Evaluación del Potencial Energético de Subproductos del Beneficio del Cacao para la Obtención de Bioelectricidad en Celdas de Combustión Microbianas

Cesar Felipe Castro Leal

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

Evaluación del Potencial Energético de Subproductos del Beneficio del Cacao para la Obtención de Bioelectricidad en Celdas de Combustión Microbianas

Cesar Felipe Castro Leal

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Ambiental

Director: Wilmar Alirio Botello Suarez

Co-directora: Carel Elizabeth Carvajal Arias

Línea de Investigación:

Ingeniería para la sostenibilidad

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por darme la vida, la sabiduría, el respaldo y el conocimiento para poder desarrollar este proyecto y poder culminarlo de la mejor manera.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio durante estos años ya que sin ellos no hubiera sido posible llegar hasta este punto en mi vida. Además, a mi hermana y a mi novia por estar siempre presente, siendo un apoyo incondicional en todo momento.

A mi director, Wilmar Alirio Botello Suarez y co-directora Elizabeth Carvajal Arias por la confianza puesta en mi desde el primer momento, el tiempo dedicado, la paciencia y compromiso con el trabajo.

La Universidad El Bosque por brindarnos su conocimiento a través de los docentes durante esta etapa por el espacio que nos brindo para poder realizar la investigación y por formarnos como profesionales éticos y de calidad.

Finalmente, a las personas que estuvieron presentes durante todo el camino motivándome y aportando un granito de arena tanto a nivel académico como personal.

Tabla de Contenido

1. 11

2. 14

3. 16

4. 18

4.1 18

4.2 18

5. 19

5.1 19

5.2 26

5.3 Marco Geográfico **33**

4.4 Marco Institucional **35**

5.5 Marco Legal y Normativo **36**

5.6 Marco Metodológico **38**

6. Metodología ***39***

6.1 Metodología para objetivo específico Nº1 **39**

6.2 Metodología para objetivo específico Nº2: **42**

6.2.1 Diseño del prototipo de CCM **42**

6.2.2 Diseño experimental de una celda de combustible microbiano **44**

6.3 Metodología para objetivo específico Nº3 **45**

6.3.1 Implementación del prototipo de CCM de cámara doble **45**

7. Resultados y Discusión ***47***

7.1 Características fisicoquímica de mucílagos y lixiviados de fermentación del cacao colectadas en el municipio de Nunchía-Casanare. **47**

7.2 Sistema de CCM para el tratamiento y generación de energía limpia a partir de residuos del beneficio del cacao colectados. **50**

7.3 Eficiencia de producción de energía limpia empleando diferentes cargas orgánicas volumétricas. **52**

8. Conclusiones ***57***

9. Recomendaciones ***58***

10. Referencias bibliográficas *59*

11. Anexos *70*

11.1 Árbol de problemas usado para la generación de este estudio 70

11.2 Resultados de estadística (One-Way ANOVA con prueba post hoc de Tukey) 70

Lista de tablas

Tabla 1. Construcción del marco teórico de acuerdo a jerarquización de las teorías. 26
Tabla 2. Estudios de Bioelectroquímica. 27
Tabla 3. Marco Legal y Normativo. 36
Tabla 4. Variables dependientes e independientes 39
Tabla 5. Características fisicoquímicas iniciales 48
Tabla 6. Remoción de DBO y DQO 49
Tabla 7. Recuento de microorganismos en lodos tratados y sin tratamiento en agar nutritivo. 50

Lista de figuras

Figura 1. Principales vías de transferencia de electrones en un sistema de CCM. (A)microorganismos que transfieren electrones a través de estructuras inmovilizadas (biopelícula) por medio de una proteína periférica membranal; (B) transferencia de electrones a través de mediadores rédox; (C) transferencia de electrones a través de nanohilos Fuente: Sharma & Kundu. 2010 31
Figura 2. Mapa de Bogotá de localidades por estratos socio-económicos [Localidades: divisiones administrativas urbanas, con homogeneidad relativa desde el punto de vista geográfico, cultural, social y económico]. Fuente: Secretaría Distrital de Planeación Error! Bookmark not defined.
Figura 3. Mapa de Nunchía por Veredas. Fuente: Alcaldía Municipal de Nunchía. 34
Figura 4. Diagrama metodológico objetivo específico 2. 43
Figura 5. Prototipo del diseño de la CCM. Fuente: (Rodelo D.A, Velásquez M. 2021 [Datos no publicados]). Error! Bookmark not defined.

Figura 6. a. Materiales usados para el montaje de la CCM bicameral. b. Montaje final con carga volúmetrica de la CCM. c. Comparación de volúmenes de las tres cámaras diseñadas y construidas para este proyecto. Fuente: elaboración propia. 52
Figura 7. Comportamiento de la producción de energía (mV) de los subproductos del cacao en dos porcentajes diferentes. Fuente: elaboración propia. 53
Figura 8. Comportamiento de la producción de energía (mV) con la mezcla de residuos de cacao en dos concentraciones diferentes. Fuente: elaboración propia. 54
Figura 9. Comparación de la producción energética de los residuos de cacao individuales y combinados en dos porcentajes diferentes y en CCM de tamaños diferentes. Fuente: elaboración propia. *p<0,05 56

Lista de Anexos

Anexo 1. Árbol de problemas. 70
Anexo 2. Resultados de estadística (One-Way ANOVA con prueba post hoc de Tukey). 44

Resumen

Las celdas de combustión microbianas (CCM) constituyen una tecnología emergente para la generación de bioelectricidad, que además brinda soluciones asociadas a la estabilización de residuos orgánicos. El procesamiento de cacao genera una variada cantidad de subproductos, tales como Lixiviados y Mucílago, los cuales, pueden ser potencialmente empleados como sustrato en una CCM. En el presente estudio se evaluó el desempeño de un prototipo de CCM de cámara doble, utilizando lixiviado de cacao (LC), mucílago de cacao (MC) y un sistema mixto (LC + MC), a fin de estimar el potencial de estos subproductos para la obtención de bioelectricidad. Las CCM fueron operadas a una concentración de 20% y 60% de sustrato, evaluando su desempeño durante 10 días a temperatura ambiente. Las celdas fueron inoculadas con lodo anaerobio pre tratado térmicamente, verificando la generación de energía eléctrica en intervalos de una hora. Asimismo, se determinó la concentración de materia orgánica, medida como demanda química de oxígeno (DQO). La mayor generación de bioelectricidad fue evidenciada en el sistema mixto, con valores de hasta 29,3 mV y una remoción de DQO de 57,9%. Se concluye que es posible generar valores significativos de bioelectricidad empleando subproductos de cacao en un sistema mixto, con simultánea remoción de materia orgánica. El presente trabajo constituye un aporte para la optimización de sistemas de aprovechamiento de subproductos agroindustriales como fuente de energía renovable.

Palabras clave: celdas de combustión microbiana, subproductos del cacao, energías renovables

Abstract

Microbial fuel cells (MFC) are an emerging technology for the generation of bioelectricity, which also provides solutions associated with the stabilization of organic waste. Cocoa processing generates a variety of by-products, such as leachate and mucilage, which can potentially be used as a substrate in a MFC. In the present study, the performance of a double-chamber MFC prototype was evaluated, using cocoa leachate (CL), cocoa mucilage (CM) and a mixed system (CL + CM), in order to estimate the potential of these by-products to obtain bioelectricity. The MFC were operated at a concentration of 20% and 60% substrate, evaluating their performance for 10 days at room temperature. The cells were inoculated with pre-thermally treated anaerobic sludge, verifying the generation of electrical energy at intervals of one hour. Likewise, the concentration of organic matter, measured as chemical oxygen demand (COD), was determined. The highest generation of bioelectricity was evidenced in the mixed system, with values of up to 29.3 mV and a COD removal of 57.9%. It is concluded that it is possible to generate significant values of bioelectricity using cocoa by-products in a mixed system, with simultaneous removal of organic matter. The present work constitutes a contribution for the optimization of systems for the use of agro-industrial by-products as a source of renewable energy.

Keywords: microbial fuel cells, cocoa´s by-products, renewables energies.

1. Introducción

El cacao (*Theobroma cacao L.)* es un producto mundialmente valorado. Además de su sabor, este fruto aporta beneficios nutritivos importantes en la dieta humana. Este hecho lleva a apreciar el cacao como un producto de lujo. No obstante, investigadores señalan que generalmente se usa apenas el 20% del fruto (Parra, Henriquez, Villanueva., 2018). En consecuencia, en el sector industrial del cacao son desaprovechadas toneladas de subproductos generados durante su procesamiento (Parra, Henriquez, Villanueva., 2018). Entre estos subproductos están la cascarilla de cacao, la cáscara y el mucílago. Algunos estudios demuestran que con estos subproductos se pueden producir insumos para diferentes áreas como la nutrición, gastronomía y la industria alimentaria (humana y animal), así como importantes aportes en otras áreas de innovación como la cosmética, textil, cementera e industrial (García Barriga, V. I., & Ube Rodríguez, S. M. 2022). En Colombia, se ha venido aumentando gradualmente en la última década la producción de cacao, especialmente entre los años 2013 y 2018. En 2021, se registró la mayor producción de cacao de la historia con 70.205 toneladas producidas, según el Ministerio de Agricultura (MinAgricultura. 2021).

Uno de los enfoques menos estudiados para la utilización de subproductos de cultivos es la generación de energía. Actualmente, el 80% de la energía mundial todavía se origina por el uso de combustibles fósiles (Schamphelaire et al., 2008). Estos combustibles son limitados y su uso aumenta la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Schamphelaire et al., 2008). Por lo tanto, teniendo en cuenta que el consumo de energía está aumentando a nivel mundial, es prioritario el desarrollo de tecnologías que busquen obtener fuentes de renovables. Una alternativa de reciente desarrollo, pero de gran impacto, son las celdas de combustión microbianas (CCM), que dependen de microorganismos electrogénicos para generar electricidad a partir de materia orgánica y/o

inorgánica (Yusoff, Hu, Feng, Maeda, Shirai, Hassan, Yu, 2013). Estas celdas son capaces de convertir la energía bioquímica, especialmente la procedente de la degradación de materiales orgánicos, en energía eléctrica mediante la reacción catalítica de los microorganismos (Yusoff, Hu, Feng, Maeda, Shirai, Hassan, Yu, 2013). Las CCM han tenido un gran auge como sistema potencial de suministro de energía renovable que puede ser utilizada, partiendo de materiales orgánicos, como combustible. (Yusoff, Hu, Feng, Maeda, Shirai, Hassan, Yu, 2013).

El uso de las CCM permite la generación de energía eléctrica a través de lodos activados que son el resultado del tratamiento de aguas residuales, los cuales se conocen como un proceso biológico que permite desarrollar la depuración de origen natural donde los microorganismos presentes en el mismo permiten depurar el agua contamina a su estado natural (Castro, 2019). Las CCM constituyen un sistema de tratamiento y gestión de aguas residuales hacia fuentes de energía eficientes y sostenibles. Teniendo en cuenta que la acumulación de lodos residuales saturados y la eliminación de lodos son también cuestiones críticas que se relacionan con una mayor carga ambiental (Khursheed y Kazmi, 2011). La utilización de materiales de biomasa en las CCM se convertiría en un enfoque beneficioso para tratar los lodos y también proporciona un recurso energético alternativo.

Las CCM buscan también reducir los costos como medio sostenible para la producción de energía, reutilizando componentes orgánicos como carbohidratos, proteínas y biomasa. El valor que aportan estos sistemas en el proceso de obtención de energía a través de la materia orgánica, es que representan una alternativa respetuosa con el medio ambiente permitiendo la conversión directa de la energía del sustrato en electricidad, lo que permite una alta eficiencia de conversión (Muhammad Mohsin Javed, Muhammad Azhar Nisar, Muhammad Usman Ahmad, Nighat Yasmeen & Sana Zahoor, 2018). Además, las CCM funcionan eficientemente a temperaturas

ambiente, e incluso a bajas temperaturas, distinguiéndose de todos los procesos bioenergéticos actuales. Los sistemas CCM no requieren tratamiento de gas porque los gases de salida están enriquecidos en dióxido de carbono y normalmente no tienen ningún contenido de energía útil, así mismo, no necesitan aporte de energía para su aireación siempre que el cátodo sea aireado pasivamente (Adekunle, A., Gomez Vidales, A., Woodward, L., & Tartakovsky, B., 2021).

El lixiviado es uno de los subproductos generados durante la cosecha de cacao, que según características fisicoquímicas y bioquímicas evaluadas hasta el momento pueden ser potencialmente aprovechable como sustrato de las CCM. En literatura científica, son escasos estudios que han explorado el uso de las CCM para producción de energía bioeléctrica a partir de subproductos de cacao.

Por lo anteriormente expuesto, el presente proyecto tiene como objetivo evaluar el desempeño energético de un prototipo de celda de combustión microbiana (CCM) de cámara doble para la obtención de bioelectricidad mediante el empleo de los subproductos del beneficio del cacao.

2. Planteamiento del Problema

El beneficio del cacao se mantiene inalterado desde hace unos 150 años, donde los procesos principales son la recolección, fermentación, tostado, descascarado, molido y pulverizado, (Martínez Covaleda, Espinal, & Ortiz Hermida, 2005) generando en cada etapa un residuo específico. En la recolección, los frutos madurados y sanos son cortados directamente del árbol cuidadosamente para no dañar el fruto, la forma artesanal de la recolección involucra un corte longitudinal con machete para exponer los granos de cacao y la pulpa. En el desgranado, se extraen las semillas deslizando los dedos sobre la placenta del fruto, esta parte es considerada una impureza y puede afectar la calidad del producto, desde estas dos primeras etapas los principales subproductos que se producen son la mazorca, la cacota y la placenta (Aguilar, 2017; Fedecacao, 2005; Lema Naula, 2016). El siguiente paso es la fermentación siendo esta una etapa crucial debido a que se producen procesos bioquímicos, importantes en la generación de las principales características organolépticas como aroma y sabor (Graziani de Fariñas, Portillo, & Cros, 2006; Rivera Fernández et al., 2012). La industria del cacao se concentra principalmente en el procesamiento de las almendras, consideradas las semillas del fruto. En su fase de transformación industrial este fruto se utiliza en la producción de productos convencionales como polvo, licor, manteca y cobertura de cacao (Plasencia, 2016). Los subproductos como la mazorca, mucílago y cascarilla son desechados durante la cadena productiva. Estos lixiviados, que son fundamentales para la producción de alcoholes y ácido acético durante la fermentación, por lo general son desperdiciados, generando contaminación y siendo una fuente para el crecimiento de microorganismos. La cantidad de lixiviado que se produce varia de un 40 a 50 % de las semillas secas (Balladares Grazzo, 2015; Ortiz-Valbuena & Álvarez-León, 2015; Teneda, 2016; Vallejo Torres et al., 2016).

En el mundo, la demanda energética está en aumento y la mayoría de los recursos son limitados, lo cual representa repercusiones ambientales. El crecimiento demográfico y económico conlleva un consumo más de energía y en su mayoría energía basada en combustibles fósiles; teniendo en cuenta que la demanda mundial de energía todavía se satisface en un 30% de petróleo, un 27% de carbón y un 20% de gas (Pinilla, 2019). Por lo tanto, el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de energía limpias y renovables es un campo de investigación interesante y con impacto importante. Una de las alternativas que cobra interés son las celdas de combustión microbiana (CCM), puesto que, en funcionamiento, pueden llegar a disminuir los impactos ocasionados por los combustibles fósiles y las fuentes agotables que son implementadas comúnmente, a su vez teniendo un impacto positivo en los ámbitos social, económico y ambiental. Uno de los sustratos orgánicos que se pueden utilizar para potenciar el nivel energético de las CCM es el cacao, teniendo en cuenta que durante su proceso se generan alrededor de 10 toneladas de material de desecho (húmedo) por cada tonelada de grano de cacao seco.

De este modo, se aprovecha en su totalidad solo las semillas de cacao lo que corresponde solamente a un 20-23% del fruto (Lozano, 2020). De igual forma las CCM permite la generación de energía eléctrica a través de lodos activados que son el resultado del tratamiento de aguas residuales, los cuales, se conocen como un proceso biológico que permite desarrollar la depuración de origen natural (Castro, 2019), donde los microorganismos presentes en el mismo permiten depurar el agua contamina a su estado natural.

Teniendo en cuenta lo anterior se formula la siguiente pregunta ¿Cuál es el desempeño de un sistema de CCM para la producción de energía eléctrica a partir de los subproductos del cacao?

3. Justificación

Los subproductos del procesamiento industrial del cacao como la mazorca, la cacota, la placenta y el mucílago, representan el 67-76% del peso del fruto del cacao y generan un desperdicio e impacto ambiental después de su proceso industrial. Por otro lado, la demanda de energías renovables mundialmente ha experimentado un incremento sostenible teniendo diversos factores como la creciente importancia de las energías limpias, el alza de precios en las energías de origen fósiles y apoyos incentivando la producción y consumo de energía renovables.

La tecnología que es capaz de generar energía a partir de las CCM como alternativa al uso de combustibles fósiles tiene la finalidad de obtener energía eléctrica a través de microorganismos que convierten la energía química encontrada en un sustrato, en energía eléctrica, a partir de procesos de oxidación y reducción de cueros microorganismos en la materia orgánica presente en aguas residuales (Molina, Mancilla, Assi, & Borges, 2017).

Cabe resaltar que, las CCM no solo favorecen a la obtención de energía renovable, sino también trae consigo beneficios a nivel ecológico, mediante la contribución al tratamiento de las aguas servidas debido a su degradación y, además, disminuyendo la generación y mala disposición de residuos provenientes del proceso industrial del cacao. De igual forma, a nivel social por medio de la implementación de un proceso que permita un eventual cambio en las líneas de producción por otras más eficientes, se busca convertir a la comunidad de Nunchía en un ejemplo por sus buenas prácticas industriales y responsabilidad ambiental. Así mismo, en el ámbito económico con un propósito de alcanzar la eficiencia en sus procesos, incentivándolos a la aplicación de metodologías innovadoras, en este trabajo se propuso disminuir el gasto energético generando así, ingresos adicionales a los campesinos a mediano y largo plazo, además de potencializar

significativamente el cumplimiento de los requisitos legales exigidos por los entes de control en esta zona de estudio. Por tal motivo, este sistema desde la ingeniera ambiental, representa una posible solución en términos de salud ambiental para la población y los ecosistemas aledaños.

Por lo anterior, se hace prescindible el desarrollo de prácticas sustentables, dando cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), mediante el uso de tecnologías innovadoras y alternativas como lo son las CCM, específicamente a las metas propuestas por el Objetivo No. 7 el cual, habla de energía asequible y no contaminante, por ello se busca implementar una celda de combustión microbiana con el objetivo de evaluar el potencial energético obtenido a partir de la actividad microbiana en función del sustrato obtenidos a partir de una biomasa o vertimientos con elevados contenidos de materia orgánica.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño energético de un prototipo de celda de combustión microbiana (CCM) de cámara doble para la obtención de bioelectricidad mediante el empleo de subproductos del beneficio del cacao (lixiviado y mucílago).

4.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de subproductos del beneficio del cacao (lixiviado y mucílago) a partir de muestras colectadas en el municipio de Nunchía-Casanare.

2. Establecer un sistema de CCM para la estabilización y generación de bioelectricidad a partir de subproductos del beneficio del cacao colectados.

3. Determinar la eficiencia de producción de bioelectricidad empleando diferentes cargas orgánicas volumétricas a partir de sistemas operados con mucílago y lixiviados del cacao.

5. Marco de referencia

5.1 Marco de Antecedentes

Durante la década de los 60's, las celdas de combustión microbiana (CCM) fueron desarrolladas con el objetivo de obtención de electricidad, pero enfocada a la construcción de un sistema energético eficiente para la industria espacial. El principio fundamental que demostró la posibilidad de generar electricidad mediante la interacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno fue propuesto por William Grove en 1839 (Livano, 2012; Pineda & Rosas, 2016). En la década de los 80's, el interés alrededor de las celdas de combustible microbianas creció de forma significativa y las bases reguladoras del consorcio microbiano como catalizador anódico empezaron a ser investigadas en trabajos llevados a cabo con cultivos puros, mediadores para la transferencia de electrones entre bacterias y electrodos y fuentes de carbono no complejas (Thurston et al., 1985). Posterior al descubrimiento de Grove, diversos científicos sentaron bases para las nuevas investigaciones en celdas de combustible, como la experimentación con distintas configuraciones de reactor y combinaciones de fuentes de carbono y las eficiencias (Mera, 2015; Pineda & Rosas, 2016).

- Artículo Nº1

Plasencia-Verde, C. C., Grabiel-Rios, K. S., Luque, J. A., & Best, I. K. (2021) Evaluación del potencial energético de residuos de cacao (Theobroma cacao L.) por medio de celdas de combustible microbiano (CCM).

Contenido: El objetivo de esta investigación es evaluar el potencial energético de los residuos del cacao como una fuente de energía directa en campo. Teniendo en cuenta que, en la cadena

productiva del cacao, el 70% es representado por los residuos sólidos y líquidos, entre los cuales se encuentra la mazorca, el mucílago y lixiviados de la fermentación e impurezas. La mazorca de cacao se desecha 10 veces más respecto al peso en producción de semillas de cacao y el vertimiento del beneficio del cacao al suelo produce un cambio en las propiedades químicas del mismo. Por ello, las celdas de combustión microbiana (CCM) representan una innovación tecnológica, generadora de energía, la cual aprovecha la capacidad catalizadora de los microorganismos sobre la materia orgánica.

Metodología: Se describen cinco subsecciones para la presente investigación: electrodos y contracción de la celda de combustible, tratamientos, aclimatación de los microorganismos, experimento, desempeño eléctrico y análisis de datos.

Conclusión: Las muestras de mazorca 1.20 g y mucílago 12.50% presentaron los mayores desempeños eléctricos frente a las diluciones evaluadas. El máximo potencial eléctrico obtenido de los residuos de cacao durante el presente estudio fue de 0.01 mW. Recomiendan realizar mayores estudios con la muestra de mucílago y concentraciones superiores de mazorca, incluyendo aumento de tamaño de la celda, variación de electrodos, disminución de resistencia externa y configuración de circuito alterno.

Referencia; Plasencia-Verde, C. C., Grabiel-Rios, K. S., Luque, J. A., & Best, I. K. (2021). Evaluación del potencial energético de residuos de cacao (Theobroma cacao L.) por medio de celdas de combustible microbiano (CCM). Información tecnológica, 32(4), 89-98.

- Artículo Nº 2

Ortiz, D. I. (2019): Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica.

Contenido: Se presenta la construcción e implementación de una celda de combustible microbiana a escala de laboratorio para la generación de energía eléctrica usando aguas residuales sintéticas y consorcios bacterianos; enfocado en determinar el efecto que genera el tipo de membrana teniendo en cuenta las características de funcionamiento de la celda y analizando parámetros operacionales de la celda, con electrodos fabricados con metales puros como la plata, además de determinar el efecto del tipo de membrana variando los materiales entre nitrilo y caucho evaluando el aumento de eficiencia eléctrica facilitando el transporte de electrones.

Metodología: Se basó en un nivel de investigación tomando investigaciones básicas empleando una metodología cuantitativa de carácter explicativo ya que se centra en el control de variables durante el proceso de obtención de energía eléctrica. Llevó a cabo una población y un muestreo de tipo casual, teniendo en cuenta las técnicas e instrumentos para la recolección de datos y su procesamiento. La investigación consiste en dos fases, la fase 1 se realizó el aislamiento de microorganismos y la fase 2 en la construcción de la celda de combustible microbiana.

Conclusión: Al emplear diferentes tipos de membranas influye directamente en los valores de las características funcionales de la CCM, obteniendo resultados muy bajos con el material de caucho, mientras que en la membrana con nitrilo los resultados fueron mejores. Todas las membranas presentaron un mejor desempeño al usar electrodos de plata.

Referencia: Ortiz, D. I. (2019). Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica (Bachelor's thesis).

- Artículo Nº 3

Hurtado, N., Revelo, D., & Ruiz, J., (2013): Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica.

Contenido: Se presentan y discuten los aspectos más importantes que inciden en el desempeño de una celda de combustible microbiana, tales como su arquitectura, la función microbiana y el tipo de sustratos. En la última década estos sistemas bioelectroquímicos han atraído el interés de diversos investigadores, no sólo por la tendencia mundial en la producción de energía sostenible, sino también por su operación simultánea para degradar materia orgánica y biorremediación. Investigar más sobre estos aspectos será esencial para optimizar y potenciar estos procesos.

Metodología: revisión de la literatura, análisis y discusión de la información.

Conclusión: La CCM es una tecnología promisoria para propósitos de generación alternativa de energía, remoción de materia orgánica y biorremediación; sin embargo, para aplicaciones prácticas es necesario mejorar la eficiencia en los procesos bioelectroquímicos y en el desempeño eléctrico, por lo que se requiere investigar más en aspectos como diseño, comunidades microbianas, tipo y concentración de sustratos.

Referencia: Hurtado, N., Revelo, D., & Ruiz, J., (2013) Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica., Universidad de Nariño. En línea: https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n6/art04.pdf

- Artículo Nº 4

Bretschger,O., Osterstock, J., Pinchak, W., Ishii, S., & Nelson K. (2010): Microbial Fuel Cells and Microbial Ecology: Applications in Ruminant Health and Production Research.

Contenido: Se ha planteado la hipótesis de que los mecanismos de transferencia de electrones microbianos que permiten la producción de electricidad en los CCM pueden ser una estrategia cooperativa dentro de consorcios microbianos mixtos que están asociados o son una alternativa a la transferencia de hidrógeno (H2) entre especies. Los CCM pueden servir como herramientas únicas para estudiar este complejo sistema ecológico. Además, los sistemas CCM ofrecen un enfoque novedoso para estudiar las biopelículas que se forman bajo diferentes condiciones redox y pueden aplicarse para lograr una mejor comprensión de cómo las biopelículas microbianas impactan la salud animal. Se busca comprender la ecología microbiana del rumen, las biopelículas microbianas relacionadas con la salud animal y cómo los CCM pueden aplicarse aún más en la investigación de rumiantes.

Metodología: La revisión de la literatura, su análisis y la discusión.

Conclusión: La capacidad de examinar los vínculos entre los rumiantes y las comunidades microbianas en contextos ecológicos será necesaria para derivar la próxima evolución de las intervenciones que pueden mejorar la producción y mitigar los impactos ambientales, Las aplicaciones de los CCM y la capacidad de cultivar poblaciones microbianas específicas que se describen aquí no son exhaustivas y no pueden considerarse factibles sin incorporar herramientas avanzadas para caracterizar la diversidad molecular de las comunidades microbianas mixtas; Las oportunidades de investigación proporcionadas por la tecnología CCM se extienden más allá de la generación de electricidad y representan una oportunidad única para estudiar y controlar el impacto

de la ecología y fisiología microbiana en sistemas complejos como los que se encuentran en la biología de rumiantes.

Referencia: Bretschger,O., Osterstock, J., Pinchak, W., Ishii, S., & Nelson K. (2010) Microbial Fuel Cells and Microbial Ecology: Applications in Ruminant Health and Production Research., Microb Ecol. 2010 Apr; 59(3): 415–427. En línea: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2855437/

- Artículo Nº5

Título/autores: Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. Liesje De Schamphelaire, Leen Van den Bossche, Hai son dang, Mónica Höfte, Nico Boon, Korneel Rabaey, Willy Verstraete.

Contenido: Las plantas vivas transportan cantidades sustanciales de material orgánico al suelo. Este proceso, llamado rizodeposición, proporciona el sustrato para la comunidad microbiana rizosférica. En este estudio, se utiliza una celda de combustible microbiana de sedimentos a escala de laboratorio, cuyo ánodo se coloca en la rizosfera de las plantas de arroz, para oxidar microbianamente los compuestos orgánicos derivados de plantas.

Metodología: Se generó una corriente eléctrica a través de la oxidación in situ de rizodepósitos de plantas de arroz vivas.

Conclusión: Se encontró que la producción de energía eléctrica de una celda de combustible microbiana de sedimento era un factor 7 mayor en presencia de plantas en crecimiento activo. Este proceso ofrece el potencial de generación de energía impulsada por la luz a partir de plantas vivas de una manera no destructiva.

Referencia: Schamphelaire, L. D., Bossche, L. V. d., Dang, H. S., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. Environmental Science & Technology, 42(8), 3053-3058. doi:10.1021/es071938w

- Artículo Nº 6

Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005).: Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation.

Contenido: Las celdas de combustible microbiana (CCM) brindan nuevas oportunidades para la producción sostenible de energía a partir de compuestos reducidos biodegradables. Las CCM funcionan en diferentes carbohidratos y sustratos complejos en aguas residuales. Estás celdas cuentan con ventajas operativas y funcionales sobre las tecnologías que se utilizan, debido a que la conversión directa de la energía del sustrato en electricidad permite una alta conversión de eficiencia, también funcionan de manera eficiente a temperatura ambiente e incluso en bajas temperaturas que lo distinguen de trozos los procesos bioenergéticos.

Metodología: La revisión de la literatura, su análisis y la discusión.

Conclusión: Las pilas de combustible microbianas están evolucionando para convertirse en una simple y robusta tecnología.

Referencia: Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. Trends in Biotechnology, 23(6), 291-298. doi:10.1016/j.tibtech.2005.04.008

5.2 Marco teórico-Conceptual

Debido a que este proyecto de investigación tiene por objetivo evaluar el desempeño energético de un prototipo de celda de combustión microbiana (CCM) de cámara doble para la obtención de bioelectricidad mediante el empleo de subproductos del beneficio del cacao (lixiviado y mucílago), a continuación se expone las teorías y/o conceptos con mayore relevancia para un adecuado desarrollo de la investigación de manera jerarquizada; es decir, de la más general a la más particular, aclarando que las teorías fundamentales de las CCM están divididas en dos aspectos: por un lado, se encuentra la generación de energía eléctrica; y, por otro lado, la generación de residuos orgánicos (Tabla 1).

Tabla 1. *Construcción del marco teórico de acuerdo a jerarquización de las teorías.*

Componente	**Generación de energía eléctrica a partir del funcionamiento de una CCM**	**Generación de residuos del Cultivo y beneficio del Cacao**
General a Particular	Energías alternativas	Disposición de los residuos de la producción del cacao
	Bioelectroquímica	Subproductos del cacao
	Bioenergía microbiana (microorganismos electrogénicos)	Lixiviado y Mucilago

Fuente: Autor, 2022

Energías Renovables

La energía hidroeléctrica representa actualmente, la forma principal para generar energía eléctrica. También proporciona estabilidad y confiabilidad a la red, así como un apoyo equilibrado a la energía renovable intermitente, como la energía eólica y solar. Se espera que la participación futura de la energía hidroeléctrica en la producción mundial de electricidad y el suministro total de energía en 2050 sea de alrededor del 20 y el 6%, respectivamente. (Destouni, G., & Frank, H. 2010)

Bioelectroquímica

La bioelectroquímica consiste en la intermediación entre la biología y la electroquímica, ya que sus aplicaciones, sus procesos y materiales dependen de la participación de componentes y/o procesos biológicos que son influenciados por técnicas electroquímicas. Los componentes pueden ser organismos, orgánulos, células y enzimas (Milazzo et al., 1983; Schröder et al., 2015). También se puede definir como una rama del estudio de las interacciones redox en organismos de origen biológico, mediante la aplicación de técnicas utilizando microorganismos capaces de moléculas redox o de transporte de electrones a electrodos (Alhogbi, 2019). Por lo tanto, este tema ha sido ampliamente estudiado en el campo de la electroquímica microbiana, enzimática y de proteínas, y en la aplicación de la bioelectroquímica existen CCM, biosensores, bioelectrocatalizadores, etc (Farias. 2016). (Tabla 2)

Tabla 2. *Estudios de Bioelectroquímica.*

Nombre	Abreviatura	Función	Comentario	Referencias
Celda de combustión microbiana	CCM	Convertir el sustrato directamente a electricidad.	La oxidación de la materia orgánica tiene lugar en el ánodo y los electrones son conducidos al cátodo a través de un circuito externo.	Rabaey y Verstrate (2005); Logan y col., (2006).
Celda de combustión microbiana	CCSM	Degradar sustrato o sedimentos presentes en el suelo, y obtener electricidad.	Es una CCM también conocida como CCM bentónica.	Domínguez-Garay y col. (2013); Liu y col. (2015).
Celda de remediación microbiana	CRM	Remediar de contaminantes subterráneos.	Es una CCM. Utilizan los electrodos como aceptores (ánodo) o donantes (cátodo) de electrones.	Huang y col. (2011b).
Celdas solares microbianas	CSM	Integrar la reacción fotosintética con la producción de electricidad microbiana.	Es una CCM. Utiliza las relaciones sinérgicas entre la fotosíntesis y los organismos de las bacterias activas	Strik y col. (2011).

Celda de electrólisis microbiana	CEM	Generar hidrógeno y/o reducir metales pesados añadiendo eléctrica al sistema.	La producción de hidrógeno se lleva a cabo en el cátodo.	Call y col. (2009); Rabaey y Rozendal (2010).
Sistema de electrosíntesis microbiana	SEM	Permitir los flujos metabólicos y seleccionar las reacciones de oxidación que se producen. Generar compuestos orgánicos solubles como el ion acetato.	Es una CEM. Permite la separación física entre el compartimiento que recibe la materia orgánica a tratar y el compartimiento en el cual se realiza la síntesis de las moléculas de interés. recibe la materia orgánica a tratar y el compartimiento en el cual se realiza la síntesis de las moléculas	Nevin y col. (2010).
Celda de electrodiálisis inversa microbiana	CEIM	Generar hidrógeno sin la necesidad de añadir energía eléctrica al sistema.	Es una CEM. Incluye una pila de electrodiálisis inversa.	Nam y col. (2012).
Celda de electrólisis microbiana de electrodiálisis inversa y producción química	CEMEIPQ	Producir ácido y bases. Capturar carbono y producir hidrógeno simultáneamente. Desalinizar.	Es una CEM que incluye una pila de electrodiálisis inversa.	Zhu y col. (2013), Zhu y col. (2014) y Zhu y Logan (2014).
Celda de electrólisis microbiana para la producción de estruvita	CEMPE	Precipitar fosfato en el cátodo en forma de estruvita.	Es una CEM.	Cusik y Logan (2012).
Celda de metanogénesis microbiana	CCM	Favorecer la producción de metano desde el cátodo.	Es una CEM.	Luo y col. (2014).

Fuente*:* Farias (2016)

La bioenergía se considera una fuente de energía integral que se puede utilizar para producir electricidad, calor y combustibles. En un futuro se prevé que la principal opción de fuente energética a partir de biomasa sea a base de residuos de la silvicultura y la agricultura, en combinación con desechos orgánicos. Para 2050, se espera que la contribución de la bioenergía

sea aproximadamente el 20 % del suministro mundial de energía y el 10 % de la producción mundial de electricidad. (Destouni, G., & Frank, H. 2010)

Celdas de Combustión Microbiana

Son dispositivos cuyo objetivo principal es la obtención de energía eléctrica y promoción de nuevas oportunidades para la producción sostenible de energía a partir de compuestos biodegradables a través de microorganismos, que convierten la energía química encontrada en un sustrato complejo presente en las aguas residuales en energía eléctrica. Esto se da cuando los microorganismos están bajo ciertas condiciones y transfieren los electrones producidos en su actividad metabólica a un electrodo (ánodo) en lugar de hacerlo a un aceptor natural de electrones (como oxígeno) (Hurtado, Revelo & Ruiz, 2013). Una MFC convierte la energía disponible en un sustrato bio convertible, directamente en electricidad, como se mencionó anteriormente, esto se logra cuando las bacterias cambian del aceptador natural de electrones a un aceptador insoluble, como un ánodo. Esta transferencia puede producirse a través de componentes asociados a la membrana o mediante lanzaderas de electrones solubles, donde los electrones fluyen a través de una resistencia a un cátodo, en el que se reduce el aceptador de electrones (Rabaey & Verstraete, 2005).

Las celdas de combustión, son consideradas como una tecnología emergente y han sorprendido entre las tecnologías energéticas alternativas por sus ventajas, operan eficientemente a temperatura ambiente e incluso a bajas temperaturas, producen menor cantidad de CO2 que cualquier otra tecnología y no necesitan aporte de energía siempre que el cátodo abiótico sea aireado pasivamente (Hurtado, Revelo & Ruiz, 2013). Otra gran ventaja de las celdas de

combustión radica en su alta eficiencia durante la conversión energética que puede ser hasta del 95% (Mosquera & Merino, 2006).

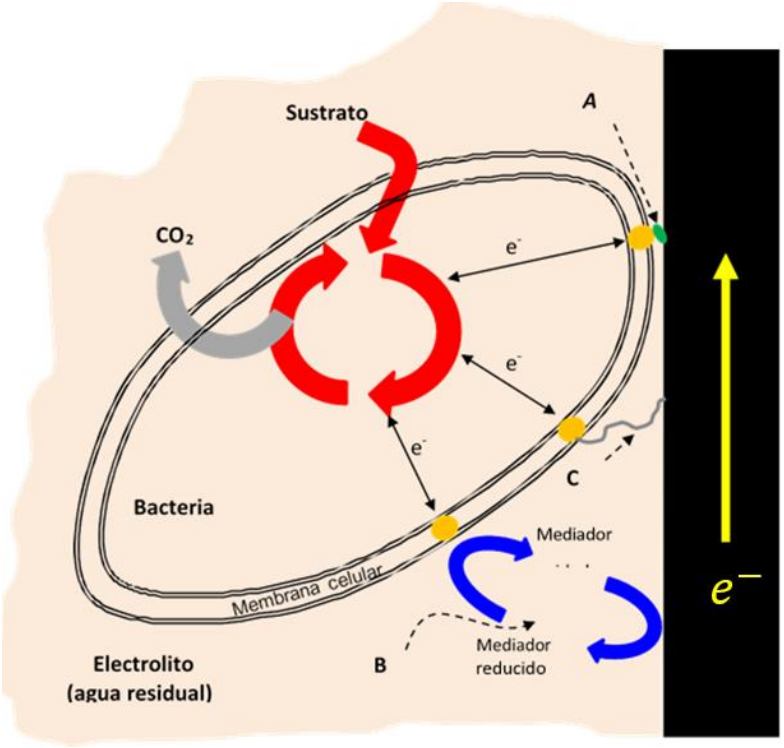
El principio por el que las celdas de combustión microbianas son consideradas un tipo de bio-reactores, es porque emplean microorganismos electrógenos para la producción de energía, estos microorganismos representan un método plausible para la producción de energía pues las bacterias se auto producen, haciendo que el catalizador para la oxidación de la materia orgánica sea auto sostenible. Estas reacciones pueden ser llevadas a cabo en diferentes temperaturas (15-35ºC), (50-60ºC) y (>15ºC) (Sharma & Kundu, 2010). Las CCM transforman un sustrato biodegradable en electricidad.

El ánodo, es uno de los componentes fundamentales de las cámaras de combustión microbiana, es donde los microorganismos catalizan la oxidación y liberan electrones como resultado de la respiración. El ánodo se ubica en la cámara anódica, tiene que estar libre de oxígeno para aumentar la eficiencia de la generación de energía eléctrica (Ortiz, 2019). Los electrones que llegan al cátodo, a través de un circuito externo, se combinan con los protones, que se difunden desde el ánodo a través del separador y con el oxígeno presente en el área circundante al cátodo. En su mayoría los materiales utilizados en el ánodo pueden ser empleados como cátodos, y estos pueden ser expuestos al aire (Ortiz, 2019).

Las celdas de combustible microbianas explotan el metabolismo energético de los microbios que interactúan eléctricamente con las superficies conductoras del sistema (electrodos) y tienen la capacidad de intercambiar electrones con un electrodo y producir una corriente eléctrica. También son sistemas electroquímicos biocatalizados que funcionan convirtiendo la energía química en energía eléctrica a través de una cascada de reacciones redox. (Redondo, 2018).

Estos microorganismos se han encontrado en gran diversidad de entornos como suelos, sedimentos, agua de mar o agua dulce, pero también en muestras recolectadas de una amplia gama de diferentes ambientes ricos en microorganismos, como los lodos activados o efluentes industriales y domésticos. (Santoro, Arbizzani, Erable y Ieropoulos, 2017).

Figura 1. *Principales vías de transferencia de electrones en un sistema de CCM. (A)microorganismos que transfieren electrones a través de estructuras inmovilizadas (biopelícula) por medio de una proteína periférica membranal; (B) transferencia de electrones a través de mediadores rédox; (C) transferencia de electrones a través de nanohilos Fuente: Sharma & Kundu. 2010*



Fuente: Salazar, 2013

Cultivo y beneficio del cacao

De acuerdo a su origen ancestral, el cacao es llamado la bebida de Dios (Theo=Dios, Broma=bebida) y pertenece a la especie vegetal Theobroma cacao L.Su descubrimiento se atribuye a la población olmeca entre 1500 y 400 a.C. Originario de las selvas

tropicales neotropicales, sus frutos se denominan “vainas” y contienen “granos de cacao” con una pulpa dulce mucilaginosa circundante. Para convertirse en uno de los productos de mayor consumo global: el chocolate, las semillas de cacao deben pasar por varios procesos, como la fermentación, el secado y el tostado. Se cree que los compuestos bioactivos, en particular los polifenoles y las metilxantinas, son los responsables de propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Jean-Marie, E., Bereau, D., & Robinson, J. C. 2021). Hoy en día, los trastornos metabólicos como la diabetes, están en aumento, y estudios recientes in vitro e in vivo sobre los compuestos del cacao revelaron acciones preventivas como actividades antidiabéticas y antiobesidad. El cacao tiene muchas variedades que se pueden distinguir por factores morfogeográficos y genéticos. Estos factores influyen en la composición de cada parte de la planta, incluidos los granos de cacao (Jean-Marie, E., Bereau, D., & Robinson, J. C. 2021).

En la cadena productiva del cacao este ha representado el 70% de los residuos sólidos entre los más comunes está el mucílago, mazorca y los lixiviados de la fermentación e impurezas. El mucílago es un residuo viscoso debido a su contenido de pectina y otros polisacáridos. La mazorca es un fruto, una baya grande y ovalada, carnosa, cuya coloración tiende del amarillo a púrpura y es de unos 30 cm de largo. Dentro de cada mazorca de cacao se encuentran entre 30 y 40 semillas, incrustadas en una pulpa (Plasencia-Verde, Grabiel-Rios, Luque, & Best, 2021).

Lixiviado

Son sustancias líquidas con una composición química similar a la del sustrato, según Nájera (Najera A., s.f) reportan que la descomposición de residuos y el vertido de lixiviados tienen un impacto directo en las condiciones del suelo, ya que este es el soporte y fuente de nutrientes necesarios para el normal desarrollo de las plantas. Al mismo tiempo, afectan los hábitats de

varios micro y macro organismos, que pueden modular la captura de carbono, las emisiones de gases de efecto invernadero, la dinámica de la materia orgánica y las condiciones de los cuerpos de agua (Ortiz. 2015). Es por esto que la saturación de suelos con material proveniente de cultivos amenaza la protección de estos organismos, los cuales son necesarios para mantener una adecuada calidad del suelo.

Mucílago

Es una sustancia pegajosa contenida en la planta de cacao y generalmente es transparente. Sus frutos contienen de 30 a 50 semillas, que pueden variar en número, forma y tamaño, son cuerpos ovalados planos, de 2 a 4 cm de largo, rodeados de una cáscara blanca y azucarada, compuesta principalmente de parénquima. El mucoplasma está compuesto por células parenquimatosas esponjosas muy ricas en azúcares, pentosas, ácido cítrico y sales (Urgilés. 2018). Sin embargo, el Mucílago tiene actualmente nuevos usos en la producción de sustancias con aplicaciones como herbicida, fungicida, insecticida entre otros beneficios el aprovechamiento de este.

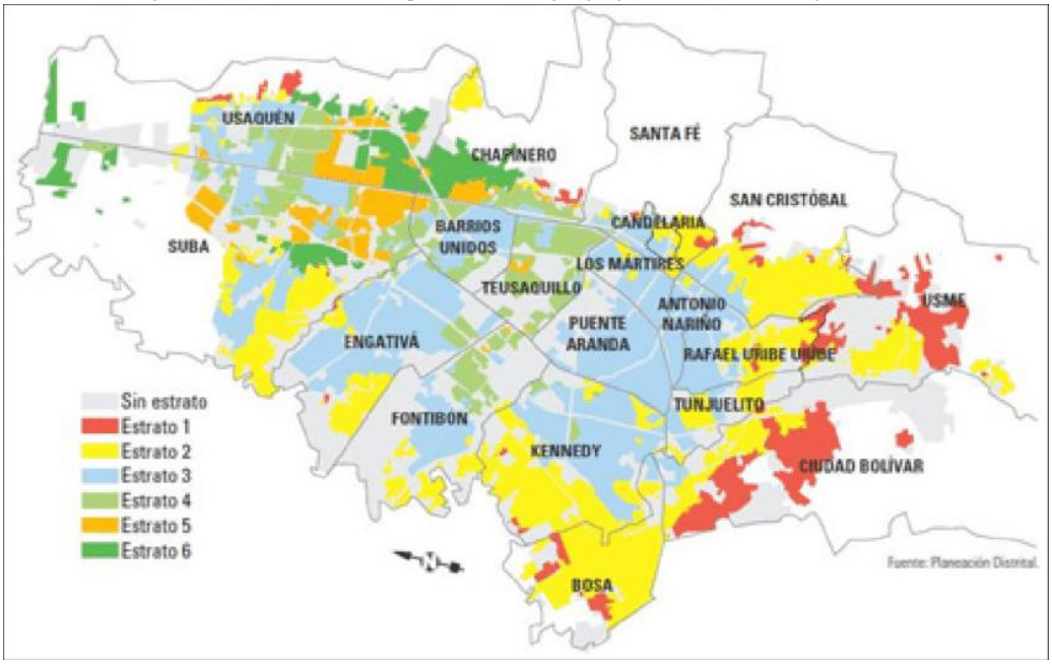
5.3 Marco Geográfico

El área de estudio comprende un territorio ubicado en la ciudad de Bogotá capital de la República de Colombia ubicada en el Centro del país a 2.600 metros sobre el nivel del mar, en la cordillera oriental en el borde oriental de la Sabana de Bogotá, que es la altiplanicie más alta de los Andes colombianos la capital del país tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente con un área tiene un área total de 1776 km² y un área urbana de 307 km² y se encuentra situada en las siguientes coordenadas: Latitud Norte: 4° 35'56" y Longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51". Está dentro de la zona de confluencia intertropical,

produciendo dos épocas de lluvia; en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y en la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre (Alcaldía de Bogotá, 2021).

El área de estudio comprende como un segundo territorio en el departamento del Casanare, el municipio de Nunchía con una extensión territorial de 1.149.126 Km2 2.62% de superficie total del territorio Casanareño y una extensión en el área urbana:5.7 Km2. , con una población de 8.827 habitantes (2.112 área urbana) y 6.715 (área rural). El municipio de Nunchía se localiza en la Orinoquia Colombiana al Norte del Departamento de Casanare cual limita por el norte con el Municipio de Támara, por el oriente con los Municipios de Pore y San Luís de Palenque, por el Sur con San Luís de Palenque y Yopal, por el occidente con el departamento de Boyacá, con una altura de 380 msnm, con una temperatura que oscila entre 22.5°C – 31.1°C.

Figura 2. *Mapa de Bogotá de localidades por estratos socio-económicos [Localidades: divisiones administrativas urbanas, con homogeneidad relativa desde el punto de vista geográfico, cultural, social y económico].*



Fuente: Secretaría Distrital de Planeación

Figura 3. *Mapa de Nunchía por Veredas.*

Fuente: Alcaldía Municipal de Nunchía.

4.4 Marco Institucional

El presente proyecto cuenta con 4 entidades gubernamentales y privadas que inciden de manera directa o indirecta sobre él mismo, entre estas tenemos: como actor directo a la Universidad El Bosque, institución de educación superior a la que se confiere la autoría intelectual del trabajo de investigación, que será utilizado por el Programa de Ingeniería Ambiental. El Ministerio de Minas y Energía, el cual se le atribuye el "promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del

abastecimiento energético" de la mano con La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), la cual establece el procedimiento y los requisitos para obtener la certificación que avala los proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía y El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la cual establece el "procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables y regula las acciones velando por la recuperación, conservación, protección, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales".

5.4 Marco Legal y Normativo

Tabla 3. *Marco Legal y Normativo.*

Año	Normativa	Entidad que Avala	Contenido y Artículos Relacionados
1991	Constitución Política de Colombia	Congreso de la República	**Art 79.** Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano (Congreso de la República, 1991). **Art 80.** Planificación de los recursos naturales por parte del Estado (Congreso de la República, 1991).

2014	Ley 1715	Congreso de la República	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.", que busca, además, promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda (Congreso de la República, 2014)
2018	Resolución UPME 703	Ministerio de Minas y Energía	Por la cual se establecen el procedimiento y los requisitos para obtener la certificación que avala los proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), con miras a obtener el beneficio de la exclusión del IVA y la exención de gravamen arancelario de que tratan los artículos 12 y 13 de la Ley 1715 de 2014, y se adoptan otras disposiciones.
2018	Resolución 1303	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se modifica la Resolución 1283 de 2016, por la cual se establece el procedimiento y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental por nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables - FNCER y gestión eficiente de la energía y se dictan otras disposiciones (MADS & Gobierno de Colombia, 2018).

Fuente: Autor, 2022

5.5 Marco Metodológico

Con base al enfoque definido, fue seleccionado el diseño exploratorio secuencial (DEXPLOS) y experimental como método de la investigación, dado que posee datos de ambos tipos (cualitativos y cuantitativos) pero son diseños de aplicación independiente, aplicando el primer enfoque seguidamente el otro proporcionando una visión completa y holística del problema de estudio. Así mismo, permite diferenciar qué método es el que da inicio en el proyecto, siendo en este caso el cualitativo, encargado de identificar el potencial energético de los subproductos del beneficio del cacao, además, por medio de la integración de datos (cuantitativo) de producción de energía, medida por la cantidad de energía producida (medida en voltios), se logre analizar de qué manera se pueden adaptar y/o aumentar la producción de energía (Hernández Sampieri et al., 2014).

Este es un proyecto de investigación de tipo descriptivo, que determina la búsqueda de los fenómenos desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo. Frente a lo cuantitativo se aplica en estudios de tipo predictivo y se puede establecer una relación con diversas variables, en este caso para nuestro proyecto se asocia con las posibilidades de poner obtener energía a través de los subproductos del cacao con la utilización de una CCM, en el cual se puede aplicar un estudio de modelo explicativo basado en ecuaciones estructuras que se propone durante la búsqueda y comprensión, con el fin de obtener una explicación a las hipótesis que se han planteado. Por otro lado, está desde el punto cualitativo en el que se permiten proponer diseños basados en análisis lingüísticos que puedan llegar a la construcción de un paradigma y una mejor comprensión del fenómeno en el cual se pueda evidenciar los elementos esenciales de nuestra investigación.

Tabla 4. *Variables dependientes e independientes*

Independientes	Dependientes
Tiempo de construcción de la CCM	Afecta el rendimiento de la construcción. O Atrasar las actividades programadas
Funcionamiento de la CCM	Resultados positivos o negativos del funcionamiento ¿Funcionó o no funcionó?
Ejecución de la celda de combustión microbiana	Pruebas y ensayos de la celda de combustión
Evaluación del potencial energético con los subproductos del cacao	Comparar el desempeño de la CCM

Fuente: Autor, 2022

6. Metodología

6.1 Metodología para objetivo específico Nº1

Determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de los subproductos del beneficio del cacao (lixiviados y mucílago) a partir de muestras colectadas en el municipio de Nunchía-Casanare.

- Determinación de sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST) de los lodos activados
  - Para este estudio se usaron lodos anaerobios como inóculo para la celda de combustión microbiana provenientes de un biodigestor diseñado en el proyecto "Codigestión anaerobia para el aprovechamiento energético de los residuos orgánicos generados en la finca "Las Huertas", vereda "El Hatillo" (Guatavita, Cundinamarca)" (Briceño L., Delgadillo K, Botello W. 2021). Para la determinación de SV y ST inicialmente se realizó un pretratamiento del lodo de inoculación siguiendo el protocolo reportado por Vamshi (K. Vamshi Krishna, 2016). El procedimiento se denomina choque térmico a temperatura de selección. Se calentó el lodo a 80°C, durante una hora y se incubó a temperatura ambiente

durante 24 horas en condiciones anaeróbicas en frascos Schott de 200 mL cerrados herméticamente.

La determinación de ST y SV se realizó teniendo en cuenta los métodos normalizados establecidos en APHA (2005). Se realizó con un volumen final de 50 mL de lodo (tratado y sin tratar), en cápsulas de porcelana previamente tratadas. Las muestras se colocaron en horno a una temperatura de 105°C por 24 horas. A continuación, los lodos fueron sometidos a una temperatura de 550°C en mufla por 2h. El cálculo de ST y SV se indica en las siguientes expresiones:

Fórmula 1. *Sólidos Totales*

$$ST = (Ms - Mr) \times 1000 / Vm$$

Fórmula 2. *Sólidos Volátiles*

$$SV = (Ms - Mc) \times 1000 / Vm$$

Donde,

ST, SV = Sólidos totales, sólidos volátiles (mg/L)

Ms = Masa de la muestra seca a 105°C más Mr (mg)

Mr = Masa del recipiente (mg)

Mc = Masa de cenizas (550°C) más Mr (mg)

Vm = Volumen de la muestra (mL)

Adicionalmente se realizó una medición de pH de los lodos pretratados con el equipo medidor de pH UltraBasic pH Benchtop Meters (Denver Instrument. USA).

- Características fisicoquímicas de lixiviados y mucílago: Demanda Química de Oxígeno y Demanda Bioquímica de Oxígeno.

  La recolección de los lixiviados de la fermentación del cacao se realizó en botellas de 1.5 L y se llevaron a congelación. Para la obtención de los valores de DQO se usó el equipo de espectrofotometría Spectroquant→ TR 420 y las Soluciones A+B para DQO de Merck, previamente se descongeló el lixiviado a temperatura ambiente y se prepararon tres diluciones del lixiviado: 1/2: 500 ⌈L de lixiviado en 500 ⌈L de agua destilada; 1/50: 200 ⌈L de lixiviado en 800 ⌈L de agua destilada; 1/100: 10 ⌈L de lixiviado en 900 ⌈L de agua destilada. Cada dilución se colocaron en tubos de ensayos individuales y se colocaron las soluciones A y B en los volúmenes recomendados por el fabricante (2.2 mL de solución A y 1.8 mL de solución B). Adicionalmente se preparó un tubo "blanco" solo con la mezcla de las soluciones A y B sin lixiviado. Se colocaron en el equipo termoreactor a 148ºC durante dos horas y a continuación se dejaron reposar por 24 horas a temperatura ambiente. Después se obtuvieron los datos de absorbancia en fotómetro y con estos se realizaron los cálculos según el rango de dilución para obtener valores de DQO expresados en mg/L. La obtención de valores de DBO de los lixiviados se realizaron con el sistema Oxitop→ IS siguiendo las recomendaciones del fabricante.

- Características microbiológicas de lodos.

  Para determinar el recuento en Unidades Formadoras de Colonia (UFC) de microorganismos heterótrofos de las muestras de lodo se realizaron diluciones seriadas en base 10 de los lodos activados sin tratamiento y pretratados térmicamente. Para ello, se realizó la técnica de microtitulación, inicialmente fueron establecidas diluciones, que se sembraron por cuadrantes en agar nutritivo y se incubó a 30ºC por 24 horas. Al finalizar el tiempo de incubación se

realizó el conteo de UFC por cada dilución y se realizó el cálculo para determinar el recuento de microorganismos multiplicando el número de UFC por el factor de dilución.

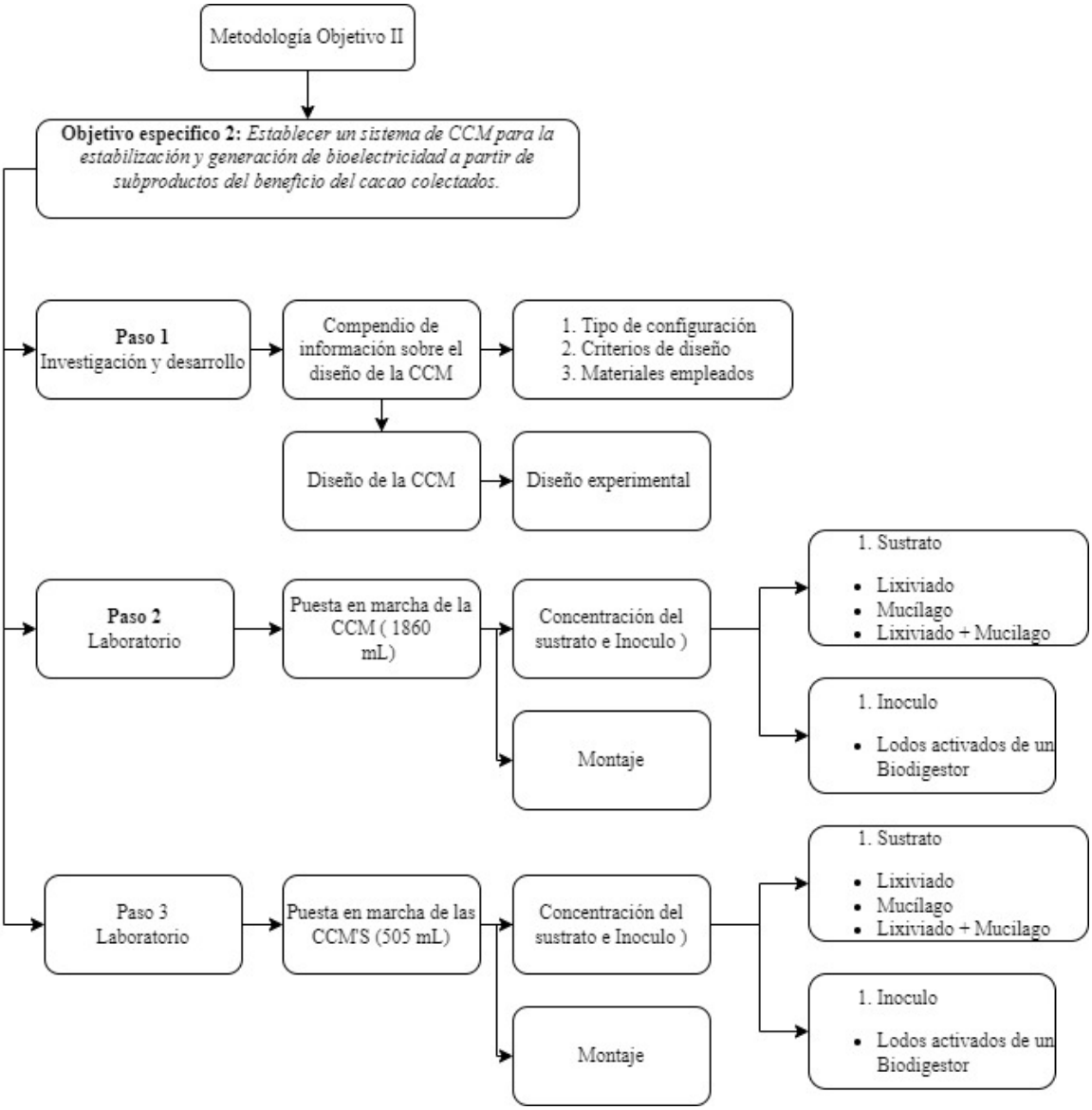
6.2 Metodología para objetivo específico Nº2

Establecer un sistema de CCM para la estabilización y generación de bioelectricidad a partir de subproductos del beneficio del cacao colectados.

6.2.1 Diseño del prototipo de CCM

En el segundo objetivo se realizó una revisión bibliográfica, tomado como base autores que proporcionaron información para el diseño, construcción y operación de una CCM, siendo esta la unidad de análisis. A su vez, se buscó realizar un diseño soportado por estudios que abarcaban la misma línea de investigación, considerando las variables de análisis como materiales, dimensiones y costos, con el fin de obtener un sistema efectico, económico y sustentable.

Figura 4. *Diagrama metodológico objetivo específico 2.*



Fuente: Autor, 2022

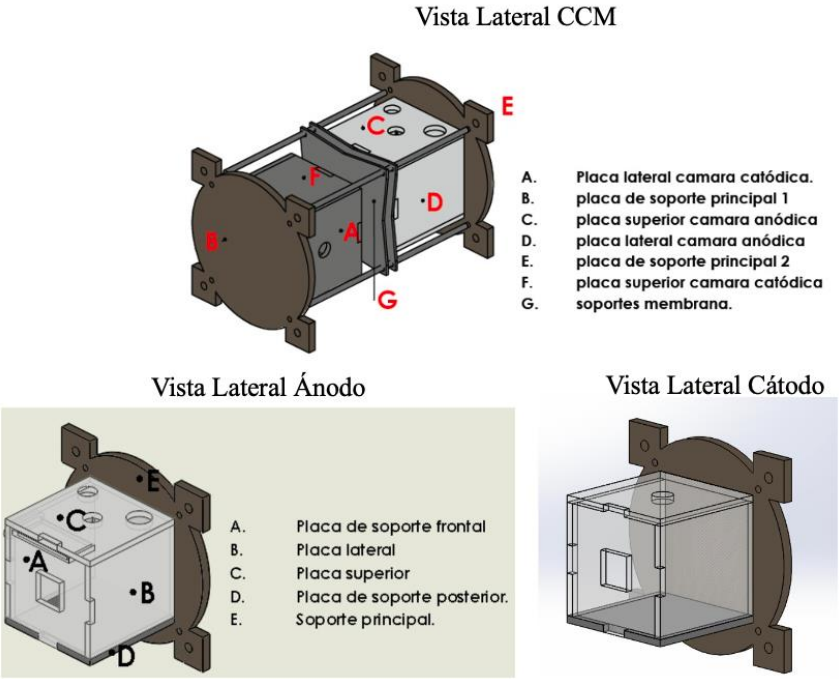
El prototipo de la CCM para este proyecto se realizó teniendo en cuenta el tipo de configuración, los criterios de diseño y que materiales se iban a emplear, esta fase del proyecto se realizó en conjunto con el programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque, con un estudiante el cual

nos proporciono conocimientos para poder implementar un sistema eléctrico el cual nos permitió tomar valores bases para este proyecto.

6.2.2 Diseño experimental de una celda de combustible microbiano

La CCM principal se diseñó consta de dos cámaras (anódica-catódica), las cuales tienen 4 partes móviles, Posee 2 soportes principales, cuya función es unir a presión ambas cámaras, sus paredes posee un espesor de 5 mm, Además, cuenta con un orificio en la parte superior de la cámara anódica y catódica de 2 cm de diámetro, el cual permitió realizar la toma de muestras para la medición de parámetros de control, sus electrodos son en materiales de base de carbono para el ánodo y latas de metal para el cátodo. Finalmente se construyeron tres prototipos de igual diseño, pero con capacidad de volumen de operación diferentes: un prototipo de 1860 mL y dos de 505 mL.

Figura 5. *Prototipo del diseño de la CCM.*



Fuente: Autor, 2020

6.3 Metodología para objetivo específico Nº3

Determinar la eficiencia de producción de bioelectricidad empleando diferentes cargas orgánicas volumétricas a partir de sistemas operados con mucílago y lixiviados del cacao.

6.3.1 Implementación del prototipo de CCM de cámara doble

El ánodo se inoculó con lodos anaerobios para la formación de biofilm y residuos del cacao (lixiviados) durante toda la operación, la cámara catódica se llenó con ferricianuro de potasio (>99%) en una concentración final de 0.4M en una solución tampón de fosfato (PBS 1X).

Se realizaron tres réplicas experimentales a temperatura ambiente, con tres diferentes concentraciones porcentuales de subproducto, estas fueron evaluadas en dos diferentes porcentajes de carga orgánica, esto con el fin de hacer una comparación entre estas y así saber qué porcentaje era más favorable para la producción de energía y saber un estimado de la carga orgánica necesaria para tal fin:

Condición 1	Mucílago 20%	Mucílago 60%	CCM 505 ml	CCM 1860 ml
Condición 2	Lixiviado 20%	Lixiviado 60%	CCM 505 ml	CCM 1860 ml
Condición 3	Lixiviado + Mucílago 20%	Lixiviado + Mucílago 60%	CCM 505 ml	CCM 1860 ml

Para la corrección del pH se usó Di hidróxido de Calcio [$Ca(OH)_2$] e hidróxido de sodio al 1% hasta obtener un pH de 6.5. Durante todo el tiempo experimental (7 días calendario correspondiente a las CCM'S de 505 mL y 10 días calendario para la CCM 1860 mL) se usó un sensor Arduino conectado a un computador para monitorizar y registrar el voltaje generado cada minuto. Finalizado el proceso se colectó el residuo final y se almacenó para hacer comparación de la DBO inicial y final para obtener el porcentaje de remoción mediante la fórmula: DBOi-DBOf/DBOi*100.

Para la obtención de los datos de generación de energía medida en voltios, como se mencionó anteriormente se usó un sistema de sensor Arduino, el cual fue programado, para recibir resultados por minutos para obtener una matriz de resultados. Se obtuvo la mediana de los datos de generación de electricidad en voltios obtenidos de las tres réplicas experimentales, y se analizaron mediante Análisis de Varianza de Una Vía (One-Way ANOVA) con prueba post hoc de Tukey, para determinar la diferencia de generación de energía entre las tres condiciones experimentales. Para todos los datos se tuvo en cuenta un valor de $p<0,05$ como significancia estadística, considerando el periodo de estabilidad operacional (coeficiente de variación <30%) (Guardia-Puebla y cols. 2014). Todos los análisis fueron desarrollados empleando el software R (v. 4.2.2)

7. Resultados y Discusión

7.1 Características fisicoquímica de mucílagos y lixiviados de fermentación del cacao colectadas en el municipio de Nunchía-Casanare.

Se determinaron las características fisicoquímicas iniciales de los materiales previo a su uso en las CCM (Tabla 5). En total se evaluaron 5 variables físicas y 2 químicas que se consideraron importantes para el objetivo del estudio en cuanto a la producción de energías. Los valores de pH de lixiviados, mucílago y la mezcla de estos obtenidos (3,96, 3, 82 y 3,82, respectivamente), son valores cercanos a valores de pH obtenido en estudios anteriores con subproductos del cacao, como el de Cedeño en 2013 (Cedeño. 2013) que reportó un pH de 3,7 y Balladares en 2015 (Balladares. 2015) que obtuvo pH de 3,58 en lixiviados de cacao. Estos valores de pH se relacionan con la optimización del medio para el crecimiento de microorganismos con capacidad de procesamiento de carbohidratos complejos cuyos metabolitos secundarios probablemente pueden aportar a la producción de energías en este proceso de metabolización de la carga orgánica de estos residuos.

Los valores de DBO de los subproductos del cacao estuvieron dentro de los rangos permitidos por la norma vigente (Resolución 631 de 2015. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia); mientras que los datos de DQO para estos mismos subproductos exceden ese límite permitido. Lo que indica un contenido importante de materia orgánica para ser usado como sustrato en los procesos de oxidación llevados a cabo por microorganismos heterótrofos.

Estos datos son congruentes con un estudio de caracterización fisicoquímica de otros subproductos de la industria chocolatera (Ortíz. 2015) y cafetera (Guarangay & Orozco. 2019).

Tabla 5. *Características fisicoquímicas iniciales*

MATERIAL	pH	ST (mg/L)	SV (mg/L)	SD (mg/L)	CE (mS/cm)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)
Lodos activados sin pretratamiento	7,22	2382	2470	1300	2720	-	-
Lodos activados con pretratamiento	7,24	2630	2185	1300	2720	-	-
Lixiviados del cacao	3,96	1501	1505	2762	2710	9200	14685
Mucílago del cacao	3,82	1520	1523	610	890	12000	13727
Lixiviado+Mucílago del cacao	3,82	1588	1499	820	1600	1800	2894

Fuente: Autor, 2022

ST: sólidos totales; SV: sólidos volátiles; SD: sólidos disueltos; CE: conductividad eléctrica; DBO: demanda bioquímica de oxígeno; DQO: demanda química de oxígeno.

Además, se obtuvieron los datos de DBO y DQO de las dos concentraciones usadas de lixiviado, mucílago y la mezcla de ellos posterior a su carga en las CCM correspondientes al promedio de dos réplicas y se compararon con los datos iniciales, con el objetivo de determinar el porcentaje de remoción en valores porcentuales de DBO y DQO y así observar la eficiencia de remoción de material orgánico (Tabla 6). Los resultados obtenidos indican una variabilidad de los porcentajes de remoción de DBO y DQO en relación con los porcentajes de residuo usado individualmente y en mezcla y claramente con el tamaño de la CCM usada en el ensayo. En las CCM de menor volumen (505 mL) se obtuvieron menores porcentajes de remoción de DBO y DQO con respecto a la CCM de mayor volumen, este resultado está claramente relacionado con la capacidad volumétrica de las CCM. Sin embargo, llama la atención que el mayor porcentaje de remoción de

DBO y DQO se obtuvo con la mezcla de Lixiviado+Mucílago al 20% en la CCM de 1860 mL. Estos porcentajes de remoción de DBO y DQO se pueden relacionar directamente con los porcentajes de inoculación en las CCM y con la fase de crecimiento de los microorganismos presentes en el momento. Puesto que, si la inoculación se realizó en la fase exponencial, el aumento en la disponibilidad de sustrato, alargaría esta fase y demoraría la llegada a la fase de latencia en el crecimiento de microorganismos, teniendo un impacto importante en los porcentajes de remoción de DBO y DQO. Este fenómeno se vio en el estudio de Cuadrado y Cuartas (Cuadrado & Cuartas. 2019), donde realizaron una evaluación experimental de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor de lodos activados.

En el sistema bicameral de las CCM usadas en este estudio, la cámara del ánodo tuvo condiciones anaerobias y la del cátodo aerobia. Este diseño probablemente contribuyó al crecimiento de microorganismos igualmente aerobios y anaerobios, llevando a un aprovechamiento aumentado del sustrato, tanto del oxígeno presente (por las bacterias aerobias) (Moeller & Tomasini, 2004) así como de los posibles componentes inorgánicos (por las bacterias anaerobias) (Espinosa & Muñoz, 2020), lo que impactó sustancialmente los porcentaje de remoción de DBO y DQO observados en los diferentes ensayos.

Tabla 6. *Remoción de DBO y DQO*

% Del Residuo	Tipo De CCM	%Remoción DBO	%Remoción DQO
Lixiviado 20%	CCM 505mL	33,2	84,5
Lixiviado 60%	CCM 505mL	3,1	54,8
Mucilago 20%	CCM 505mL	58,3	96,2
Mucilago 60%	CCM 505mL	26,7	87,6
Lixiviado+Mucilago 20%	CCM 1860mL	80	62,1
Lixiviado+Mucilago 60%	CCM 1860mL	60	57,9

Fuente: Autor, 2022

DBO(i): demanda bioquímica de oxígeno inicial; DBO(f): demanda bioquímica de oxígeno final; DQO(i): demanda química de oxígeno inicial; DQO(F): demanda bioquímica de oxígeno final.

Se realizó la caracterización microbiológica de las muestras de lodo tratados y sin tratamiento en agar nutritivo después de incubación a 30ºC durante 24 horas. En los lodos tratados se observaron 8 UFC en la dilución -2 lo que equivale a 800 UFC/mL ($8x10^2$) y en los lodos sin tratamiento se contaron 11 UFC en la dilución -4 lo que indica un recuento de 110.000 UFC/mL ($11x10^4$) (Tabla Evidenciándose el impacto del tratamiento en la sobrevivencia de los microorganismos, al verse disminuidos en el recuento de los lodos tratados con respectos a los no tratados. Esto podría tener un impacto en el rendimiento del sustrato para la generación de energía al disminuirse el número de microorganismos, no obstante, es la capacidad metabólica y el tipo de metabolismo de los microorganismos lo que puede determinar esta capacidad de obtención de energía (Majidian y cols. 2018).

Tabla 7. *Recuento de microorganismos en lodos tratados y sin tratamiento en agar nutritivo.*

Muestra	Dilución	Ufc	Recuento (Ufc/Ml)
Lodo Tratado	-2	8	$8 X 10^4$
Lodo Sin Tratamiento	-4	11	$11 X 10^6$

Fuente: Autor, 2022

7.2 Sistema de CCM para el tratamiento y generación de energía limpia a partir de residuos del beneficio del cacao colectados.

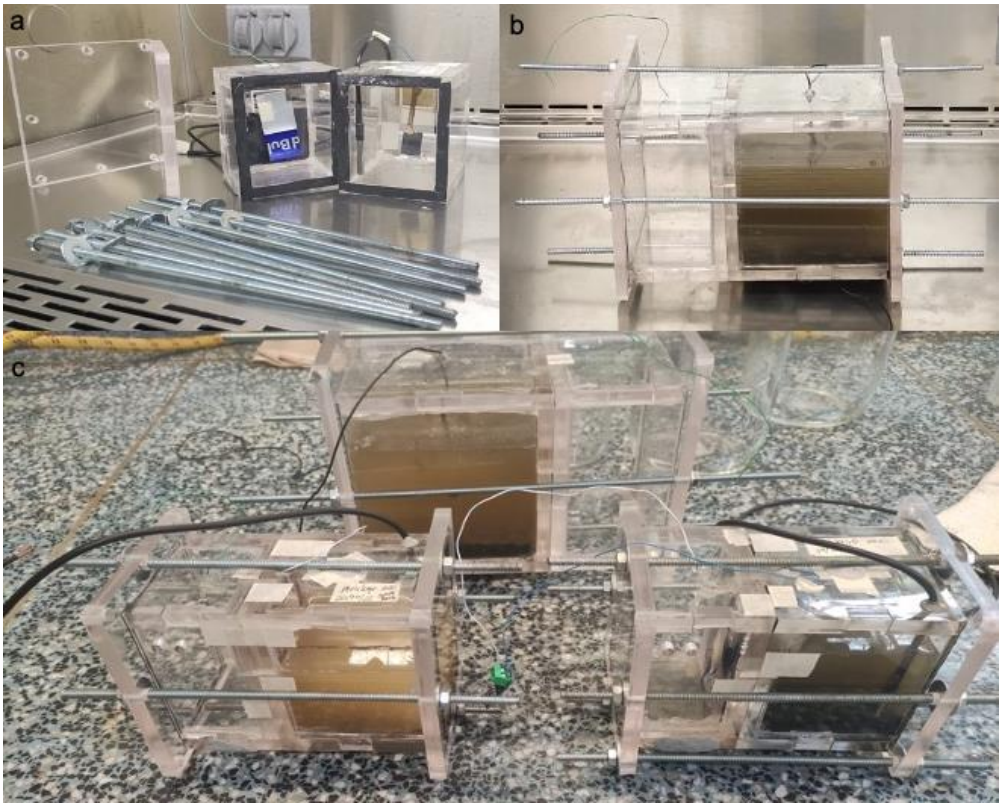
El sistema de CCM para este proyecto se realizó en colaboración dentro del marco del proyecto de grado en el programa de Bioingeniería de la Universidad El Bosque “Diseño y operación de un prototipo de celda de combustión microbiano” (Rodelo D.A, Velásquez M. 2021 [Datos no publicados]). El diseño de la CCM constó de dos cámaras (anódica-catódica), las cuales tienen 4 partes móviles (Figura 6). Posee 2 soportes principales, cuya función es unir a presión ambas cámaras (Figura 6). El material base de las paredes de ambas cámaras es polimetacrilato de metilo

(PMMA) y los electrodos fueron en material de base de carbono. Se construyeron tres prototipos de igual diseño, pero con capacidad de volumen de operación diferentes: un prototipo de 1860 mL y dos de 505 mL (Figura 3).

La ventaja que se obtiene del diseño bicameral de los prototipos de CCM radica en su operación discontinua sin requerimientos de largos procesos de trabajo experimental, por lo que también este diseño es ampliamente usado en prototipos a escala para laboratorios (Naseer y cols. 2021); contrario a los diseños unicamerales, que requieren tiempos de operación más prolongados para metabolizar el sustrato del inóculo (Shrivastava & Sharma. 2022).

El PMMA, en comparación con otros materiales como vidrio o policarbonato, es más económico, resistente y un buen aislante térmico (Erable, B. y cols. 2017), adicionalmente su resistividad eléctrica (Helmensine, A. M. 2019), lo convierten en el material idóneo para el tipo de sistema diseñado en este estudio, pues permitió el desarrollo de los ensayos experimentales sin ningún inconveniente de filtración o cambios abruptos de temperatura.

Figura 6. *a. Materiales usados para el montaje de la CCM bicameral. b. Montaje final con carga volúmetrica de la CCM. c. Comparación de volúmenes de las tres cámaras diseñadas y construidas para este proyecto.*

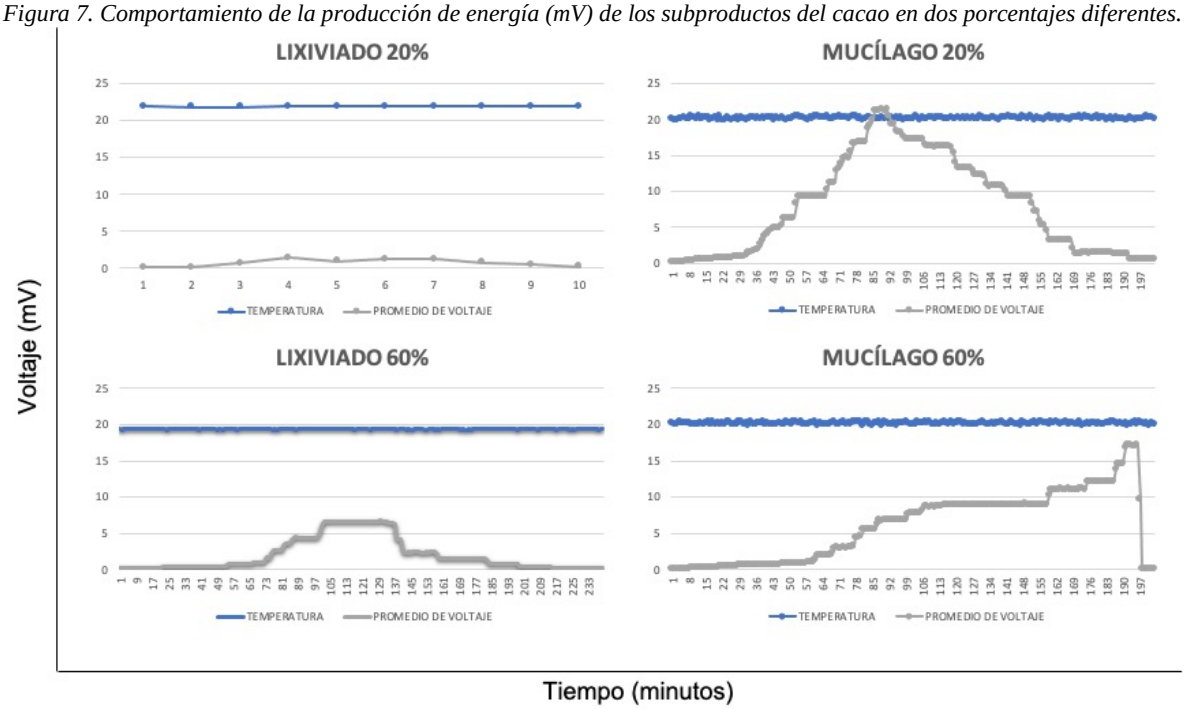


Fuente: Autor, 2022

7.3 Eficiencia de producción de energía limpia empleando diferentes cargas orgánicas volumétricas.

En la figura 7 se puede observar el comportamiento de la obtención de energía medida en milivoltios (mV) de los inóculos con concentraciones individuales de los subproductos del cacao (Lixiviado y Mucílago al 20% y 60%) durante el tiempo de operación. Se observa claramente que el Lixiviado al 60% obtuvo un mayor rendimiento entre las horas 81 y 137, en comparación con el Lixiviado a una concentración del 20%. Contrariamente, con el mucílago se obtuvo buenos picos de corriente con ambas concentraciones, pero con comportamiento diferente, el Mucílago al 20% produjo energía entre la hora 43 y 155 con un pico de mayor voltaje a la hora 92 con disminución controlada; mientras que el mucílago al 60% empezó la generación de energía en la hora 71 con un comportamiento exponencial y mayor pico en la hora 190 y una caída inmediata a 0 mV.

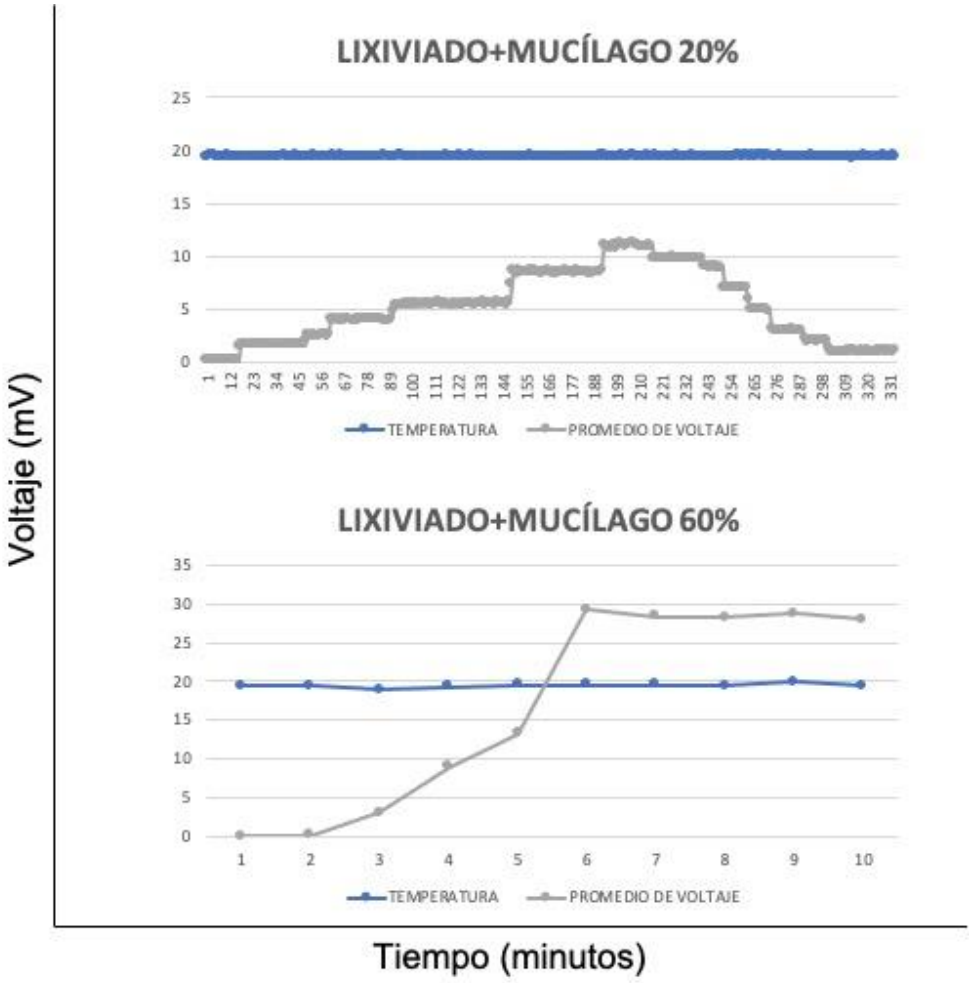
Figura 7. Comportamiento de la producción de energía (mV) de los subproductos del cacao en dos porcentajes diferentes.



Fuente: Autor, 2022.

En la figura 8 se observa el rendimiento energéticos de las mezclas de Lixiviado y Mucílago al 20% y 60% durante el tiempo de operación. Se aprecia claramente el óptimo rendimiento de la combinación de los subproductos del cacao al 60%, con un rendimiento energético desde la hora 3 con un crecimiento exponencial y mantenimiento en el tiempo, generándose una curva de forma sigmoidal con plató. La mezcla al 20% tuvo un comportamiento similar a las concentraciones individuales de los subproductos, con generación de energía entre las horas 67 y 276 con el mayor pico a la hora 210.

Figura 8. Comportamiento de la producción de energía (mV) con la mezcla de residuos de cacao en dos concentraciones diferentes.



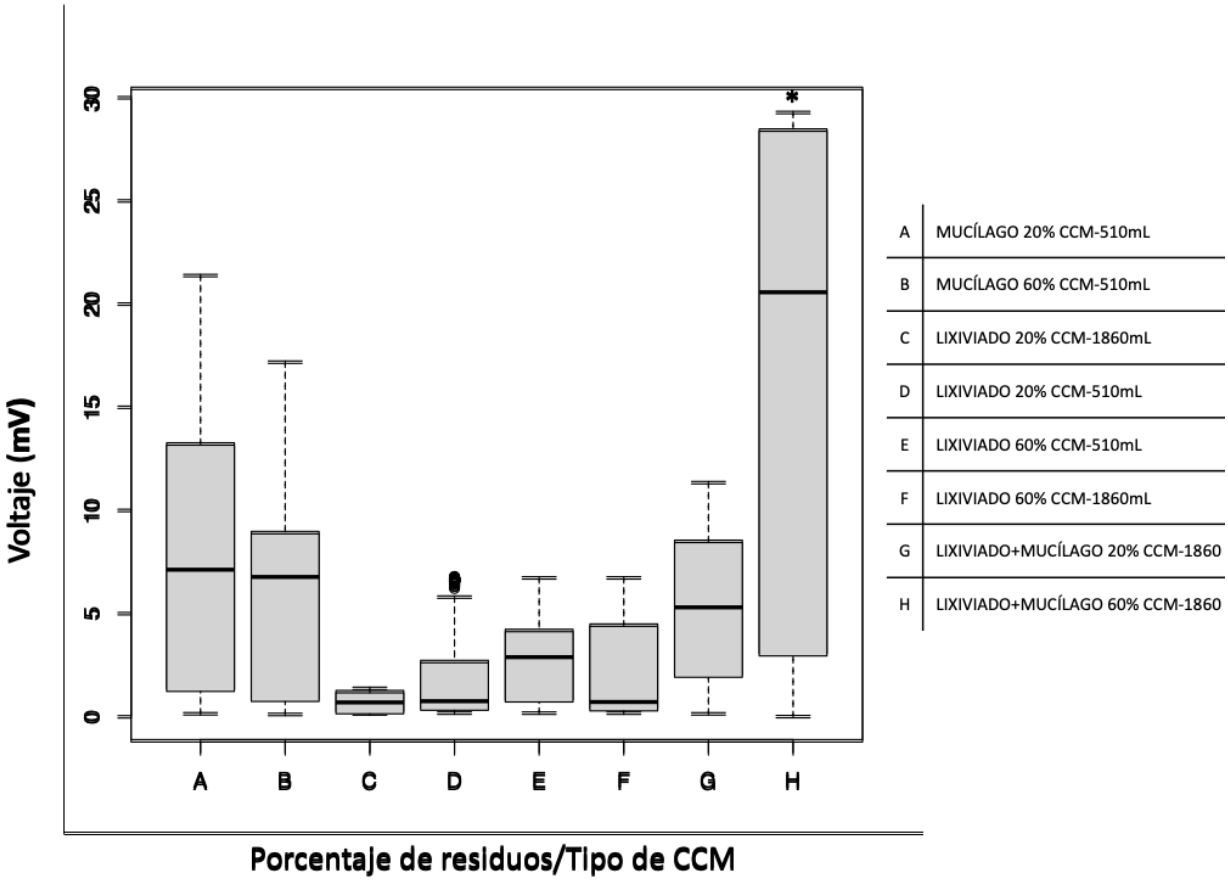
Fuente: Autor, 2022

En la figura 9 se muestra la gráfica obtenida de un boxplot comparación del pico de rendimiento energético obtenido en cada condición experimental. Donde claramente la combinación Lixiviado-Mucílago en una concentración al 60% en la CCM de 1680mL tuvo un mayor rendimiento en la generación de energía en comparación con la mezcla al 20% y las concentraciones individuales de cada subproducto. Los datos asociados al análisis estadístico mostró una diferencia estadísticamente significativa en comparación con los demás ensayos ($p<0,05$).

Según el estudio de Pistonesi (Pistonesi y cols., 2010) la generación de mayores niveles de voltaje y corriente está relacionada con la concentración del sustrato con respecto a los microorganismos en el inóculo, representando lo primero la fuente de alimentación de los segundos y en consecuencia la capacidad metabólica con subsecuente generación energía a partir de los metabolitos obtenidos. Los valores de voltaje obtenidos en el presente estudio están un poco por debajo de los reportados en estudios con otros inóculos como por ejemplo agua residuales (Álzate y cols. 2008), pero la probable diferencia de la población de microorganismos causada por lodos y subproductos del cacao, sea la razón de este rendimiento energético.

Una observación importante en este estudio fue el impacto de la temperatura sobre la generación energética. A temperaturas bajas se obtuvo menor rendimiento en comparación a temperaturas más altas de entre 20-25ºC, esto probablemente relacionado con la importante afectación de la temperaturas de las CCM sobre la comunidad microbiana, cinética de reacción y termodinámica celular (Mohyudin, S. y cols. 2022). Varios estudios han tomado como temperatura estándar entre 20 y 30ºC por la máxima actividad microbiana observada en este rango. El estudio de Hiegemann y cols., reportó incremento de la potencia de salida en un 10 % en ensayos realizados a una temperatura entre 17 y 22 °C (Hiegemann y cols., 2016). Walter y cols., en 2018 observó una relación exponencial entre la temperatura y la densidad de potencia energética, concluyendo que el aumento de la temperatura es favorable para el crecimiento microbiano y su actividad catalítica (Walter y cols., 2018).

Figura 9. Comparación de la producción energética de los residuos de cacao individuales y combinados en dos porcentajes diferentes y en CCM de tamaños diferentes.



Fuente: Autor, 2022. *p<0,05

8. Conclusiones

En el presente estudio se pudo caracterizar fisicoquímicamente dos de los principales subproductos del cacao, Lixiviados de fermentación y Mucílago. Viéndose el comportamiento acidogénico y la importante carga orgánica e inorgánica de los mismos. Adicionalmente se evaluó la remoción de DBO y DQO, obteniendo porcentajes de remoción importantes que se asocian con la capacidad del sistema de CCM en disminución de carga orgánica.

El prototipo de Celda de Combustión Microbiana diseñado para este estudio permitió una evaluación óptima del rendimiento energético durante el tiempo de operación, los materiales escogidos y el diseño bicameral fueron imprescindibles para el objetivo del estudio pues posibilitó las mediciones necesarias sin interferencias relacionadas con materiales y diseño de tipo filtraciones, fracturas, interferencias en la generación y obtención del dato de voltaje.

De todas las condiciones experimentales evaluadas en este estudio, la de mejor rendimiento fue el sistema mixto de Lixiviado-Mucílago en la CCM de 1860 mL, con valores de hasta 29,3 mV y una remoción de DQO de 57,9%. En conjunto estos datos indican que es posible generar valores significativos de bioelectricidad empleando subproductos de cacao en un sistema mixto, con simultánea remoción de materia orgánica. Estos resultados constituyen un aporte para la optimización de sistemas de aprovechamiento de subproductos agroindustriales como fuente de energía renovable.

9. Recomendaciones

Es importante seguir evaluando sistemas parecidos al presentado en este estudio y caracterizar los microrganismos aerobios y anaerobios para entender mejor el comportamiento del sistema de generación de energías limpias con subproductos del cacao, con miras a encontrar oportunidades de mejoras en el rendimiento energético a partir de las condiciones de la microflora, se debe mejorar el diseño de la CCM construyéndola a mayor escala para tener una mejor visión sobre esta nueva tecnología. Asimismo, se requiere adicionar la variable temperatura en los futuros estudios para tener una evaluación del impacto de este factor sobre el rendimiento energético y tener rangos de temperatura de trabajo de CCM dispuestas en zona andina-tropical. Adicionalmente, una evaluación a mayor escala consolidaría los resultados aquí presentados y enfocaría esta línea de investigación hacia la extensión y creación de fuentes limpias de generación de energía en las zonas cacaoteras.

10. Referencias bibliográficas

Adekunle, A., Gomez Vidales, A., Woodward, L., & Tartakovsky, B. (2021). Microbial fuel cell soft sensor for real-time toxicity detection and monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(10), 12792-12802

Alcaldía de Bogotá, (2021). Ubicación de la ciudad. En linea: https://bogota.gov.co/ubicacion-de-bogota-sitios-turisticos-vias-y-alrededores-de-bogota

Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarrán, C., Álvarez-Gallegos, A., & Sebastián, J. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. Interciencia, 33(7), 510-517.

Alhogbi, B. (2019). Sistemas Economía Circular en herramienta de la bioelectroquímicos, depuradoras. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 21–25. DOI: http://www.elsevier.com/locate/scp

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in energy and combustion science*, *34*(6), 755-781.

Balladares Grazzo, C. A. (2015). Caracterización físico-química de los lixiviados del cacao y café del litoral ecuatoriano, como potenciales fuentes de producción de bioetanol (Doctoral dissertation).

Barén Cedeño, C. L. (2013). Utilización del mucílago de cacao (theobroma cacao L.), tipo nacional y ccn-51 en la obtención de dos jaleas a partir de tres formulaciones, Quevedo, Ecuador 2013 (Bachelor's thesis)

Bretschger,O., Osterstock, J., Pinchak, W., Ishii, S., & Nelson K. (2010) Microbial Fuel Cells and Microbial Ecology: Applications in Ruminant Health and Production Research., Microb Ecol. 2010 Apr; 59(3): 415–427. En línea: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2855437/

Briceño Vargas, L. F. & Delgadillo González, K. D. (2021). CODIGESTIÓN ANAEROBIA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LA FINCA "LAS HUERTAS", VEREDA "EL HATILLO" (GUATAVITA, CUNDINAMARCA). (Trabajo de Grado, Universidad El Bosque)

Castro Castillo, F. A. (2019). *Determinación del efecto del tipo de electrodo sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica* (Bachelor's thesis).

Colombia registró la mayor producción de cacao de la historia, en el último año cacaotero. (s. f.). Recuperado 1 de octubre de 2022, de https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Colombia-registr%C3%B3-la-mayor-producci%C3%B3n-de-cacao-de-la-historia,-en-el-%C3%BAltimo-a%C3%B1o-cacaotero.aspx

Cornejo, A. (2017). Estudio del microbioma presente en celdas de combustible microbianas. https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/314/1/Electromicrobiolog%C3%ADa%20del%20microbioma%20presente%20en%20celdas%20de%20combustible%20micro bianas_rees.pd

Cuadrado Baquero, J. P., & Cuartas Silva, C. H. Evaluación experimental de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor de lodos activados a escala piloto, alimentado con agua residual artificial, y con aumento de presión en el sistema. (Bachelor's thesis).

Destouni, G., & Frank, H. (2010). Renewable energy. *Ambio, 39 Suppl 1*(Suppl 1), 18–21. https://doi.org/10.1007/s13280-010-0059-7

Espinosa, D., & Muñoz, P. (2020). Aislamiento de bacterias Sulfuro Oxidadoras a partir de Columnas de Winogradsky. Pontificia Universidad Javeriana: https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/51993/Tesis%20bacterias%20sulfur o%20oxidadoras%20.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Erable, B., Byrne, N., Etcheverry, L., Achouak, W., & Bergel, A. (2017). Single medium microbial fuel cell: Stainless steel and graphite electrode materials select bacterial communities resulting in opposite electrocatalytic activities. International Journal of Hydrogen Energy, 42(41), 26059-26067. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.178

García Barriga, V. I., & Ube Rodríguez, S. M. (2022). *Elaboración de pan enriquecido con fibra de cascarilla de cacao (Theobroma cacao L.) de las variedades CCN51 y Nacional* (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química).

Gobernación de Casanare, 2019. INFORMACIÓN DEL DEPARTAMENTO. Recuperado de: https://www.casanare.gov.co/ElCasanare/Paginas/Informacion-del-Departamento.aspx

Gov.co. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia. [citado el 9 de noviembre de 2022]. Disponible en: http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf

Guaranguay Pastas, A. M., & Orozco Hernández, D. (2019). Evaluación de la eficiencia de

remoción de DBO, DQO y SST en aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café a través de una columna de adsorción con borra de café (Doctoral dissertation, Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria).

Helmensine, A. M. (2019). A Table of Electrical Conductivity and Resistivity of Common Materials.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la Investigación (N. Islas López & M. Rocha Martínez, Eds.; Cuarta Edición, Vol. 4). McGraw-Hill Interamericana.

Hernandez Schmidt M., 2019. La Fauna de Bogotá. Humedales Bogotà. Recuperado de: https://humedalesbogota.com/2019/03/12/la-fauna-de-bogota/

Hernández M., n.d. Una historia de la Flora de los Cerros por Mateo Hernández. Fundación Cerros de Bogotá. Recuperado de: https://cerrosdebogota.org/index.php/una-historia-de-la-flora-de-los-cerros-por-mateo-hernandez/

Hiegemann, H., Herzer, D., Nettmann, E., Lübken, M., Schulte, P., Schmelz, K. G., Gredigk-Hoffmann, S., & Wichern, M. (2016). An integrated 45L pilot microbial fuel cell system at a full-scale wastewater treatment plant. Bioresource technology, 218, 115–122. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.052

Hurtado, N., Revelo, D., & Ruiz, J., (2013) Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica., Universidad de Nariño. En línea: https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n6/art04.pdf

International Cocoa Organization. (2011). Production of cocoa beans. *ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics*, *45*(2).

Jaimes Suárez, Y., & Aranzazu Hernández, F. (2010). Manejo de Enfermedades del Cacao (Theobroma cacao L.) en Colombia, con Énfasis en Monilia (Moniliophthora roreri). Bogotá: Produmedios.

Jean-Marie, E., Bereau, D., & Robinson, J. C. (2021). Benefits of Polyphenols and Methylxanthines from Cocoa Beans on Dietary Metabolic Disorders. *Foods (Basel, Switzerland)*, *10*(9), 2049. https://doi.org/10.3390/foods10092049

Kondaveeti, S., Kondaveeti, S., Choi, K., Choi, K., Kakarla, R., Kakarla, R., . . . Min, B. (2014). Microalgae scenedesmus obliquus as renewable biomass feedstock for electricity generation in microbial fuel cells (MFCs). Frontiers of Environmental Science & Engineering, 8(5), 784-791. doi:10.1007/s11783-013-0590-4

Krishna, K. V., & Mohan, S. V. (2016). Selective enrichment of electrogenic bacteria for fuel cell application: enumerating microbial dynamics using MiSeq platform. Bioresource technology, 213, 146-154.

Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. 13 de mayo de 2014.

Livano García, S. (2012). Pilas de combustible: electricidad para el futuro inmediato. *Técnica Industrial*, *300*, 53-62.

Lozano Moreno, M. S. (2020). Utilización de los subproductos del beneficio del cacao: una revisión.

Macías, J. G. L., & Guadalajara, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales problema o recurso. *Jalisco, Guadalajara, México. Obtenido de Ingeniería Química, Guda: http://www. ai. org. mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limo n_trabajo_de_ingreso. pdf*.

Majidian, P., Tabatabaei, M., Zeinolabedini, M., Naghshbandi, M. P., & Chisti, Y. (2018). Metabolic engineering of microorganisms for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 3863-3885.

Mera Castro, M. A. (2015). Diseño y construcción de una celda de combustible microbiana de cátodo expuesto a escala piloto.

Milazzo, G., & Blank, M. (1983). Bioelectrochemistry I. Springer.

Moeller, G., & Ortíz, A. (2004). Microbiología de lodos activados. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/CapituloII/5 Microbiologiadelodosactivados.pdf

Mohyudin, S., Farooq, R., Jubeen, F., Rasheed, T., Fatima, M., & Sher, F. (2022). Microbial fuel cells a state-of-the-art technology for wastewater treatment and bioelectricity generation. *Environmental research*, *204*(Pt D), 112387. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112387

Molina, A. G., Mancilla, J. O., Assi, M. S., & Borges, E. V. (2017). Energía: celdas de combustible microbianas. Ingeniería, 21(1), 54-62.

Mosquera, M. J., & Merino, L. (2006). Empresa y energías renovables: lo que su empresa debe

saber sobre energías. Barcelona: Fundación Confemetal.

Muhammad Mohsin Javed, Muhammad Azhar Nisar, Muhammad Usman Ahmad, Nighat Yasmeen & Sana Zahoor (2018) Microbial fuel cells as an alternative energy source: current status, Biotechnology and Genetic Engineering Reviews, 34:2, 216-242, DOI: 10.1080/02648725.2018.1482108

Naseer, M. N., Zaidi, A. A., Khan, H., Kumar, S., Owais, M. T. bin, Jaafar, J., Suhaimin, N. S., Wahab, Y. A., Dutta, K., Asif, M., Hatta, S. F. W. M., & Uzair, M. (2021). Mapping the field of microbial fuel cell: A quantitative literature review (1970– 2020). Energy Reports, 7, 4126-4138. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.082

Najera Aguilar, Hugo A., (s.f). Lixiviados ¿Qué son, cómo se clasifican? (Parte 1). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

Ntiamoah, A.; Afrane, G. Environmental impacts of cocoa production and processing in Ghana: Life cycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* **2008**, *16*, 1735–1740

Ortiz Ortiz, D. I. (2019). Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica (Bachelor's thesis).

Ortiz-Valbuena, K. L., & Álvarez-León, R. (2015). Effect of dumping of benefit products cacao (Theobroma cacao l.) on some chemical and biological properties in soils of a cocoa farm, city of Yaguara (Huila, Colombia). Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural, 19(1), 65-84.

Ortiz Aguilar, A. E. (2015). Biodepuracion de grasas y aceites de efluentes de industria

chocolatera, con la microalga chlorella vulgaris empacada en un sistema de flujo continuo (Bachelor's thesis).

Parra, N. O. R. B. I. S., Henriquez, M. A. G. A. L. Y., & Villanueva, S. A. M. U. E. L. (2018). Utilización de los subproductos del cultivo y procesamiento del cacao. *Caracas: Gerencia de Proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación*.

Pineda, A., & Rosas, M. (2016). Estado Del Arte En Celdas De Combustible Microbianas (Ccm) Para Producción De Bioenergía. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689-1699.

Pinilla, J. (2019). El problema energético mundial. Energías renovables y cambio climático. International Energy Agency.

Pistonesi, C., Haure, J. L., & DElmar, R. (2010). Energía a partir de las aguas residuales. Diferentes Alternativas a los Procesos de los Tratamientos de Aguas Residuales para Obtener Energía Ecológicamente Limpia. Universidad Tecnológica Nacional-Argentina.

Plasencia-Verde, C. C., Grabiel-Rios, K. S., Luque, J. A., & Best, I. K. (2021). Evaluación del potencial energético de residuos de cacao (Theobroma cacao L.) por medio de celdas de combustible microbiano (CCM). *Información tecnológica*, *32*(4), 89-98.

Prabhakaran, Nair, K.P., 2010a. Cocoa (Theobroma cacao L.). In: The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of the Developing World, pp. 131–180. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384677-8.00005-9.

Puértolas, E.; Barba, F.J. Electrotechnologies applied to valorization of by-products from food industry: Main findings, energy and economic cost of their industrialization. *Food Bioprod.*

Process. **2016**, *100*, 172–184.

Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. TRENDS in Biotechnology, 23(6), 291-298.

Redondo Iriarte, J. J. (2018). Microorganismos electrogénicos: células de combustible microbianas.

Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., y Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. Journal of Power Sources, 356, 225-244.

Schamphelaire, L. D., Bossche, L. V. d., Dang, H. S., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., & Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. Environmental Science & Technology, 42(8), 3053-3058. doi:10.1021/es071938w

Seong, K., Husseinsyah, S., & Osman, H. (2014). Development od Biocomposites form Cocoa Pod Husk and Polypropylene: Effect of Filler Content and 3-Aminopropyltriethoxylane. Polymes from Reneawable Resources, 139-156.

Sharma, V., & Kundu, P. P. (2010). Biocatalysts in microbial fuel cells. Enzyme and Microbial Technology, 47(5), 179-188.

Shrivastava, A., & Sharma, R. K. (2022). Lignocellulosic biomass based microbial fuel cells: Performance and applications. Journal of Cleaner Production, 361, 132269. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132269

Teneda, W. (2016). Mejoramiento del proceso de fermentación del cacao (Theobroma cacao L.) variedad Nacional y variedad CCN51, Universidad Internacional de Andalucía, Sevilla, España. Recupero el 10 de marzo de 2018 de: file. *C:/Users/Lisbeth%*

20Alberca/Downloads/2016_978-84-7993-319-7. pdf.

The International Cocoa Organization, 2018. ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XLIV, No. 3, Cocoa year 2017/18

Thurston, C. F., Bennetto, H. P., Delaney, G. M., Mason, J. R., Roller, S. D., & Stirling, J. L. (1985). Glucose metabolism in a microbial fuel cell. Stoichiometry of product formation in a thionine-mediated Proteus vulgaris fuel cell and its relation to coulombic yields. *Microbiology*, *131*(6), 1393-1401.

Torres, C. A. V., Ocampo, R. D., Rodríguez, W. M., Velasco, R. S., Chang, J. F. V., & Cedeño, C. B. (2016). Utilización del mucílago de cacao, tipo nacional y trinitario, en la obtención de jalea. *Revista ESPAMCIENCIA ISSN 1390-8103*, *7*(1), 51-58.

Urgilés, J. (2018). Evaluación del efecto de herbicidas químicos y orgánicos para control de malezas en el cultivo de cacao CCN-51 (Theobroma cacao L.) en la zona de Naranjal, provincia del Guayas. [Tesis de Titulación]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador. Obtenido de http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11463/1/T-UCSG-PRE-TEC-AGRO-142.pdf

Vásquez, Z.S.; de Carvalho Neto, D.P.; Pereira, G.V.M.; Vandenberghe, L.P.S.; de Oliveira, P.Z.; Tiburcio, P.B.; Rogez, H.L.G.; Góes Neto, A.; Soccol, C.R. Biotechnological approaches for cocoa waste management; A review. *Waste Manag.* **2019**, *90*, 72–83.

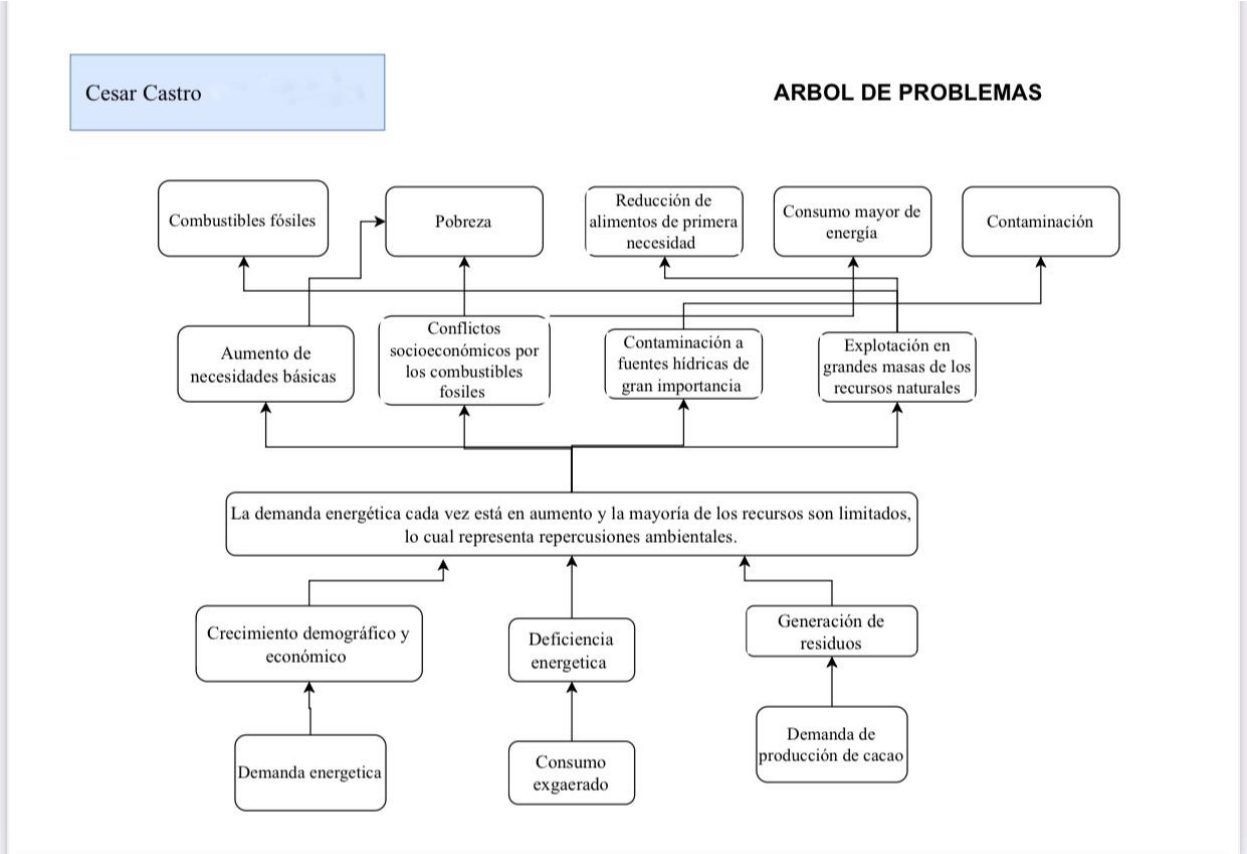
Walter, X. A., Merino-Jiménez, I., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2018). PEE POWER® urinal II - Urinal scale-up with microbial fuel cell scale-down for improved lighting. *Journal of power sources*, *392*, 150–158. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.047

Y. Guardia-Puebla, S. Rodríguez-Pérez, J. Jiménez Hernández, V. Sánchez-Girón, and J. Morgan-Sagastume, "Experimental design technique is useful tool to compare anaerobic systems," Renew. Bioresour., vol. 2, no. 3, pp. 1–12, 2014.

Zhang, F., Xia, X., Luo, Y., Sun, D., Call, D. F., & Logan, B. E. (2013). Improving startup performance with carbon mesh anodes in separator electrode assembly microbial fuel cells. *Bioresource technology*, *133*, 74–81. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.036

11. Anexos

11.1 Árbol de problemas usado para la generación de este estudio

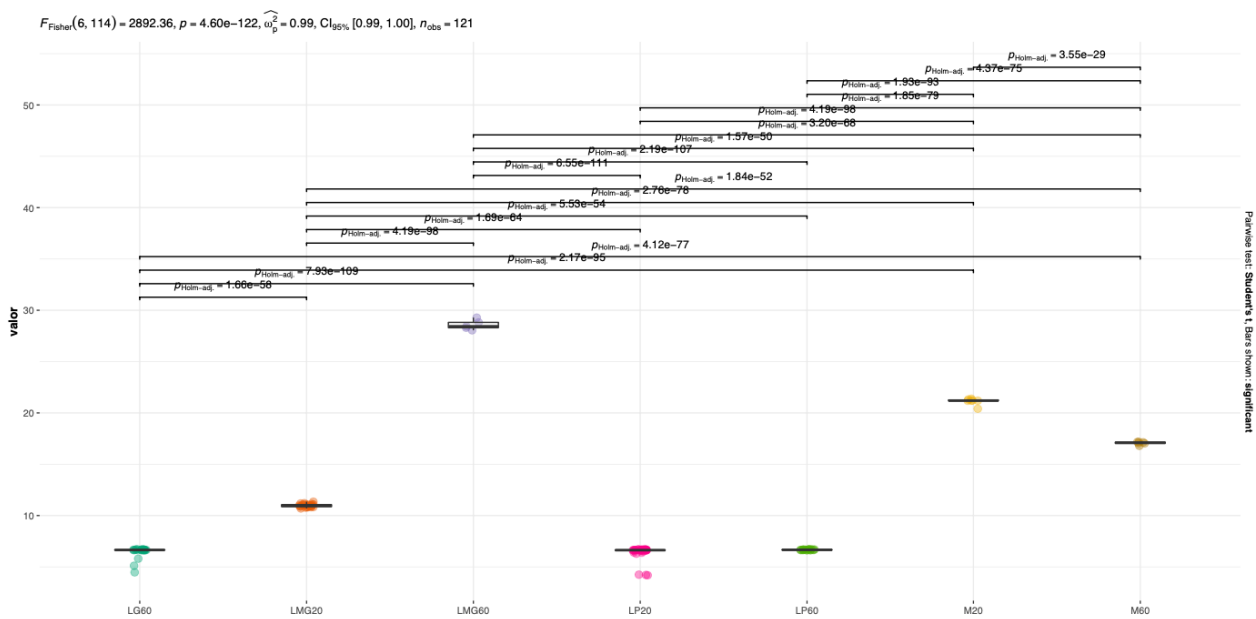


Anexo 1. Árbol de problemas.

11.2 Resultados de estadística (One-Way ANOVA con prueba post hoc de Tukey)

```
$statistics
   MSerror  Df     Mean       CV
  0.2232994 114 9.662498 4.890513

$parameters
   test name.t ntr StudentizedRange alpha
  Tukey ensayo   7         4.244989  0.05

$means
         valor       std  r     Min     Max       Q25     Q50
LG60   6.449905 0.57642793 22  4.4712  6.7327  6.633925  6.6465
LMG20 10.975704 0.15348547 24 10.6923 11.3480 10.860275 10.9746
LMG60 28.577000 0.48418230  5 28.0500 29.2850 28.295000 28.4350
LP20   6.429215 0.65372164 39  4.1847  6.7417  6.610400  6.6308
LP60   6.664950 0.03315339 18  6.6072  6.7327  6.642300  6.6595
```

```
M20   21.127686 0.32568311  7 20.4090 21.3830 21.189100 21.1955
M60   17.060017 0.14453043  6 16.7953 17.1865 17.035700 17.0884
          Q75
LG60   6.670575
LMG20 11.067400
LMG60 28.820000
LP20   6.646550
LP60   6.688400
M20   21.264050
M60   17.159625

$comparison
NULL

$groups
         valor groups
LMG60 28.577000      a
M20   21.127686      b
M60   17.060017      c
LMG20 10.975704      d
LP60   6.664950      e
LG60   6.449905      e
LP20   6.429215      e
```



Anexo 1. Resultados de estadística (One-Way ANOVA con prueba post hoc de Tukey).