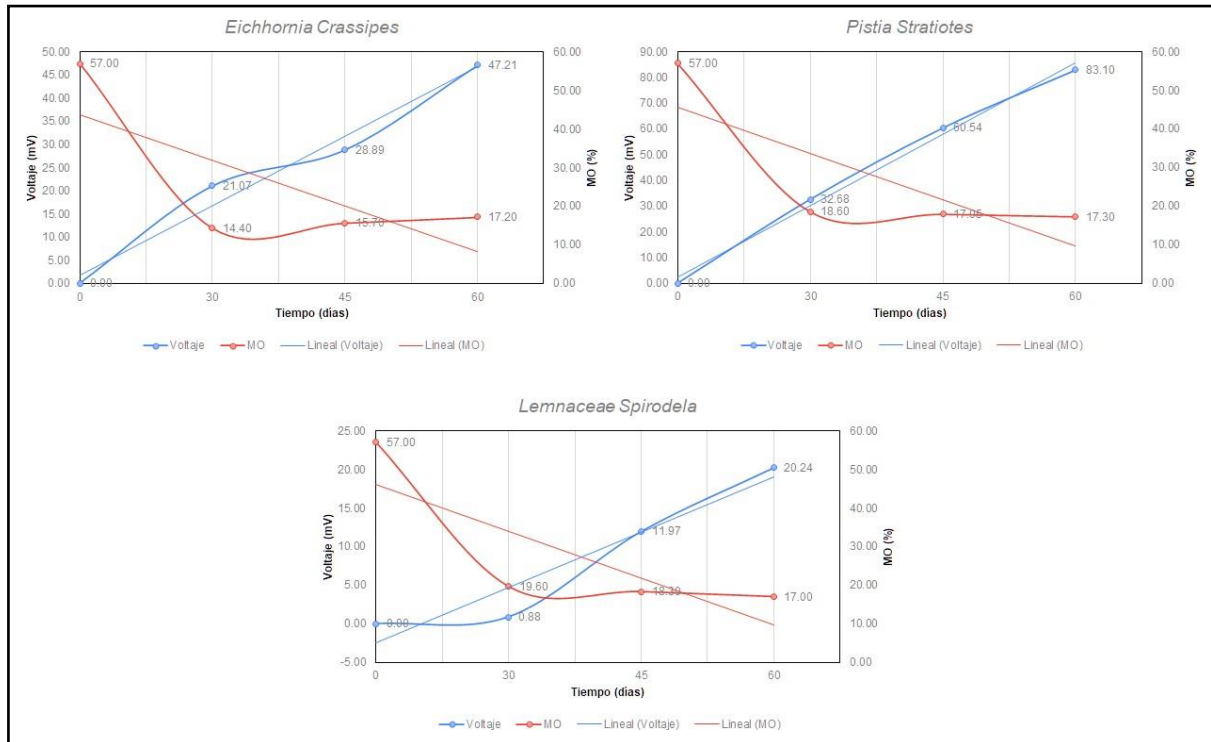


Fig. 15. Cinéticas de remoción de la Materia Orgánica total (MO) y generación de voltaje (mV) para las tres CCM-P estudiadas.

Comparación de la Bioelectricidad producida por las tres CCM-P

El incremento del voltaje a medida que transcurrían los días, tuvo un comportamiento diferente en las tres CCM-P, pues tal como se observa en la figura siguiente, el sistema con Lechugas de Agua fue el responsable de generar la mayor cantidad de bioelectricidad durante toda la etapa experimental; por su lado, el sistema con jacintos de Agua fue el segundo en la generación de voltaje y el sistema con Lentejas de Agua fue el que tuvo una menor producción; de este modo se pudo determinar junto con los modelos estadísticos antes mencionados que el sistema con Lechugas de agua fue el más eficiente en la generación de Bioelectricidad.

En relación al comportamiento del voltaje, el sistema con Jacintos de agua fue el más constante en la generación de bioenergía ya que su línea de tendencia presentó una pendiente más pronunciada; por otro lado, la lenteja de agua tuvo la segunda pendiente más elevada, aunque en relación a los sistemas con Jacintos y Lechugas, esta fue la menos relevante; Y en relación al sistema con Lechugas de Agua, a pesar de ser el de mayor producción de Bioelectricidad, no tuvo un incremento constante ya que su línea de tendencia fue la menos pronunciada en relación a la de las otras dos especies (**fig. 16**).

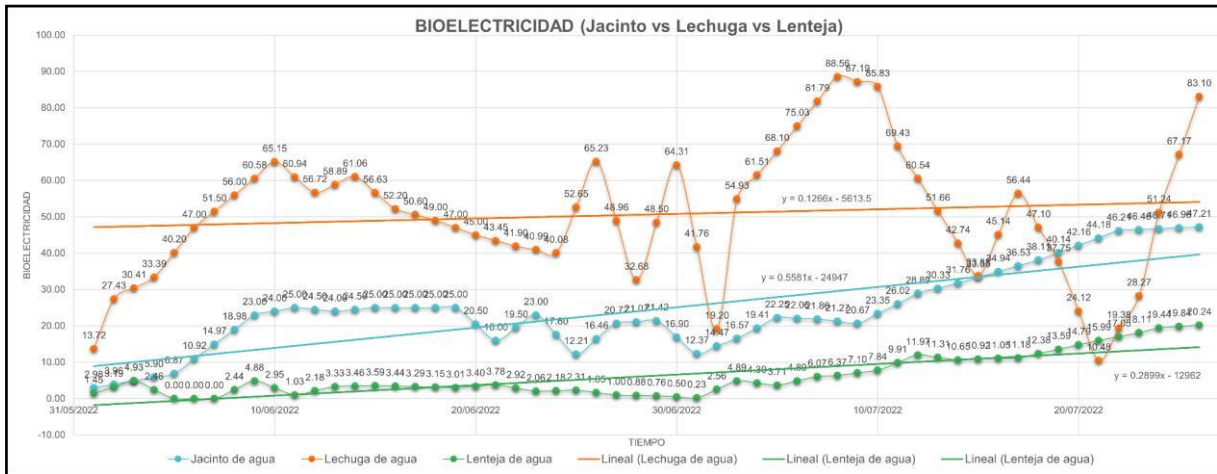


Fig. 16. Gráfica de Dispersión de la comparación del Voltaje producido por las tres CCM-P.

De este modo, se pudo observar que de las tres CCM-P, el de Lechuga de agua obtuvo el mayor potencial eléctrico de (88.56 mV) en el día 38/56 (mitad de la fase), pero lamentablemente este fue inestable, ya que fue decayendo eventualmente durante el transcurso de los días de la ejecución. Además, se puede mencionar que este tratamiento se encontraba en un periodo de latencia, por lo que al pasar el tiempo el sistema podría haberse adaptado a las nuevas condiciones comenzando a incrementar su vida útil después de su etapa facultativa. La razón por la que se producen este tipo de variaciones bioenergéticas elevadas de corriente se debe a la presencia de bacterias que contribuyen al proceso de generación eléctrica; debido a este suceso es que los especímenes de agua produjeron rizodepósitos, principalmente en forma de hidratos de carbono, mismos que fueron aprovechados y sintetizados por dichas bacterias convirtiéndolos en energía eléctrica mediante la celda de combustible microbiana (Figueredo, Olaya, & Cortón, 2014).

Se pudo observar también que el Jacinto de agua y la Lenteja de agua mantuvieron una generación mínima constante la cual fue incrementando paulatinamente, logrando que en los últimos días se diera un máximo potencial de (47.21 mV) y (20.24 mV) respectivamente, lo que permitió deducir que a medida que pasara el tiempo era probable que el incremento de energía podría ser mayor; esto quiere decir, que los jacintos y lentejas del sistema probablemente se estaban adaptando a estas nuevas condiciones nutricionales y climáticas. El incremento del potencial eléctrico durante el último mes se debió al crecimiento bacteriano producido en la superficie de contacto del electrodo de la cámara anódica ya que tras el periodo de adaptación estas colonizaron el carbón (Buitrón & Pérez, 2011).

Además, se pudo observar que durante el proyecto, el cual se desarrolló a condiciones normales de temperatura, la generación de bioelectricidad fue incrementando lentamente en las tres CCM-P a medida que transcurría el tiempo. En investigaciones desarrolladas por Cárdenas et. al. (2022), se llegó a determinar que la temperatura es una variable que requiere ser controlada para una óptima producción de bioenergía, ya que esta ayuda a regular la eficiencia de los procesos metabólicos microbianos y la comunidad microbiana que se desarrolla. En el proyecto llevado a cabo por ellos, la temperatura empleada fue de 35 °C, con la que se obtuvo una mayor generación de corriente en las CCM. Las comunidades microbianas de los sistemas eran del tipo mesofílicas, es decir bacterias cuya temperatura de crecimiento y metabolismo se encuentra entre los 20-40 °C, ideal para el correcto desarrollo de procesos microbianos en un tiempo de operación corto (Silva & Peña, 2020). En el presente proyecto, la temperatura ambiente, estuvo aproximadamente entre los 12 °C, por lo cual el tipo de microorganismos presentes en los sistemas fueron del tipo psicrófilos que se encuentran entre los 0-23 °C (Lopez, 2014), debido a esto, las bacterias encargadas de la colonización de los electrodos, se vieron limitadas en la creación de película microbiana, factor por el cual la producción energética fue lenta.

CONCLUSIONES

Durante la etapa operativa del proyecto, se pudo observar que el Nitrógeno, el Fósforo y La Materia Orgánica fueron los parámetros mayormente removidos del agua por acción de las plantas acuáticas, de esta manera ayudaron que lograran la generación de Bioelectricidad. El modelo estadístico mostró que el N fue consumido casi en su totalidad junto con el P. Por otro lado, la MO, tuvo una disminución más lenta según el modelo estadístico, debido a que la separación entre electrodos era considerable, lo que ocasionó que el tiempo de consumo fuera lento, haciendo que los niveles de bioelectricidad aumentarán a medida que transcurría el tiempo. Este comportamiento fue similar en los tres sistemas.

El K fue el único elemento que no disminuyó al igual que los otros parámetros, este fenómeno se dio gracias al estrés hídrico que se produjo en los sistemas, producto de la excesiva producción de nuevas plántulas. Esto pudo llegarse a determinar, ya que la actividad fotosintética fue disminuyendo considerablemente, lo cual fue evidente debido a la despigmentación que empezaron a sufrir las plantas aproximadamente a los 30 días de efectuado el proyecto.

Tras haber desarrollado los tres sistemas de CCM-P a partir de Jacinto de agua (*Eichhornia Crassipes*), Lenteja de agua (*Lemnaceae Spirodela*) y Lechuga de agua (*Pistia Stratiotes*); se pudo llegar a comprobar que la generación de Bioelectricidad en los sistemas fue un proceso lento, ya que durante el tiempo del proyecto, ninguno de los sistemas logró llegar a su máxima eficiencia en la generación de energía. Si bien es cierto, la planta que tuvo mayor influencia en la producción de bioenergía fue la lechuga de agua, aunque fue la menos constante en el incremento de la misma; en cambio, el Jacinto de Agua como la Lenteja, a pesar de no generar grandes cantidades de bioelectricidad, fueron las más constantes en cuanto al aumento del voltaje.

REFERENCIAS

- Acosta, L., & Agüero, R. (2006). Malezas acuáticas como componentes del ecosistema. *Agronomía Mesoamericana*, 17, n, 213–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.21158/01208160.n78.2015.1188>
- Aurelio, R., López, N., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). E Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, 55(3), 69–82. Retrieved from <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-academia-mexicana-de-ciencias/articulo/fitorremediacion-fundamentos-y-aplicaciones>
- Buitrón, G., & Pérez, J. (2011). Producción de electricidad en Celdas de Combustible Microbianas utilizando agua residual: Efecto de la distancia entre electrodos. *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 14(1), 5–11. Retrieved from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2011000100001
- Chandhuri, S., & Lovley, D. (2003, September 7). Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature Biotechnology*, 1229–1232. <https://doi.org/10.1038/nbt867>
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25, 464–482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>
- Figueredo, F., Olaya, A., & Cortón, E. (2014). Celdas de combustible biológicas basadas en el metabolismo fotosintético. *Química Viva*, 13(3), 174–186. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/863/86332856006.pdf>
- Garbisu, C., Becerril, J. M., Epelde, L., & Alkorta, I. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*, 16(2), 44–49. Retrieved from <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/127>
- García, H., Correodor, A., Calderón, L., & Gómez, M. *Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. , (2013).
- Intagri S.C. (2017). Las Funciones del Potasio en la Nutrición Vegetal. Retrieved May 22, 2023, from intagri.com website: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/las-funciones-del-potasio-en-la-nutricion-vegetal>
- Kumar, S., Kumar, H., & Babu, G. (2012). A study on the electricity generation from the cow dung using microbial fuel cell. *J Biochem Tech*, 3(4), 442–447.
- Larriva, N. (2006). Síntesis de la importancia del Potasio en el suelo y plantas. *Revista de Ciencias de La Vida*, 21, 23–24. Retrieved from <https://lagranja.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/2.2003.09>
- Li, Z., Zhang, X., Zeng, Y., & Lei, L. (2009). Electricity production by an overflow-type wetted-wall microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 100(9), 2551–2555. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2008.12.018>
- Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181–5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Lopez, J. (2014). *Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para la aplicación en tratamiento de aguas residuales*. (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.). Retrieved from <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/144>
- Lu, N., Shun-gui, Z., Li, Z., Jin-tao, Z., & Jin-ren, N. (2009). Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. *Biochemical Engineering Journal*, 43(3), 246–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.005>

- Luo, Y., Zhang, R., Liu, G., Li, J., Li, M., & Zhang, C. (2010). Electricity generation from indole and microbial community analysis in the microbial fuel cell. , 176(1-3), 759–764 | 10.1016/j.jhazmat.2009.11.100. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1–3), 759–764. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.100>
- Mantilla, G., & González, H. (1977). *Intensidad de la corriente eléctrica*. Retrieved from <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/5736>
- Neira, J. (2020). *Efecto de la densidad de plantas y de la fertilización NPK, en el rendimiento del maíz amarillo duro (Zea mays L.) En el distrito de Sondor-Huancabamba*. (Universidad Nacional de Piura). Retrieved from <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/2438>
- Pant, D., Bogaert, V., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533–1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Potters, G., Pasternak, T., Guisez, Y., Palme, K., & Jansen, M. (2007). Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends in Plant Science*, 12(3), 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.004>
- Rismani-Yazdi, H., Christy, A. D., Carver, S. M., Yu, Z., Dehority, B. A., & Tuovinen, O. H. (2011). Effect of external resistance on bacterial diversity and metabolism in cellulose-fed microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(1), 278–283. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.05.012>
- Rozo, S. M., Ingeniera, Q., Auxiliar, M. P., Tibaquirá, J. E., Ingeniero, G., & Asociado, M. M. S. P. (2007). Celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia Et Technica*, XIII(37), 279–283. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84903747>
- Silva, H., & Peña, J. (2020). Diseño Y Ejecución De Un Prototipo De Celda De Combustible Microbiana Para El Tratamiento De Aguas Residuales Y Generación De Gas Metano a Partir De Residuos En Una Vivienda Rural Promedio En El Departamento Boyaca. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/31504>
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., & Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870–876. <https://doi.org/10.1002/ER.1397>
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3), 973–981. <https://doi.org/10.1007/S00253-010-2440-7/FIGURES/3>
- Universidad Nacional de Educación a Distancia. UNED. (2016). Energía y desarrollo sostenible :: El impacto de la energía. Retrieved May 22, 2023, from UNED Biblioteca website: <https://www2.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/impacto.htm>
- Wang, C. T., Chen, W. J., & Huang, R. Y. (2010). Influence of growth curve phase on electricity performance of microbial fuel cell by *Escherichia coli*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(13), 7217–7223. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2010.01.038>
- Yong, Y. C., Yu, Y. Y., Yang, Y., Li, C. M., Jiang, R., Wang, X., ... Song, H. (2012). Increasing intracellular releasable electrons dramatically enhances bioelectricity output in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*, 19(1), 13–16. <https://doi.org/10.1016/J.ELECOM.2012.03.002>