

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE  
MICROBIANA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN  
DE GAS METANO A PARTIR DE RESIDUOS EN UNA VIVIENDA RURAL PROMEDIO  
EN EL DEPARTAMENTO BOYACA.



Helmer Francisco Silva Cuevas

Julián Armando Peña García



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS - SECCIONAL TUNJA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2020

DISEÑO Y EJECUCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE  
MICROBIANA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN  
DE GAS METANO A PARTIR DE RESIDUOS EN UNA VIVIENDA RURAL PROMEDIO  
EN EL DEPARTAMENTO BOYACA.

Helmer Francisco Silva Cuevas

Julián Armando Peña García

Trabajo de grado para optar por el título de Ingenieros Ambientales

Directores:

Lina Patricia Vega Garzón

Néstor Rafael Perico Martínez



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS - SECCIONAL TUNJA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

2020

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

A las personas que acompañaron nuestro proceso formativo desde la infancia con nuestros padres, pasando por las instituciones educativas con la compañía de los docentes, a la universidad con los profesionales quienes guiaron nuestro enfoque profesional y a las personas que dedican su tiempo y vida para formar personas con enfoque crítico y constructivo, que hicieron de nosotros los profesionales que hoy día somos, estos agradecimientos son para todos ellos.

Toda investigación tiene un aporte importante para la ciencia y el conocimiento y está no es la excepción. El aprendizaje plasmado en la investigación es adquirido gracias a los tutores de investigación y a lo fomentado en la carrera que contribuye a la formación de profesionales íntegros, críticos y competitivos para el mundo moderno. De igual manera agradezco a mi familia por guiarme, inspirarme y mostrarme el camino correcto para conseguir tan anhelado logro.

## **TABLA DE CONTENIDO**

|                                                                    | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                                | <b>11</b>   |
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>                               | <b>12</b>   |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                                                | <b>13</b>   |
| <b>3. JUSTIFICACIÓN</b>                                            | <b>14</b>   |
| <b>4. ESTADO DEL ARTE</b>                                          | <b>15</b>   |
| <b>5. MARCO CONCEPTUAL</b>                                         | <b>20</b>   |
| <b>6. MARCO TEÓRICO</b>                                            | <b>22</b>   |
| 6.1. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS                                   | 22          |
| 6.2. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS    | 23          |
| 6.2.1. Tratamiento primario:                                       | 23          |
| 6.2.2. Tratamiento secundario                                      | 23          |
| 6.2.3. Tratamiento terciario                                       | 24          |
| 6.3. TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS | 24          |
| 6.3.1. Fitorremediación                                            | 24          |
| 6.3.2. Filtros percoladores                                        | 24          |
| 6.3.3. Nano filtración                                             | 24          |
| 6.3.5. Oxidación avanzada                                          | 24          |
| 6.4. Celda de combustible microbiano                               | 25          |
| 6.4.1. Cámara Única CCM                                            | 27          |
| 6.4.2. Cámara Doble CCM                                            | 27          |
| 6.4.3. Ventajas de las CCM de doble cámara                         | 29          |
| 6.4.4. Apilada CCM                                                 | 29          |
| 6.5. Variables experimentales                                      | 29          |
| 6.5.1. pH                                                          | 29          |
| 6.5.2. OD                                                          | 29          |
| 6.5.3. ORP                                                         | 29          |
| 6.5.4. Temperatura (T)                                             | 30          |
| 6.5.5. Conductividad                                               | 30          |
| 6.5.6. DQO                                                         | 30          |
| 6.5.7. DBO                                                         | 30          |

|            |                                                                                                                                   |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.5.8.     | Voltaje                                                                                                                           | 30        |
| 6.6.       | Intensidad de Corriente                                                                                                           | 31        |
| 6.6.1.     | Potencia                                                                                                                          | 31        |
| 6.6.2.     | Densidad de potencia                                                                                                              | 32        |
| 6.6.3.     | Densidad de corriente                                                                                                             | 32        |
| 6.6.4.     | Densidad volumétrica                                                                                                              | 32        |
| <b>7.</b>  | <b>METODOLOGÍA</b>                                                                                                                | <b>34</b> |
| 7.1.       | Selección de la vivienda                                                                                                          | 34        |
| 7.2.       | Descripción del área de estudio                                                                                                   | 34        |
| 7.2.1.     | Selección del tipo de residuos de la zona rural                                                                                   | 35        |
| 7.3.       | Concentración de los residuos utilizados                                                                                          | 36        |
| 7.4.       | Potencial de generación de gas en cada residuo                                                                                    | 36        |
| 7.5.       | Selección del diseño del tipo celda microbiano a escala laboratorio                                                               | 37        |
| 7.6.       | Selección del tipo de material                                                                                                    | 37        |
| 7.7.       | Plan de muestreo                                                                                                                  | 40        |
| 7.8.       | Diseño y pruebas de desempeño del material                                                                                        | 41        |
| 7.9.       | Diseño experimental                                                                                                               | 41        |
| 7.9.1      | Equipos empleados en las celdas de combustibles microbianas                                                                       | 47        |
| <b>8.</b>  | <b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>                                                                                                      | <b>48</b> |
| <b>8.1</b> | <b>CAPÍTULO I</b>                                                                                                                 | <b>48</b> |
| 8.1.1.     | CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS                                                                  | 48        |
| <b>8.2</b> | <b>CAPÍTULO II</b>                                                                                                                | <b>49</b> |
| 8.2.1.     | CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA LABORATORIO                                                                              | 49        |
| 8.2.2.     | Fase I: Ensayo preliminar                                                                                                         | 49        |
| 8.2.3.     | Fase II: Ensayo preliminar N°2                                                                                                    | 52        |
| 8.3.       | Comparación de parámetros físicoquímicos en el cátodo-ánodo antes y después del tiempo de operación: Fase I – Fase II             | 55        |
| 8.4.       | Fase III: Combinación de sustratos seleccionados de acuerdo a los ensayos preliminares                                            | 56        |
| 8.4.1.     | Densidad de potencia                                                                                                              | 57        |
| 8.4.2.     | Muestra del calculo                                                                                                               | 58        |
| 8.5.       | Fase IV: Configuraciones del diseño en las celdas de combustible microbianas teniendo en cuenta la mejor combinación de sustratos | 58        |
| 8.5.1.     | Densidad de potencia                                                                                                              | 60        |

|                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.5.2. Demanda biológica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )                                                                            | 61        |
| 8.5.3. Porcentaje de remoción del DBO <sub>5</sub>                                                                                 | 61        |
| 8.5.4. Demanda química de oxígeno                                                                                                  | 62        |
| 8.6. Fase V: Celda de combustible microbiana a escala banco                                                                        | 62        |
| 8.6.1. Potencia volumétrica                                                                                                        | 64        |
| 8.6.2. Demanda biológica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )                                                                            | 65        |
| 8.7. Análisis de la comparación de parámetros fisicoquímicos en el cátodo-ánodo antes y después del tiempo de operación: Fase III. | 66        |
| <b>8.8. CAPÍTULO III</b>                                                                                                           | <b>67</b> |
| 8.8.1. GENERACIÓN DEL GAS METANO                                                                                                   | 67        |
| 8.8.2. Potencial y eficiencia en la generación de gas metano                                                                       | 67        |
| 8.8.3. Análisis de la generación de gas metano                                                                                     | 68        |
| <b>9. IMPACTO SOCIAL, HUMANISTA DEL PROYECTO</b>                                                                                   | <b>69</b> |
| <b>10. CONCLUSIONES</b>                                                                                                            | <b>70</b> |
| <b>11. RECOMENDACIONES</b>                                                                                                         | <b>71</b> |
| <b>12. BIBLIOGRAFÍA</b>                                                                                                            | <b>72</b> |
| <b>13. ANEXOS</b>                                                                                                                  | <b>78</b> |
| 13.1. Anexo 1. Formatos de vistas                                                                                                  | 78        |
| 13.2. Anexo 2. Prototipo de Celda de Combustible Microbiana.                                                                       | 78        |
| 13.3. Anexo 3. Muestreo de las aguas residuales                                                                                    | 79        |
| 13.4. Anexo 4. Diseño experimental                                                                                                 | 80        |
| 13.5. Anexo 5. Resolución 631 del 2015 vertimiento de aguas residuales                                                             | 82        |
| 13.6. Anexo 6. Vertimiento de aguas residuales de ganadería                                                                        | 82        |
| 13.7. Anexo 7. Voltajes fase I                                                                                                     | 83        |
| 13.8. Anexo 8. Voltajes fase II                                                                                                    | 83        |
| 13.9. Anexo 9. Parámetros Pretest y Postest.                                                                                       | 84        |
| 13.10. Anexo 10. Voltajes fase III                                                                                                 | 84        |
| 13.11. Anexo 11. Voltajes fase IV                                                                                                  | 85        |
| 13.12. Anexo 12. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )                                                                  | 85        |
| 13.13. Anexo 13. Demanda Química de Oxígeno (DQO)                                                                                  | 86        |
| 13.14. Anexo 14. Voltajes fase V                                                                                                   | 86        |
| 13.15. Anexo 15. Parámetros Pretest y Postest.                                                                                     | 87        |
| 13.16. Anexo 16. Generación de Gas Metano                                                                                          | 87        |
| 13.17. Anexo 17 Costo Celda de Combustible Microbiana                                                                              | 90        |

### LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Características fisicoquímicas del agua residual doméstica.....                                                    | 19 |
| <b>Tabla 2.</b> Caracterización microbiológica de la PTAR del Campus de la UMNG.....                                               | 20 |
| <b>Tabla 3.</b> Materiales de la CCM de doble cámara.....                                                                          | 26 |
| <b>Tabla 4.</b> Propiedades eléctricas y térmicas de los materiales para las cámaras de las celdas de combustible microbianas..... | 36 |
| <b>Tabla 5.</b> Propiedades eléctricas de los materiales carbonosos y metálicos.....                                               | 37 |
| <b>Tabla 6.</b> Celdas de combustible microbianas fase I.....                                                                      | 41 |
| <b>Tabla 7.</b> Configuraciones físicas de las CCMs de la fase IV.....                                                             | 43 |
| <b>Tabla 8.</b> Configuraciones físicas de la CCM de la fase V.....                                                                | 44 |
| <b>Tabla 9.</b> Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales Domésticas.....                                              | 45 |

### LISTA DE ILUSTRACIONES

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Ilustración 1.</b> Celda de combustible microbiana.....                                                                           | 28 |
| <b>Ilustración 2.</b> Celda de combustible microbiana de doble cámara.....                                                           | 31 |
| <b>Ilustración 3.</b> Localización de la vivienda rural objeto de estudio.....                                                       | 37 |
| <b>Ilustración 4.</b> Recolección de aguas residuales domésticas.....                                                                | 38 |
| <b>Ilustración 5.</b> Prototipo de celda de combustible microbiana de doble cámara.....                                              | 40 |
| <b>Ilustración 6.</b> Desarrollo experimental fase I.....                                                                            | 44 |
| <b>Ilustración 7.</b> Desarrollo experimental fase III.....                                                                          | 46 |
| <b>Ilustración 8.</b> Desarrollo experimental fase IV.....                                                                           | 47 |
| <b>Ilustración 9.</b> Voltajes generados por las aguas residuales domésticas.....                                                    | 51 |
| <b>Ilustración 10.</b> Voltajes generados por las heces bovinas.....                                                                 | 52 |
| <b>Ilustración 11.</b> Voltaje generado por el compostaje.....                                                                       | 53 |
| <b>Ilustración 12.</b> Voltaje generado por las aguas residuales domesticas.....                                                     | 54 |
| <b>Ilustración 13.</b> Voltaje generado por las heces bovinas.....                                                                   | 55 |
| <b>Ilustración 14.</b> Voltaje generado por el compostaje.....                                                                       | 56 |
| <b>Ilustración 15.</b> Voltajes promedios de acuerdo a las combinaciones de sustratos en las celdas de combustibles microbianas..... | 58 |
| <b>Ilustración 16.</b> Densidad de potencia relacionada a la combinación de sustratos.....                                           | 59 |
| <b>Ilustración 17.</b> Voltajes promedio de acuerdo a las configuraciones físicas en las celdas de combustible microbianas.....      | 60 |
| <b>Ilustración 18.</b> Densidad de potencia relacionada a las modificaciones de las CCM.....                                         | 62 |
| <b>Ilustración 19.</b> Comparación del DBO5 en la cámara catódica y anódica antes y después del tratamiento en la fase IV.....       | 63 |
| <b>Ilustración 20.</b> Voltaje promedio a escala banco de 3 litros.....                                                              | 64 |
| <b>Ilustración 21.</b> Comparación de la potencia volumétrica de CCM.....                                                            | 65 |
| <b>Ilustración 22.</b> Comparación del DBO5 en la cámara catódica y anódica antes y después del tratamiento en la fase V.....        | 66 |
| <b>Ilustración 23.</b> Generación de gas metano en CCMs a escala laboratorio.....                                                    | 68 |
| <b>Ilustración 24.</b> Generación de gas metano en CCMs a escala banco.....                                                          | 69 |

## RESUMEN

Luego de los cambios ocurridos en el mundo tras la tecnificación y la mercantilización de nuestra vida en sociedad, las zonas rurales se han visto gravemente afectadas, pues la calidad de vida con la que cuentan la gran mayoría de habitantes es baja, debido a la falta de servicios públicos como la recolección y manejo de aguas residuales y el suministro de gas natural. Razón por la cual la implementación de tecnologías individuales, eficientes, económicas y de larga duración se han convertido en una alternativa sostenible para cubrir estas necesidades en las zonas de difícil acceso. Este es el caso de las celdas de combustible microbiano, que generan energía eléctrica mediante el transporte de electrones, a partir de procesos bacterianos que contribuyen de manera eficaz al tratamiento de aguas residuales de diferente origen, pues además producen gas metano a partir de los procesos de fermentación.

En la presente investigación se diseñó un prototipo a escala laboratorio de una celda combustible bacteriana, para tratar el agua residual de las viviendas rurales y obtener una generación energética y de gas metano a partir de los procesos realizados. Para ello se realizó la caracterización físico-química del agua residual antes y después del proceso de tratamiento y se determinó el potencial que poseen los residuos de una vivienda promedio para generar gas metano, de igual manera se modificaron variables denominadas independientes para aumentar la eficiencia de la celda, que a su vez se evidencian en las variables dependientes; con el fin de obtener en su efluente con valores permisibles establecidos por la Resolución 631 del año 2015.

Durante el desarrollo de las fases experimentales la generación máxima de Voltaje se dió en la celda de la Fase IV con un valor 379,5 mV. De igual manera la mayor reducción de la Demanda Biológica de Oxígeno se obtuvo en esta fase con un porcentaje de remoción del 89,8% para el Cátodo y 65,1% para el Ánodo. Se concluyó que la combinación óptima de sustratos entre heces bovinas y aguas residuales domésticas, y el área óptima de los electrodos fue de 0,02833 m<sup>2</sup> para un volumen de 1 litro. De igual manera se concluyó que un aumento del volumen de la celda debe estar directamente relacionada con la cantidad de electrodos y el área de la membrana a utilizar. Así mismo se evidencia que es necesario realizar una aclimatación rápida y eficiente de los sustratos para acortar el tiempo en obtener una fase exponencial en la generación de energía y gas metano.

**PALABRAS CLAVES:** Celda de Combustible Microbiano, Tratamiento de Aguas Residuales, Energía Alternativa.

## ABSTRACT

After the changes that have occurred in the world after the modernization and commercialization of our life in society, rural areas have been seriously affected, since the quality of life that the vast majority of inhabitants have is low, due to the lack of public services such as the collection and management of wastewater and the supply of natural gas. This is why the implementation of individual, efficient, economical and long-lasting technologies have become a sustainable alternative to meet these needs in hard-to-reach areas. This is the case of microbial fuel cells, which generate electrical energy through the transport of electrons, from bacterial processes that effectively contribute to the treatment of wastewater of different origin, since they also produce methane gas from the process's fermentation.

In this research, a laboratory-scale prototype of a bacterial fuel cell was designed to treat wastewater from rural homes and obtain energy and methane gas generation from the processes carried out. For this, the physical-chemical characterization of the wastewater was carried out before and after the treatment process and the potential that the waste of an average house has to generate methane was determined, in the same way, variables called independent were modified to increase the efficiency of the cell, which in turn is evidenced in the dependent variables; in order to obtain in its effluent with permissible values established by Resolution 631 of 2015.

During the development of the experimental phases, the maximum voltage generation was in the cells of Phase IV with a value of 379.5 mV. In the same way the greatest reduction in the Biological Oxygen Demand was obtained in this phase with a removal percentage of 89, 8% for the Cathode and 65.1% for the Anode. It was concluded that the optimum combination of substrates for power generation was bovine feces and domestic wastewater, and the optimal electrode area was 0.02833 m<sup>2</sup> for a volume of 1 liter. Likewise, an increase in the volume of the cell must be directly related to the number of electrodes and the area of the membrane to be used. Besides it is necessary to perform a fast and efficient acclimatization of the substrates to shorten the time to obtain an exponential phase in the generation of energy and methane gas

**KEY WORDS:** Microbial Fuel Cell, Wastewater Treatment, Alternative Energy

## INTRODUCCIÓN

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible se crearon con la finalidad de mejorar la situación global y llegar a un balance mundial. En el objetivo número 7 se enuncia la obtención de energía asequible y no contaminante, ya que las fuentes convencionales de generación de energía producen diferentes tipos de impactos en los ecosistemas (Organización de las Naciones Unidas, 2020).

En la actualidad la cantidad de personas que no cuenta con acceso a la electricidad es de aproximadamente 789 millones a nivel mundial. Sumado a ello el número de habitantes que utilizan combustibles contaminantes para la cocción de alimentos es 3 veces mayor a la población anteriormente mencionada (All, 2020). En Colombia la mayoría de la población en las zonas rurales están en situación de pobreza y sin acceso a gas y energía, para el desarrollo de sus actividades cotidianas como la cocina. Un estudio sociodemográfico realizado por el DANE en el año 2014 dio a conocer que la población rural no cuenta con una cobertura de servicios públicos como el de gas. De igual manera la cobertura de alcantarillado está por debajo del 6 %, el acceso a acueducto era de sólo el 42,5% y la prestación del servicio de energía cubría el 82,9%. El mismo estudio informó que el 15% de la población rural del país no cuenta con la prestación de ningún servicio anteriormente mencionado (Departamento administrativo Nacional de Estadísticas, 2020); Con estos datos suministrados por el DANE se concluye que hay una baja cobertura en relación con las redes de alcantarillado y con suministro de gas natural. Debido a esto es necesaria la implementación de una tecnología que brinde una solución apropiada para suplir estas carencias, y así mejorar la calidad de vida de los habitantes de las zonas rurales.

La Celda de Combustible Microbiano (CCM) es una tecnología que produce gas metano, hidrógeno, energía eléctrica y abono, a partir de la degradación de los residuos orgánicos y aguas residuales, a su vez disminuyen las concentraciones de DBO, Nitrógeno, sulfatos y de patógenos presentes en ellas. Esta tecnología es de gran utilidad a la hora de resolver problemáticas sociales en los territorios aislados de las urbes. Esto debido a su alta eficiencia en la reducción de parámetros contaminantes y su potencial de transformación de residuos orgánicos a gas metano por medio de comunidades bacterianas presentes en aguas residuales, mitiga la falta de prestación de los servicios (Pineda, 2016).

La CCM es una herramienta que permite una flexibilidad en el manejo de diversos sustratos para la producción de energía y reducción de parámetros contaminantes, puede adaptarse a diferentes metodologías como cámara sencilla y doble cámara. Así mismo los materiales a utilizar para desarrollar este tipo de tecnología son diversos, generando cada uno un determinado producto y eficiencia, estos parámetros fueron identificados mediante el semillero de investigación de la facultad de ingeniería ambiental (Aldana,N & Castellanos, P, 2009).

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción**

Las actividades cotidianas del hombre y sus hábitos en el último siglo, han generado un alto grado de contaminación y de modificación de los ecosistemas. Además de generar un aumento progresivo del calentamiento global. Por esta razón los países en el mundo han propuesto diferentes mecanismos para disminuir los impactos ocasionados por las actividades económicas y el cambio climático, ya que sus consecuencias podrían llegar a causar una nueva extinción masiva de las especies incluida la especie humana (González, Jurado, González, Aguirre, Jiménez & Nívar, 2003).

Entre las actividades que ocasionan dicho efecto en el planeta se encuentran: la ganadería extensiva, la agricultura intensiva, la deforestación, el uso de combustibles fósiles, las energías convencionales, el vertimiento de residuos en fuentes de agua, entre otros (Fernández, 2011). Así mismo la ganadería, la porcicultura y la avicultura intensiva contribuyen en buen grado al calentamiento global, debido al gas metano que es expulsado al ambiente por medio de las heces fecales y a la contaminación de los recursos hídricos de las zonas en donde se desarrollan dichas actividades. El metano tiene un potencial 23 veces más alto de calentamiento global que el  $CO_2$ . Adicionalmente, la producción de carne, concentra millones de animales en una porción de tierra reducida (Carmona, Bolívar, & Giraldo, 2005); (Ideam, 2007) (Benavides, 2007).

Por otra parte, los países subdesarrollados como Colombia se caracterizan por tener un clima idóneo que permite el desarrollo de actividades agropecuarias. El Departamento de Boyacá ha potenciado la economía de las diferentes ciudades y municipios basado en la producción agrícola y pecuaria. Estas actividades han contribuido en gran parte a la generación de grandes cantidades de residuos de origen rural y al aumento de problemas ambientales a los recursos como el agua, el aire y el suelo.

Un estudio sociodemográfico realizado por el DANE en el año 2014, revela que el 16% de los habitantes de las zonas rurales han abandonado sus casas y migrado a zonas urbanas desde el año 2005 (DANE, 2014). De acuerdo a lo anterior, las tecnologías apropiadas de tipo sostenible como las CCM se han posicionado como una alternativa muy interesante para la solución de varios problemas presentes en las zonas rurales en nuestro país, ya que permiten la generación de energía eléctrica mediante la depuración de aguas residuales. Esta tecnología tiene como enfoque fundamental el uso de materiales económicos y accesibles para tecnologías sustentables, de fácil manejo y funcionamiento para los habitantes de las zonas rurales.

## **2. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseñar un prototipo para el tratamiento de aguas residuales y la generación de gas metano a partir de residuos en una vivienda rural promedio en el departamento de Boyacá.

### **Objetivos Específicos**

- Caracterizar de manera físico - química las aguas residuales que se producen en las viviendas rurales.
- Construir a escala de laboratorio un tratamiento para el agua residual a partir de una celda de combustible microbiano.
- Evaluar la eficiencia y potencial en la generación de gas metano en los residuos generados en las viviendas rurales.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Con la finalidad de trazar un nuevo camino hacia una vida con mejores sociedades, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible. Esta Agenda cuenta con 17 Objetivos enfocados a reducir el cambio climático, la desigualdad y las brechas sociales, entre otros, y se implementó desde el año 2015 hasta el año 2030. En ella, las instituciones gubernamentales, internacionales y privadas, deben enfocarse al cumplimiento de dichos objetivos (ONU, 2018).

De acuerdo a lo anterior, en la actualidad se han desarrollado e implementado diversas tecnologías que permiten el tratamiento de aguas residuales de manera eficiente y eficaz, teniendo como objetivo común la reducción de los costos de elaboración, operación y mantenimiento. Un factor relevante que se ha buscado para este tipo de tecnologías es darle un valor agregado a la reutilización de residuos generados en las zonas rurales, la utilización de las aguas residuales para generar energía eléctrica, biogás y abono a partir de las altas cargas de concentración de materia orgánica. Estos resultados se pueden conseguir mediante la implementación de Celdas de Combustible Microbiano CCM, ya que, aunque sea una tecnología reciente y poco explorada presenta grandes aplicaciones para resolver problemas indispensables, como lo es la falta de acceso y disponibilidad de fuentes energéticas renovables en las zonas rurales.

Debido a la falta de servicios de alcantarillado, las zonas rurales han tenido que buscar alternativas para tratar sus aguas residuales como los tanques sépticos. Sin embargo, según el Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental realizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2012, los tanques sépticos son insuficientes para reducir las cargas contaminantes y por ello es fundamental complementar esta tecnología mediante un sistema de tratamiento como por ejemplo las CCM que ayuden a la reducción de los niveles de contaminación de las aguas residuales domésticas (Sostenible, 2012).

Es por esto, que las CCM surgen como una alternativa viable y sostenible para el tratamiento del agua residual en estas áreas vulnerables y al mismo tiempo abarcan varios ODS como el de poner fin a la pobreza a través del acceso a los recursos naturales. Así mismo, el de generar energía asequible y no contaminante de manera renovable, el de fomentar industria innovación e infraestructura y contribuir en la acción por el clima mediante soluciones sostenibles. A fin de mitigar los problemas ambientales y mejorar la calidad de vida de las personas en dichas zonas mediante la generación de energía y biogás para el cubrimiento de las necesidades básicas. Sin embargo, este tipo de tecnología a escala real aún se encuentra en fase de exploración. Por lo que su desarrollo actualmente se realiza a escala de laboratorio, estudiando desde diferentes puntos vista la generación de gas metano y de energía; así como la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas e industriales.

De igual manera, resulta de gran importancia seguir aportando al conocimiento de las celdas de combustible microbiano respondiendo a las necesidades de educación ambiental en las zonas rurales (Acosta-Castellanos, 2020), iniciando desde la adquisición de materiales de fácil acceso los cuales sean distribuidos por almacenes municipales como ferreterías y droguerías. Es indispensable integrar las materias primas o insumos que se tienen disponibles, a fin de darle un correcto aprovechamiento del entorno que los rodea y así poder crear nuevas opciones de uso de energías renovables de la mano con la disminución de cargas contaminantes al medio ambiente debido a que el agua residual es una de las fuentes principales de abastecimiento para estas tecnologías.

#### 4. ESTADO DEL ARTE

En 1910, el botánico Michael Cresse Potter observó por medio de una celda galvánica con sustrato orgánico que la energía libre era emitida por la reacción de las bacterias *Escherichia Coli* (Potter, 1911). Llevando a que investigadores como Barnett Cohen se interesara en el tema, así que basado en las investigaciones del botánico y publicó un estudio sobre celdas eléctricas por medio de cultivos de bacterias en 1931, en el cual concluyó que la conexión entre un grupo de celdas de combustible biológico de forma serial generaba un voltaje de 35 V y una corriente de 2 mA (González, 2013).

Del mismo modo en 1960 se realizó el análisis de la generación de energía con residuos biológicos humanos, ya que la NASA necesitaba una forma de manejar los residuos generados durante los vuelos espaciales, por ello se interesó en la implementación de las celdas de combustible microbiano, para obtener energía eléctrica mediante el almacenamiento de los residuos y los microorganismos presentes en ellos (Del Duca, 1967).

No obstante, en 1973, S. Suzuki desarrolló un prototipo de celda de combustible que utilizaba ambientes propicios para el desarrollo de bacterias anaerobias; modelo que tuvo una gran acogida ya que se obtenían buenos resultados en producción de energía y en la disminución de la DQO, (Ríos, 2016) tanto así que en la actualidad las investigaciones se centran en aumentar la eficiencia en la generación de energía, siendo entonces el caso de Torres (2015) quien evaluó la producción de energía con diferentes sustratos con el fin de identificar cuál de ellos generaba más voltaje durante un tiempo determinado. Los sustratos evaluados fueron: barro, frutos secos, carne y zumo de fruta; como resultado obtuvo que el sustrato con mayor voltaje obtenido durante 24 horas era el de barro, así que los aspectos de mayor relevancia en la investigación sobre la eficiencia en una celda son los materiales a utilizar y el tipo de electrodo, siendo este último de vital importancia, ya que define la eficiencia en el transporte de energía del sistema por medio de sus propiedades de conducción.

Al respecto, Liu, Deng y Feng (2019) analizaron el comportamiento de una celda microbiana al utilizar un electrodo de carbono, y encontraron que el carbón crea un ambiente propicio para la producción de metano, ya que este aumentó un 26% y la energía generada aumentó 4 veces con respecto a las generadas usando electrodos de materiales metálicos.

Por su parte Kang-yu Lee, (2019) analizó la comparación de eficiencia en las celdas de combustible microbiano con diferentes tipos de membranas. Una de intercambio aniónico (AEM) y una de intercambio catiónico (CEM), con la finalidad de identificar cuál celda tenía la mayor capacidad de eliminar DQO y nitratos, así como su producción de energía. La investigación concluyó que la membrana de intercambio aniónico (AEM) obtuvo una eliminación mayor de DQO y nitrato, pero generó una menor cantidad de energía, a comparación de la celda con membrana de intercambio catiónico (CEM), que produjo mayor energía, pero tuvo una eliminación de DQO y nitratos en menor cantidad.

Ragab, Elawad y Abdel-Halim, realizaron en el 2019 varias pruebas con diferentes concentraciones de sustratos con ciclos cortos en su tiempo de retención, las concentraciones de DBO de 100 mg/L, 150 mg/L y 300 mg/L y obtuvieron resultados de eliminación de DBO del 90%, 92% y 53% respectivamente, así como una generación de potencia máxima de 824 mv, 858 mv y 808 mv. Permitiendo evidenciar que otro factor clave para la descomposición de material

orgánico como las grasas generadas por las aguas residuales es la temperatura, ya que en el estudio realizado por Petropoulos (2020) demostró que la disminución de la temperatura menos de 27.5 °C afecta la eficiencia del proceso de descomposición en un 40%.

Ahora bien, teniendo en cuenta que las actividades cotidianas rurales generan una producción paulatina de aguas residuales durante el día, es fundamental la evaluación del comportamiento dentro de una celda con ingreso de sustrato por lotes. Es por ello que Pannell y sus colaboradores, (2016) analizaron el rendimiento en la producción de energía teniendo en cuenta la forma como se suministra el sustrato en la celda, es decir, si se suministra de forma continua o por lotes, dando como resultado que una entrega de sustrato por lotes aumenta la producción de energía dentro del sistema, ya que permite un aumento en la concentración de las bacterias presentes. De igual manera, la operación por lotes permite una mayor acción metabólica de las bacterias logrando eliminar 88% de carbohidratos, 76% de proteínas y un 8% de nitrógeno (Li, et al., 2019).

Así que con la finalidad de caracterizar los residuos sólidos generados durante el desarrollo de actividades culinarias, Li y su equipo lograron identificar en 2019 las bacterias presentes en las celdas de combustible microbiano con sustrato de residuos de alimentos mediante la secuenciación de alto rendimiento del gen 16S rRNA, en la cual se obtuvo que las bacterias dominantes eran Firmicutes, Bacteroidetes y Proteobacteria, pero el género más abundante fueron las *Geobacter*, bacterias que están asociadas a hábitats como sedimentos de cuerpos de agua dulce, marina y ambientes subterráneos como los acuíferos, por lo cual se hace necesario señalar que el género *Geobacter* cuenta con la propiedad de transportar electrones hacia los electrodos de las celdas mediante las vellosidades unidas en la membrana celular denominada Pili, razón por la cual han demostrado ser útiles para la descomposición de diferentes sustancias como derivados de hidrocarburos, el uranio y material orgánico, pues esa capacidad de degradar diferentes sustratos le dan un gran potencial a este tipo de bacterias para degradar una gran variedad de residuos (Mejía, Vásquez, & Gonzalez., 2012).

En el 2019 Debajyoti Bose trabajó la generación de bioelectricidad a partir de aguas residuales, de manera que en su estudio identificó la presencia de bacterias *Firmicutes phyla*, las cuales tienen una gran capacidad de formar colonias con otros tipos de bacterias como las betaproteobacterias y las actinobacterias formando comunidades electro activas capaces de descomponer numerosos compuestos, estableciendo que las aguas residuales generadas por la población, pueden utilizarse como sustrato para las celdas de combustible microbiano en plantas de tratamiento de aguas residuales de municipios o ciudades, reduciendo la concentración de contaminantes y a su vez generando varios tipos de combustibles como metano e hidrógeno y energía eléctrica (Wei, Harb, Amy, Hong, & Leiknes, 2014).

Estudios que permiten inferir que las celdas microbianas podrían aumentar significativamente la eficiencia de producción de energía y ser más factible de implementar, ya que según expertos como (Beegle y Borole, 2018) con los métodos actuales, la producción de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales los gastos de operación son más elevados que los ingresos por los servicios prestados.

En este orden de ideas, se puede decir que la electro-fermentación es una tecnología eficiente utilizada en sustratos como residuos de alimentos, como una opción con gran viabilidad para la producción de metano. Un estudio aplicado a pequeñas cargas energéticas de 0.8 Voltios por medio de los electrodos utilizados en la celda obtuvo un aumento en la producción de metano

en 23.6%, comparado con la obtenida en biodigestores. Esto se debe a que las cargas eléctricas aportadas generan una estimulación en el comportamiento de las bacterias denominado aclimatación, el cual provoca un aumento en la actividad de la comunidad bacteriana y aumenta el proceso de descomposición y la generación de metano (Liu, Deng & Feng, 2019).

Según Zhang y Angelidaki, (2014) la producción de hidrógeno en una celda de electrólisis microbiano (MEC) a partir de varios tipos de materia orgánica podría superar a su producción por medio de electrólisis directa del agua. Hipótesis que Bo y su equipo (2014) ponen a prueba al desarrollar un prototipo de celda de electrólisis microbiana con un digestor de barril con 1 sola cámara, prototipo que produjo hidrógeno, redujo la producción de  $CO_2$ , y aumentó la disminución de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) 3 veces en comparación con una celda microbiana normal, resultado que se complementa con lo expuesto por Kondaveeti (2019) quien comparó los rendimientos entre una celda microbiana de cámara sencilla y de cámara doble, encontrando que la CCM (Celda de combustible Microbiano) de doble cámara obtuvo una potencia de energía 3.7 veces mayor a la CCM de cámara sencilla.

En resumen, estos estudios muestran la viabilidad de las Celdas de Combustible Microbiano para generar energía y degradar los contaminantes en aguas residuales y residuos domésticos. De manera que en base a ellos y la experimentación expuesta, se busca adaptar estos modelos a una vivienda rural promedio en Colombia y mejorar sus condiciones, así mismo seguir desarrollando alternativas de producción de energía con base en la utilización de cualquier tipo de residuo, esto con el fin de mejorar las condiciones de las fuentes hídricas contaminadas con vertimientos, pues en la actualidad los cambios generados por el uso de agua y energía en las zonas rurales ha aumentado de manera importante, debido al crecimiento de la población en el departamento de Boyacá, siendo de especial importancia tanto para las alcaldías, gobernaciones, corporaciones y demás entidades gubernamentales, pues es el mundo moderno quien demanda la implementación de tecnologías eficientes que permitan tratar las aguas residuales para producir energía, la cual de paso sirva como sustento de la energía consumida en estas zonas, así que una de las tecnologías que sobresale son las celdas de combustible microbiano.

Así mismo es indispensable tener en cuenta que el sector agropecuario del departamento de Boyacá ha mostrado gran diversidad de problemas que afectan la calidad de vida de la población rural. Estos están relacionados a la falta de gestión del recurso y la construcción de acueductos a fin de surtir agua potable y la gestión del servicio de energía eléctrica mediante la identificación adecuada de las necesidades de la población. Por lo tanto, se requiere potenciar el desarrollo rural en pro de disminuir estas brechas a fin de generar un desarrollo sostenible y sustentable en esta región (Boyacá, 2018)

De acuerdo a lo anterior, el diseño y construcción de una de CCM para el tratamiento de las aguas residuales y la generación de energía, se ve como una solución interesante a esta problemática. La literatura plantea diversos diseños y metodologías para su implementación y adaptación a las condiciones locales. El centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ) planteó el desarrollo de una CCM para la depuración de aguas residuales y generación de energía eléctrica a partir de un diseño que permitió la colonización del ánodo. Posteriormente se midió el desempeño de dicha CCM y se optimizó para reducir fallas en el funcionamiento y obtener mejores resultados con respecto a la generación de energía, la depuración de aguas y la eficiencia de remoción de materia orgánica (López, 2014)

Por su parte, la Universidad Autónoma del Estado de México empleó una CCM a escala de laboratorio para la generación de electricidad empleando agua residual como sustrato, monitoreando su desempeño mediante parámetros como la corriente eléctrica, el voltaje y la potencia. El estudio concluyó que este tipo de tecnologías es capaz de generar electricidad y al mismo tiempo depurar aguas residuales (Alzate, Fuentes, Alvares y Sebastián, 2008).

Según el estudio “Determinación del efecto del tipo de membrana sobre las características de funcionamiento de una celda de combustible microbiana para la producción de energía eléctrica” realizado en la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca, la implementación de diferentes tipos de materiales como la membrana de intercambio protónico influye directamente en los valores de las características eléctricas de la CCM. Ellos realizaron una comparación implementando caucho y nitrilo como membrana de intercambio protónico a fin de evaluar la eficiencia eléctrica. Obtuvieron como resultado que la membrana con material en nitrilo dio mejores resultados con respecto al voltaje máximo generado el cual fue de 258.45 mv (Ortiz, 2019).

Por otra parte, en un estudio realizado en la Escuela Técnica superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, en la actualidad las CCMs son una tecnología emergente y en constante desarrollo y crecimiento debido a que aborda dos problemáticas particulares que afectan cualquier sociedad como lo son la disponibilidad de agua no contaminada para diversos fines y la crisis energética (Cazorla, 2015).

Por otro lado, (Cazorla, 2015) resaltar que en la actualidad este tipo de sistemas tiene otras aplicaciones diferentes al solo tratamiento de las aguas residuales, las cuales están:

- Generación de electricidad en campos de refugiados, donde el acceso a la electricidad es limitado.
- Abastecer sensores y transmisores pequeños de señales en localizaciones remotas.
- En naves espaciales para el uso de residuos de los astronautas a fin de producir energía a bordo.

Siendo de señalar que un factor que resalta en esta investigación es que a pesar de que las CCMs presentan diversas ventajas en el tratamiento de aguas residuales y la producción de energía eléctrica; aún son tecnologías que tienen bastante camino por desarrollar para llegar a ser económicamente viables principalmente por sus altos costes de capital, si se comparan con los tratamientos de aguas convencionales (Cazorla, 2015).

En el contexto de nuestro país, la Universidad de Nariño estudió las principales variables que se deben considerar en los diferentes tipos de CCM, así como también resaltó la posibilidad de utilizar diversos sustratos, ya que permite evaluar el desempeño de esta tecnología mediante las combinaciones de diferentes sustratos a fin de generar un sistema sustentable y adaptable de acuerdo a las particularidades de cada región (Reveló, 2013).

Por otro lado, un estudio realizado en la Universidad Distrital Francisco José De Caldas señaló que la construcción de este tipo de tecnologías debería primero evaluar los materiales de fácil adquisición, así como las variables de tipo económico en su elaboración y operación. El aspecto más importante que resalta en este estudio, es que hay pocas investigaciones enfocadas a evaluar el desempeño de las CCM por medio de materiales convencionales de tipo local de fácil acceso, uso y comercialización, como el PVC y carbón activo, entre otros (Marín, 2016; pág. 71)

De acuerdo con lo anterior los materiales que han sido implementados con mayor frecuencia para el estudio y construcción de las cámaras catódica y anódica en celdas de combustible microbianas son principalmente las botellas de vidrio, el plexiglás, el policarbonato y el polietileno tereftalato (PET), entre otros. Generalmente se usan para volúmenes que varían entre los 300 ml y los 100ml (Pineda, 2016).

En cuanto a la generación de biogás, encontramos que Vera, Estrada, Martínez y Ortiz (2013) realizaron el potencial de generación de biogás con excretas de bovino, en la cual utilizaron 10 kg de un ejemplar mediano, y obtuvieron una producción de biogás de 0,4 m<sup>3</sup>. De igual manera un estudio realizado por (Chemes, 2019), determina que la producción de biogás, mediante un biodigestor es de 800 m<sup>3</sup> con una cantidad de 13,5 toneladas de heces bovinas.

Mediante la utilización de un biodigestor por etapas, Durazno, (2018) evidenció las condiciones de producción de biogás, en la cual manejo 67,32 kg de heces bovinas, a una temperatura de 14,27 °C y un porcentaje de humedad del 74,26%, donde obtuvo un volumen de 0,0488 m<sup>3</sup>, en un tiempo de retención de 50 días.

De cualquier forma, es de mencionar que las anteriores investigaciones por su enfoque y objetivo brindan la posibilidad de sentar bases que permitirán encaminar en la dirección correcta este estudio, pues además de otorgar una mirada metodológica que puede implementarse en muchas de las fases que se implementaron para el desarrollo de la presente investigación, permitieron abordar otras miradas a una problemática que merece la pena tratarse por su impacto.

## **5. MARCO CONCEPTUAL**

### **5.1. Celda de combustible microbiana (CCM)**

Es un dispositivo que se caracteriza por generar energía eléctrica mediante la utilización de microorganismos que se encuentran presentes en sustratos y tienen como fin convertir la energía química encontrada en ellos, en energía eléctrica (Góngora, 2017).

### **5.2. Agua Residual Doméstica**

Son aguas residuales generadas por las escuelas, asentamientos poblacionales, centros comerciales, instalaciones turísticas y edificios públicos. Por lo general corresponden a residuos humanos los cuales llegan a las redes de alcantarillado (Aragón, 2018).

### **5.3. Cátodo**

Es el electrodo de carga negativa en donde sucede una reacción de reducción, en el cual el estado de oxidación de las especies químicas presentes se reduce al recibir electrones (Varela, 2019).

### **5.4. Ánodo**

Es el electrodo donde se da la pérdida de electrones de las especies presentes, mediante las reacciones de oxidación, usualmente este electrodo se relaciona con el polo positivo (Varela, 2019).

### **5.5. Gas Metano**

Es un hidrocarburo alifático el cual se caracteriza por ser un gas incoloro, no tóxico e inflamable. Normalmente proviene de los procesos de degradación de la materia orgánica promedio de la acción de microbios denominados metanógenos (Camona, Bolivar, & Giraldo, 2005).

### **5.6. Sustratos Orgánicos Complejos**

Son productos de desechos industriales y domésticos que se encuentran de manera abundante en el diario vivir, de fácil consecución y económicos, por lo general constituyen el combustible principal para el funcionamiento de las CCM (Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013).

### **5.7. Energía**

Es la capacidad que tiene la materia de generar calor o trabajo en forma de movimiento, luz o crecimiento biológico (Argentina, 2001).

### **5.8. Voltaje**

Es una magnitud física que se caracteriza por impulsar los electrones en un circuito eléctrico a través de un conductor el cual se encarga de transferir la energía eléctrica con mayor o menor potencia (Bembibre, 2009).

### **5.9. Anaerobiosis**

Es un proceso metabólico que se encuentra en condiciones sin oxígeno para su desarrollo, por lo general el donador de electrones está constituido principalmente por sulfatos, nitratos, azufre y dióxido de carbono (Aragón, 2018).

### **5.10. Actividad metanogénica**

Esta actividad se encuentra directamente ligada al rendimiento de la generación de gas en un sistema de digestión anaerobio, ya que las comunidades bacterianas presentes en el proceso, como, por ejemplo: *Methanospirillum hungatti* y *Methanosarcina*, tienen la capacidad de transformar el sustrato en gas (Durazno, 2018).

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

La Resolución 631 del año 2015 en el Artículo 2, define las aguas residuales domésticas como las aguas procedentes de las actividades cotidianas realizadas en el hogar, entre las cuales se encuentran aguas descargadas de los retretes, servicios sanitarios, duchas, cocina y del lavado de ropa, objetos y aseo en general.

Las aguas residuales domésticas (ARD) tienen diferentes niveles de contaminantes dependiendo de las dinámicas cotidianas dentro de cada vivienda. Una caracterización de una ARD típica se encuentra en la siguiente tabla, en donde se comparan los niveles de concentración de varios parámetros dependiendo de la ubicación de la vivienda en zonas Urbana o Rurales (Cea., 2019).

| PARÁMETRO                                        | UNIDAD  | RURAL     |
|--------------------------------------------------|---------|-----------|
| Demanda Química de Oxígeno (DQO)                 | mg/L    | 200-1600. |
| Demanda Biológica de Oxígeno (DBO <sup>5</sup> ) | mg/L    | 200-500.  |
| Sólidos Suspendedos Totales (SST)                | mg/L    | 100-500.  |
| Nitrógeno Total (NT)                             | mg/L    | 35-100.   |
| Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )           | mg/L    | 06 -60.   |
| Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )          | mg/L    | <1.       |
| Fósforo Total (PT)                               | mg/L    | 6-30.     |
| Fósforo (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )         | mg/L    | 6-25.     |
| Temperatura                                      | °C      | 8-20.     |
| pH                                               |         | 7-8.      |
| Conductividad                                    | μS / cm | 1-2.      |

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas del agua residual doméstica.

**Fuente:** Vera (2012), Henze, Harremoës, LaCour & Arvin (2002) y Cea. (2019)

Teniendo en cuenta las caracterizaciones de los microorganismos presentes en las plantas de tratamiento de aguas residuales, los investigadores determinaron la presencia de algas, protozoos, virus y bacterias entre los cuales predominan:

| Algas                            | Protozoos                 | Virus      | Bacterias      |                               |
|----------------------------------|---------------------------|------------|----------------|-------------------------------|
|                                  |                           |            | Gram negativas | Gram positivas                |
| Cianobacterias<br>(Cyanophyceae) | Giardia lamblia           | Rotavirus  | Pseudomonas    | Micrococcus<br>Staphylococcus |
| Cromófitos<br>(Heterokontophyta) | Cryptosporidium<br>Parvum | Adenovirus | Flavobacterium | Streptococcus                 |
| Clorófitas<br>(Chlorophyta)      |                           |            | Gallionella    | Bacillus                      |

**Tabla 2.** Caracterización microbiológica de la PTAR.  
**Fuente:** Torres (2011); Castellanos, P., Cuellar, L. & Pita, M. (2019)

## 6.2. TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Las aguas residuales reciben tratamiento preliminar, primario, tratamiento secundario y terciario. Cada uno de ellos cumple la función de disminuir las concentraciones de materiales contaminantes dependiendo del tipo de agua que se quiera tratar. Cada uno de ellos se describe a continuación:

### 6.2.1. Tratamiento primario:

El tratamiento primario de las aguas residuales cumple con la finalidad de eliminar materiales sólidos flotantes o en suspensión. Este proceso utiliza procesos físicos como método de separación, teniendo en cuenta factores como gravedad, cambios en la velocidad del agua, diferencias en el diámetro promedio de las partículas y peso de las partículas, entre otros, con la finalidad de realizar una estructura que cumpla con dicha limpieza de las aguas residuales (Vaca, 2015).

### 6.2.2. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario recibe las aguas residuales con una remoción de sólidos entre el 40 y 60 por ciento, y durante su proceso el agua residual elimina hasta el 90 por ciento de su contaminación proveniente de material orgánico biodegradable. Este tratamiento está diseñado para descomponer el material orgánico mediante procesos biológicos, los cuales son efectivos en la regulación del nivel de desperdicios orgánicos, el oxígeno disuelto y la población de bacterias. Además, el tratamiento secundario cuenta con procesos de aireación secundaria, el cual utiliza micro-burbujas para suspender los sólidos y posteriormente eliminarlos (Troconi & Herbert, 2010).

### **6.2.3. Tratamiento terciario**

El tratamiento terciario utiliza procedimientos más complejos para reducir las cargas contaminantes de las aguas residuales, este tipo de procesos tiene la finalidad de reducir las cargas contaminantes como por ejemplo de nitritos y fósforo. Para lograrlo utiliza procesos fisicoquímicos como la coagulación, floculación, decantación, filtración y cloración (Troconi, A & Herbert, 2010).

## **6.3. TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

### **6.3.1. Fitorremediación**

Es un método de depuración de aguas residuales no convencionales que utiliza procesos físicos, químicos y biológicos para la autodepuración del agua. Este método retiene grandes cantidades de agua residual en donde se llevan a cabo procesos de decantación de sólidos y reacciones de oxidación y degradación de material orgánicos mediante la actividad microbiológica Araque, I., Britto, M., Granados, N. & Cuellar, L. (2018).

### **6.3.2. Filtros percoladores**

Esta tecnología está conformada por una capa de piedra, escoria y grava de diferentes granulometrías. La remoción de los contaminantes se debe a la absorción y asimilación de la materia orgánica mediante la asimilación biológica, y la asistencia con inoculación de oxígeno en el medio filtrante (Márquez, 2010).

### **6.3.3. Nano filtración**

Esta tecnología utiliza membranas sintéticas con materiales tanto orgánicos como inorgánicos, diseñadas dependiendo de la utilización de las mismas. De allí el desarrollo de diferentes tipos de membrana como módulos de placa bastidor, arrollamiento en espiral, tubular y fibra hueca, cada una con propiedades únicas para la remoción de diferentes tipos de contaminantes como tinte, virus, bacterias, entre otros (Ayala, Mesa & Montoya, 2006).

### **6.3.4. Tratamientos enzimáticos**

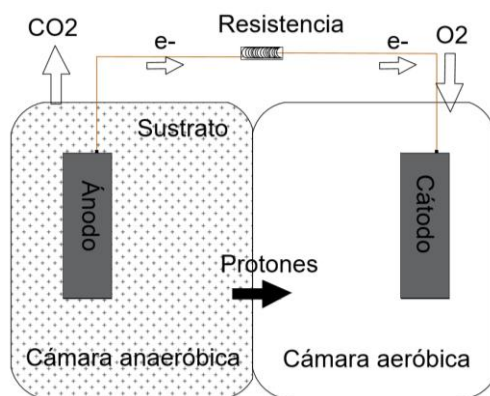
Consiste en la producción de enzimas generados por microorganismos mediante las excretas, las cuales son capaces de oxidar o mineralizar distintos contaminantes orgánicos, disminuyendo el tiempo de degradación por acción de la degradación enzimática (Pire, 2019).

### **6.3.5. Oxidación avanzada**

Esta metodología de tratamiento es una alternativa a manejar sustancias difícilmente degradables, debido a sus procesos fotoquímicos y electroquímicos, los cuales generan cambios en la estructura química de los sustratos por medio de radicales libres como los hidroxilos ( $OH\cdot$ ) (Pire, 2019).

#### 6.4. Celda de combustible microbiano

Es un dispositivo bio-electroquímico que utiliza aguas residuales como sustrato para la generación de energía a partir de la energía química almacenada en los enlaces químicos de la materia orgánica e inorgánica, por medio de los procesos de óxido-reducción y las reacciones catalíticas de las bacterias presentes en ella. Al mismo tiempo, reduce los niveles de contaminación mediante remediación biológica, ya que genera la descomposición de los compuestos orgánicos debido a la acción de las comunidades bacterianas (Revelo, Hurtado, & Ruiz, 2013).



**Ilustración 1.** Celda de combustible microbiana

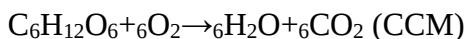
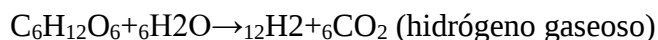
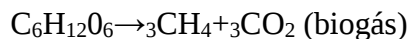
**Fuente:** Pineda (2016)

Dentro de la celda de combustible microbiano se generan diversas reacciones químicas, las cuales tienen un papel fundamental en el proceso de generación de energía. Estas reacciones se denominan de óxido-reducción: en la cámara anódica, se produce la oxidación del hidrógeno, la cual produce electrones y protones; Los protones son transportados desde el ánodo hacia el cátodo por medio de la membrana, mientras que los electrones generados son transportados por los electrodos mediante un circuito externo hacia el cátodo. En la cámara catódica se produce la reducción del oxígeno debido a la reacción entre el elemento y los protones y electrones presentes, formando agua y produciendo calor (Pineda, 2016).

De igual manera la celda desarrolla un proceso de fermentación del sustrato el cual se divide en 3 procesos para la generación del gas dentro de su sistema. El primer proceso se conoce como hidrólisis, en el cual se da la transformación de lípidos, polisacáridos, proteínas y grasas, en azúcares, aminoácidos y monosacáridos, por medio de enzimas que son utilizadas por los microorganismos para la asimilación de los productos como fuentes de energía; El segundo procesos se denomina ácido génesis: En este procesos se inicia la fermentación por acción bacteriana dando productos como el dióxido de carbono, hidrógeno y ácidos volátiles; En la tercera parte del proceso las bacterias metanogénicas realizan la conversión del ácido acético, el hidrógeno, entre otros, en una mezcla de metano y dióxido de carbono (Sreekrishnan, Kholi, & Rana, 2004)

Dichas reacciones en las CCM se generan a partir de la biomasa orgánica presente en los residuos sólidos y líquidos, de los cuales se logran obtener como resultado un sinnúmero de subproductos y biocombustibles que cuentan con una principal fuente de carbono como lo es la

glucosa. Dentro de las reacciones estequiométricas principales que presentan el metabolismo fermentativo microbiológico se encuentran las siguientes (Álzate 2008):



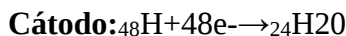
### **Ecuación 1.** Reacciones estequiométricas microbiológicas

A su vez en la operación de las CCM las reacciones electroquímicas se llevan a cabo de la siguiente manera: (Condori y Torres, 2019)

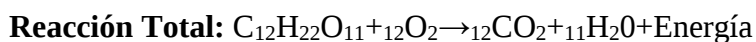
- El sustrato es oxidado de manera anaerobia por microorganismos en el ánodo.
- Posteriormente se produce el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), electrones ( $e^-$ ) y protones ( $H^+$ ) los cuales toman caminos distintos migrando al cátodo.
- El hidrógeno o protón ( $H^+$ ) lo hace a través del agua residual (Electrolito) y de la membrana de intercambio de protones.
- Luego los electrones lo realizan por medio del ánodo y el circuito externo conectado al cátodo.
- Finalmente, los electrones reaccionan con el aceptor final de electrones ( $O_2$ ) y los protones ( $H^+$ ) que atravesaron el electrolito se transforman en agua ( $H_2O$ ).

En la siguiente ecuación se presenta un ejemplo de una reacción con sacarosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ), la cual se implementa como sustrato en la CCM (Condori y Torres, 2019)

### **Microorganismo**



### **Microorganismo**



**Ecuación 2.** Reacción electroquímica con sacarosa en la CCM.

De igual manera las CCM presentan diversas ventajas en comparación a otras tecnologías implementadas en la generación de energía a partir de materia orgánica (Alzate, et al, 2008). Dentro de las cuales se encuentran:

- Conversión directa de sustratos a electricidad
- Operan de manera eficiente a temperatura ambiente
- No requieren del tratamiento del biogás generado en la celda
- No requieren necesariamente de energía extra para airear el cátodo
- Tiene aplicaciones potenciales específicamente en lugares alejados con ausencia de infraestructura eléctrica, convirtiéndola en una excelente opción de energía renovable.

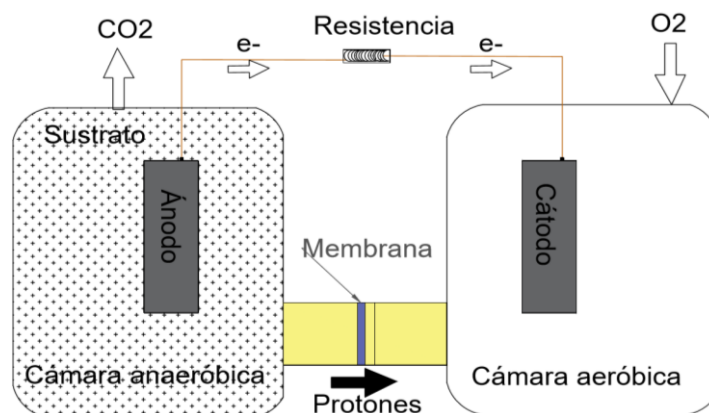
Por otra parte, es importante resaltar que en las CCM son parte elemental los electrodos, la membrana de intercambio de protones y los cables. Así mismo esta tecnología se puede elaborar bajo diferentes diseños entre los que se destacan las de cámara única, cámara doble y apilado (Condori y Torres 2019). las cuales se describen a continuación:

#### **6.4.1. Cámara Única CCM**

Este diseño se caracteriza porque tanto el ánodo y cátodo se sitúan en la misma sección, la cual por lo general se basa en un ánodo rectangular conectado con un cátodo que está expuesto directamente al aire, generando un diseño sencillo y con bajos costos (Condori y Torres 2019).

#### **6.4.2. Cámara Doble CCM**

Estas celdas generalmente presentan dos secciones las cuales se elaboran mediante una estructura tradicional tipo H que consiste en dos compartimientos, es decir; cátodo y ánodo los cuales están conectados mediante un tubo que contiene una membrana de intercambio de protones entre los que se tiene un puente salino que permite el paso de los protones hacia el cátodo mientras se bloquea la difusión de oxígeno en el ánodo. Este tipo de CCM se pueden diseñar de diferentes formas ya sea miniatura, rectangulares, Cilíndrico catódico en forma de U, de flujo ascendente con forma cilíndrica etc.



**Ilustración 2.** Celda de combustible microbiana de doble cámara

**Fuente:** Condori y Torres (2019)

Por lo general estos sistemas de tipo H se caracterizan por ser económicos, ampliamente utilizados en laboratorios y aceptables en lo que respecta a las investigaciones de parámetros básicos como la producción de energía, el tratamiento de aguas residuales y la degradación de compuestos específicos. Así mismo un factor clave a tener en cuenta es que la cantidad de energía que se genera en estos sistemas se ve directamente afectado por el área superficial del cátodo con relación al del ánodo y la superficie de la membrana.

Otro de los aspectos claves es la distancia entre los electrodos debido a que entre menor sea, favorecerá la reducción de la resistencia interna de la celda generando una mejor y mayor producción de potencia y corriente en la Celda. Pero dicha optimización del sistema involucraría una reducción de los puentes que unen las cámaras de tipo H y además el uso de espesores de las membranas en otros diseños (Pineda, 2016).

Los componentes y materiales principales de la estructura y construcción de este tipo de CCM son los siguientes según Condori y su compañero (2019):

| Elementos de una CCM | Componentes                | Materiales                                                                                        |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      | Cámaras anódica y catódica | Vidrio, Policarbonato y Plexiglás                                                                 |
|                      | Electrodo                  | Grafito, Filtro de granito, Papel carbón, Tela de carbón, Pt, Pt negro, Carbón vítreo reticulado. |
|                      | Membrana                   | Nafion, Ultrex, Polietileno, Polipropileno, Puente salino, Tabique de porcelana o electrolito.    |

**Tabla 3.** Materiales de la CCM de doble cámara

**Fuente:** Condori y Torres (2019)

#### **6.4.3. Ventajas de las CCM de doble cámara**

De acuerdo con Condori y Torres (2019) dentro de las principales ventajas se encuentran:

- Trabajan de manera continua y discontinua
- Son de bajos costos
- Generalmente implementados en estudios a escala laboratorio
- Previene la difusión de oxígeno en la cámara anódica
- El diseño permite que se adopten diversas formas prácticas para su funcionamiento
- No necesita de una membrana PEM (Nafion, ultrex), lo que la vuelve menos costosa

#### **6.4.4. Apilada CCM**

Este tipo de celda principalmente en serie o en paralelo es usualmente implementado para aumentar los voltajes y las corrientes generados por las CCM. De igual manera se puede alcanzar cualquier voltaje o corriente deseado siempre y cuando se combine la cantidad adecuada de series de celdas de combustible conectadas en paralelo (Condori y Torres, 2019).

De acuerdo a lo anterior para el funcionamiento de cualquier tipo de CCM se debe tener ciertos conceptos claros como lo son el voltaje y la corriente. El primero se define como la energía potencial eléctrica por unidad de carga la cual se mide en voltios (volts) mientras que el segundo es la cantidad de carga eléctrica que circula por medio de un material y se mide en amperios (ampers).

### **6.5. Variables experimentales**

#### **6.5.1. pH**

Es importante resaltar que el desempeño correcto incluye de manera directa la actividad biológica, por ende, el tener un valor de pH entre los 6 a 9 en el ánodo será fundamental para generar condiciones naturales del biocatalizador (López, 2014). De igual manera se debe tener en cuenta que un pH bajo contribuye de manera fácil a la transferencia de protones al cátodo y un pH alto impide el desarrollo de metanógenos los cuales ayudan a mejorar el desempeño de la celda de manera indirecta (Nava, 2018).

#### **6.5.2. OD**

En las CCM el disminuir o eliminar la presencia de oxígeno en la cámara anódica es un factor importante para producir la corriente eléctrica. Para ello se introduce nitrógeno gaseoso el cual desplaza el OD creando así condiciones anaerobias (López, 2014).

#### **6.5.3. ORP**

El potencial de óxido – reducción (ORP) es importante, ya que es mediante este parámetro mediante el cual se puede verificar el funcionamiento de manera correcta de la CCM debido a que en presencia de oxígeno el ORP es positivo y de valor alto, es decir; se presenta un ambiente

oxidante, mientras que al consumirse de manera acelerada el oxígeno prevalecerá las condiciones anaerobias generando un ambiente reductor, es decir; un ORP y/o negativo (López, 2014).

#### **6.5.4. Temperatura (T)**

Existen diferentes rangos de temperatura en la operación de las CCM a saber; temperatura ambiente de (15 a 35 °C), altas temperaturas de (50 a 60 °C) en la que predominan microorganismos termófilos y bajas temperaturas (<15 °C) predominan microorganismo Psicrófilos (López, 2014).

#### **6.5.5. Conductividad**

En la gran mayoría de las CCM, este parámetro se encuentra relacionado de manera directa con la resistencia óhmica del electrolito, ya que, al incrementar la conductividad del electrolito, disminuirá esta resistencia la cual representa el % de resistencia interna total, generando un resultado positivo en la densidad de potencia de la celda de combustible microbiano (López, 2014).

#### **6.5.6. DQO**

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) determina la cantidad de carbono que puede oxidarse dentro de una muestra, esta cantidad de oxígeno es consumida por los compuestos orgánicos y se mide en (mg/L). El valor de DQO es superior al valor de DBO, ya que las aguas residuales tienen gran cantidad de sustancias químicas y no toda la materia oxidable químicamente es bio-oxidable. En general cuando la relación de DQO y DBO es decir a DBO/DQO es mayor > a 0,5 las aguas residuales son fácilmente biodegradables, en cambio si el resultado es menor a 0,5, se considera que el efluente presenta baja biodegradabilidad (Jiménez, 2000).

#### **6.5.7. DBO**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es la cantidad de oxígeno con la que los microorganismos aerobios pueden oxidar metabólicamente los compuestos de la materia orgánica presente en el efluente, la DBO relaciona la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra (Jiménez, 2000).

#### **6.5.8. Voltaje**

La generación de voltaje dentro de una CCM, se calcula con la ley de Ohm y está determinada mediante la siguiente ecuación:

Está determinada en función de la Resistencia externa ( $R_{ext.}$ ) y la corriente ( $I$ ), y se calcula con la Ley de Ohm mediante la ecuación (López 2014):

$$V = I * R_{ext.}$$

**Ecuación 3. Voltaje**

Donde:

**V** = Voltaje (V) o (mv)

**I** = Corriente (A) o (mA)

**R<sub>ext.</sub>** = Resistencia Externa (kohms) o (ohms)

La determinación de voltaje dentro de una celda microbiana tiene variables que pueden modificar la generación del misma, ya que dentro de una celda la producción de voltaje está relacionada con la colonización bacteriana de los electrodos, las bacterias que colonizan, el material del electrodo y el sustrato utilizado (López, 2014).

## 6.6. Intensidad de Corriente

Dentro de la celda se generan bajas cantidades de corriente, debido a esto la determinación de este parámetro se logra mediante la ecuación de la ley Ohm con la fluctuación del voltaje que se observa a continuación (López 2014):

$$I = V / R_{ext.}$$

**Ecuación 4.** Intensidad de corriente

Donde:

**I** = Corriente (A) o (mA)

**V** = Voltaje en (V) o (mv)

**R<sub>ext.</sub>** = Resistencia Externa (kohms) o (ohms)

### 6.6.1. Potencia

La generación de Potencia por parte de las celdas indica la cantidad de energía eléctrica generada en un tiempo específico (López 2014).

$$P = V \cdot I$$

**Ecuación 5.** Potencia

Donde:

**P** = Potencia en (w) o (mw)

**V** = Voltaje en (V) o (mv)

**I** = Intensidad de corriente en (A) o (mA)

### 6.6.2. Densidad de potencia

Es aquella cantidad de energía generada por unidad de área por medio del electrodo de las celdas de combustible microbianas (Pineda 2016).

$$P = P / a$$

**Ecuación N°6.** Densidad de potencia

Donde:

**P\*** = Densidad de potencia (W/m<sup>2</sup>) o (mw/m<sup>2</sup>)

**P** = Potencia (W) o (Mw/m<sup>2</sup>)

**a** = Área del electrodo (cm<sup>2</sup>) o (m<sup>2</sup>)

### 6.6.3. Densidad de corriente

Hace referencia a la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de los electrodos de las celdas de combustible microbianas (Pineda 2016).

$$j = I / a$$

**Ecuación N°7.** Densidad de corriente

Donde:

**j** = Densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>) o (mA/m<sup>2</sup>)

**i** = Intensidad de corriente (A) o (mA)

**a** = Área del electrodo (cm<sup>2</sup>) o (m<sup>2</sup>)

### 6.6.4. Densidad volumétrica

Por lo general indica la producción de energía relacionada con el volumen total a tratar en la celda de combustible microbiana (Medina 2017).

$$P_v = P / V$$

**Ecuación N°8.** Densidad volumétrica

Donde:

**PV** = Potencia volumétrica (mw/m<sup>3</sup>)

**P** = Potencia (W) o (mw)

**V** = Volumen total de las celdas en metros cúbicos (m<sup>3</sup>)

#### **6.6.5. Biogás**

El potencial para generar gas metano a partir de la transformación de las heces bovinas y aguas residuales, se determina teóricamente mediante la cantidad total de biomasa que es utilizada, esta cantidad de residuos utilizados está relacionada directamente con la cantidad de biogás que es posible generar, ya que es determinada mediante gasificación de los sólidos por medio de calor desde un estado seco, denominado sólidos volátiles (Aguilera, 2016).

## **7. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo de la presente investigación a continuación se describe detalladamente el lugar en el cual se realizaron los experimentos, la recolección de aguas residuales domésticas y residuos, los materiales, equipos y procedimientos implementados en el transcurso de la misma.

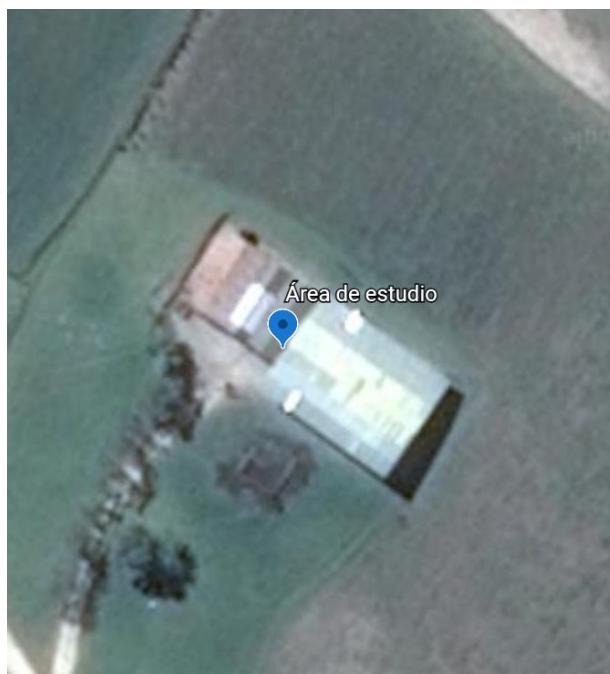
### **7.1. Selección de la vivienda**

Para la aplicación de las encuestas, se tuvo en cuenta una muestra totalmente al azar de 24 personas entre la vía que comunica la ciudad de Tunja con el municipio de Chivatá. Se estableció dicha cantidad a criterio de los investigadores. Por otra parte, para seleccionar las viviendas donde se aplicarían las encuestas se consideró principalmente la colaboración de las personas. Con base en ello fueron aplicadas 12 encuestas. Las otras 12 viviendas no presentaron disponibilidad para realizar la encuesta debido a la emergencia sanitaria presente en el país, en el momento de realización de las mismas, para la fecha del 23 de julio.

De igual manera para la selección de la vivienda en la que se aplicaría el estudio, se basó en un muestreo no probabilístico, es decir; un muestreo por conveniencia. Este se basó en la facilidad de acceso que se tuvo con los individuos; La practicidad para la recolección de las aguas residuales domésticas en los tanques sépticos como se observa en la ilustración 4; así como, la disponibilidad y el apoyo por parte de los individuos para participar en la investigación de manera indirecta. Además de tener en cuenta factores importantes como el número de habitantes promedio en una vivienda rural y la separación de las aguas grises y negras (Ver Anexo. 1).

### **7.2.Descripción del área de estudio**

La vivienda seleccionada que se observa en la ilustración 3. Está compuesta por 3 habitantes, se encuentra ubicada en el municipio de Socará, la vereda denominada La Escuela y el sector Puente Hamaca. Según Google Earth, en las coordenadas 5°31'46.3"N 73°18'14.3"W, a una altitud aproximada de 2.919 msnm.



**Ilustración 3.** Localización de la vivienda rural # 6 objeto de estudio.

**Fuente:** Google Earth.

### 7.2.1. Selección del tipo de residuos de la zona rural

Con respecto al funcionamiento de la celda de combustible microbiano es importante seleccionar el tipo de residuo que se implementó en la puesta en marcha de las CCMs. Para este caso en particular se eligieron los siguientes sustratos:

- **Agua residual doméstica:** El origen de estas aguas son de la vivienda rural ubicada en el municipio de Socará, las cuales se recolectaron en una caja de inspección antes de llegar al pozo séptico mediante recipientes plásticos, como se muestra en la ilustración 4.
- **Heces Bovinas:** Se seleccionó este tipo de residuo debido a que se encuentran en gran cantidad en la zona rural, y contienen altos contenidos de materia orgánica y en cuanto a la composición microbiológica, contienen gran variedad de microorganismos resaltando la *Escherichia Coli* la cual es fundamental para la generación de energía y biogás.
- **Compostaje:** Estos residuos se seleccionaron, ya que son generados con frecuencia en las viviendas, además, cuenta con altos niveles de nitrógeno y materia orgánica, los cuales son ideales para el funcionamiento de la celda. Igualmente, tienen diversos microorganismos, entre los que se resalta el género *Geobacter* por su capacidad para oxidar compuestos orgánicos y liberar electrones.



**Ilustración 4.** Recolección de aguas residuales domésticas

**Fuente:** Fotografía tomada por los autores durante el trabajo de campo.

### 7.3. Concentración de los residuos utilizados

La concentración de los residuos a utilizar es determinante para la operación ideal de la celda. Es por ello que se identificaron las mejores concentraciones a partir de la literatura. La máxima generación de gas metano fue reportada en la investigación de (Aguilera, 2016). El realizó montajes con concentraciones de heces de 2 unidades de heces por 1 de agua (2:1) y 3 unidades de heces por 1 de agua (3:1), en donde la concentración 2:1 fue la que obtuvo mayor producción de biogás. De igual manera se relaciona con diversas concentraciones de heces bovinas disueltas en agua por & Morillo (Espinal, Olvera, Hernández, 2016), donde determinaron que una relación de 1:3 es más efectiva, a comparación de una concentración 1:1, donde por una unidad de heces bovinas se agregaron 3 unidades de agua; Teniendo en cuenta lo anterior se realizaron las concentraciones más efectivas de las 2 investigaciones y se evaluaron con respecta al voltaje generado por la celda.

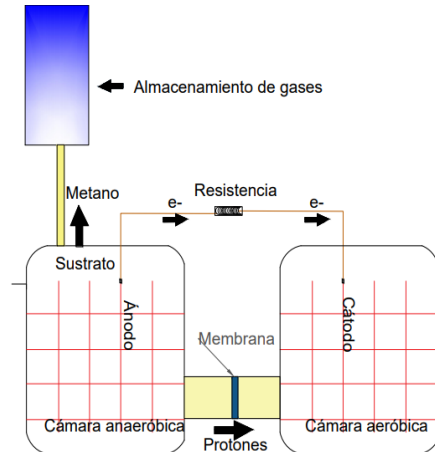
### 7.4. Potencial de generación de gas en cada residuo

- **Aguas residuales:** las plantas de tratamiento de agua residual generan en promedio el 1% de sólidos con respecto al volumen de agua que manejan, los cuales son denominados lodos residuales, la cantidad de sólidos volátiles de estos lodos residuales generados se estiman en promedio en un 60%, esto aplica para sistemas de tratamiento primario y secundario (Rojas, 2002); Teniendo en cuenta lo anterior por cada litro de AR, 10 ml son lodos residuales y 6 ml son sólidos volátiles.

- **Heces Bovinas:** La cantidad de sólidos volátiles de las Heces bovinas determinado mediante el método de gasificación por calentamiento en horno, es de un aproximado de 20 % del total de las heces (Espinal, et al., 2016).
- **Material de compostaje:** Los residuos sólidos orgánicos que son putrescibles presentan concentraciones de carbono y generan ácidos orgánicos, los cuales son utilizados por las bacterias para la fermentación. Hay una diversidad de residuos que se pueden utilizar, entre los que se encuentran frutas, verduras y carnes, entre otros, cada uno de ellos presenta diferentes cantidades de sólidos volátiles, es por ello que el potencial de generación varía con respecto a los residuos utilizados (Martínez, Oechsner, Brulé & Maraño, 2014).

### 7.5. Selección del diseño del tipo celda microbiano a escala laboratorio

Para el desarrollo de Celda de combustible microbiano se utilizó el diseño típico de una celda de doble cámara, el cual es óptimo para tratar la cantidad de residuos generados en las zonas rurales, debido a que tiene una mayor capacidad del sistema. De igual manera se reduce el contenido de cargas orgánicas, ya que se genera la separación de las aguas residuales de la vivienda en aguas negras y aguas grises, generados durante las actividades cotidianas. A continuación, se puede observar en la ilustración 5 el diseño de doble cámara que se va a implementar en el desarrollo de la investigación (Ver Anexo. 2).



**Ilustración 5.** Prototipo de celda de combustible microbiana de doble cámara

**Fuente:** Diseño adaptado por los autores.

### 7.6. Selección del tipo de material

Es importante seleccionar materiales económicos, sustentables y accesibles para la construcción de la celda de combustible microbiano, debido a que principalmente su utilización está enfocado a las zonas rurales. Igualmente, para que sea una tecnología viable de múltiples

aplicaciones, la implementación de materiales de alto costo no genera que este diseño fuera económicamente viable de implementar en las comunidades rurales.

Debido a esto los materiales a utilizar en este prototipo de CCM a escala de laboratorio son altamente comerciales en locales, y se describen a continuación:

- **Cámaras de celdas microbianas: recipientes de 1.5 Litros de volumen.**

Para este caso en particular el material a seleccionar fue determinado por sus propiedades térmicas y eléctricas, ya que según lo reportado por la bibliografía los materiales implementados en estudios a escala laboratorio, deben tener una baja conductividad eléctrica para evitar el paso a los electrones a través del material hacia el exterior, así mismo es importante seleccionar un material que tenga una baja conductividad térmica en condiciones normales (Aragón, 2018). Es por ello que la CCM se desarrolló en recipientes de plásticos, debido a que cuentan con una conductividad térmica y eléctrica baja con respecto a los demás materiales, como se evidencia en la tabla 4.

| Materiales    | Propiedades eléctricas       | Propiedades térmicas                   |                                           |
|---------------|------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
|               | Conductividad (S/m)          | Temperatura Máxima De Utilización (°C) | Conductividad Térmica a (25°C) ( W/m °K ) |
| Vidrio        | $(10^{-11} - 10^{15})^{115}$ | (500) <sup>119</sup>                   | $(0.6 - 1)^{120}$                         |
| Polycarbonato | -                            | $(115 - 120)^{121}$                    | $(0.19 - 0.22)^{122}$                     |
| Plexiglás     | -                            | $(50 - 90)^{123}$                      | $(0.17 - 0.19)^{124}$                     |
| Plásticos     | -                            | 115 – 170                              | 0.15 - 0.4                                |

**Tabla 4.** Propiedades eléctricas y térmicas de los materiales para las cámaras de las celdas de combustible microbianas

**Fuente:** Aragón (2018)

- **Membrana de intercambio protónico**

Para la selección de la membrana se debe tener en cuenta la respectiva clasificación de acuerdo a criterios de naturaleza, estructura y transporte que lleve a cabo el material seleccionado. Para el presente caso los guantes de nitrilo (Acrilonitrilo Butadieno) se clasifican de la siguiente manera (Aragón, 2018):

- ✓ Según su naturaleza: Son sintéticos formados de manera compuesta por la mezcla de polímeros.
- ✓ Según su estructura: Tienen una estructura microscópica en la cual se subclasifican de acuerdo a la porosidad como densas, debido a que son más resistentes en comparación al caucho natural y al tipo de configuración, el cual es simétrico.

- ✓ Según el transporte: Presenta un transporte de intercambio iónico, la cual tiene una subclasificación de intercambio catiónico o aniónico.

Por lo general, las membranas que se implementan en este tipo de tecnologías suelen ser poliméricas. Pero en la mayoría de las ocasiones la elección de los materiales se limita exclusivamente a criterios de accesibilidad.

- **Electrodos: Malla de alambre galvanizado.**

Es importante tener en cuenta que los electrodos son un componente fundamental para el funcionamiento de la celda de combustible microbiana, debido a que permiten llevar a cabo el transporte de los electrones del cátodo hacia el ánodo. Así pues, diversas investigaciones han estudiado los materiales convencionales entre ellos el carbono (varilla de grafito, cepillo de fibra de carbono, tela de carbono y fieltro de carbono) y la malla de alambre galvanizado ya que tiene propiedades eléctricas ideales (Aragón, 2018), razón por la cual para la presente investigación se eligió este material como electrodo, ya que supera a los demás materiales en cuanto a la conductividad eléctrica, como se muestran a continuación en la tabla 5.

| Materiales                   | Propiedades Eléctricas |
|------------------------------|------------------------|
|                              | Conductividad (S/m)    |
| Carbón - amorfo              | $1.25 - 2 \times 10^3$ |
| Carbón - grafito             | $2 - 3 \times 10^5$    |
| Carbón - diamante            | $\sim 10^{-13}$        |
| Malla de alambre galvanizado | $1.45 \times 10^6$     |

**Tabla 5.** Propiedades eléctricas de los materiales carbonosos y metálicos

**Fuente:** Aragón (2018)

Según la tabla N°5 se debe tener en cuenta la conductividad, ya que determina la capacidad que tienen los electrodos para transferir el paso de corriente eléctrica a través de la estructura de los electrodos, mejorando el desempeño de la CCM (Aragón, 2018).

- **Conductos de transporte de aguas residuales: Tubos y uniones en PVC.**

Con respecto al puente de intercambio iónico se escogió tubos de PVC de 1 ¼", 2" de diámetro, y sus uniones respectivas. El papel que cumplen estos materiales primero es separar tanto las cámaras catódicas, anódicas y el agua presente en cada una de ellas, posteriormente evitar la transferencia de electrones por parte de la cámara anódica con el fin de reaccionar en la cámara catódica como agente oxidante que influya en los procesos de los microorganismos.

- **Circuito externo: Alambre de cobre calibre 16.**

Este metal es considerado un excelente conductor de calor y principalmente de electricidad, El alambre de cobre tiene la capacidad de conducir corriente dependiendo de su calibre, el calibre

16 es un alambre de cobre que maneja bajas cantidades de corriente y voltaje, además las CCM durante su funcionamiento generan voltaje y corriente en cantidades bajas para los prototipos de laboratorio (Pineda, 2016).

- **Jeringa de succión de 20 ml**

Se seleccionó dicha jeringa para poder extraer las muestras de aguas residuales de cada una de las CCM, con el fin de transportarlas al laboratorio para determinar y analizar valores de DQO Y DBO presentes en las aguas residuales. De igual manera se escogió este material por la practicidad que tiene de acoplamiento a una manguera, la cual facilitó la toma de las muestras y permite mantener las condiciones anaerobias dentro de las cámaras Ánodo y Cátodo.

- **Sistema de almacenamiento de gases**

Se determinó que el método por volumen desplazado facilitaba la cuantificación y almacenamiento de gas en periodos cortos de tiempo, ya que se realizaban las lecturas por medio de una probeta aforada, desarrollando el monitoreo continuo y la toma de datos de forma práctica.

## **7.7. Plan de muestreo**

Es importante tener en cuenta que en la vivienda rural se realizó un plan de muestreo, donde se obtuvieron parámetros físico químicos de las aguas residuales, mediante un muestreo compuesto a fin de determinar el estado actual del sustrato a utilizar.

- **Muestreo compuesto**

El muestreo compuesto consiste en tomar diversas muestras de un mismo sustrato durante varios intervalos de tiempo, a fin de obtener concentraciones promedio. En este muestreo se analizaron las aguas residuales domésticas, clasificadas en aguas grises provenientes de cocina, lavamanos y ducha, y aguas negras provenientes del inodoro, Así mismo este muestreo se realizó en las cajas de inspección de dos baños ubicado antes de llegar a el tubo de entrada al pozo séptico y en el tubo de salida del lavaplatos de la cocina.

Para realizar el muestreo se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento (Ver Anexo. 3):

- Organizar las botellas rotuladas
- Se organizaron los materiales y equipos a utilizar.
- Se escribió con letra legible el nombre del responsable del muestreo
- Se colocó el balde bajo la descarga a fin que recibiera todo el flujo simultáneamente.

- Se repitió el procedimiento las veces necesarias para obtener la muestra compuesta en el periodo de tiempo establecido.
- Se compuso una muestra de 1 a 12 horas, según el plan de muestreo
- Una vez mezclados los volúmenes, se homogeneizó el contenido del balde por agitación mediante un tubo plástico limpio y posteriormente se llenaron los recipientes.
- Se registró el formato de campo con todas las observaciones durante el muestreo y la integración de la muestra.
- Se etiquetan las botellas antes de llenarlas
- Posteriormente se taparon cada una de las botellas
- Se cubrió el rótulo con cinta adhesiva
- La preservación de las muestras se realizó mediante una nevera de icopor y bastante hielo para mantener la temperatura a 4°C.
- El Transporte de las muestras se realizó el día siguiente hacia el laboratorio

## **7.8. Diseño y pruebas de desempeño del material**

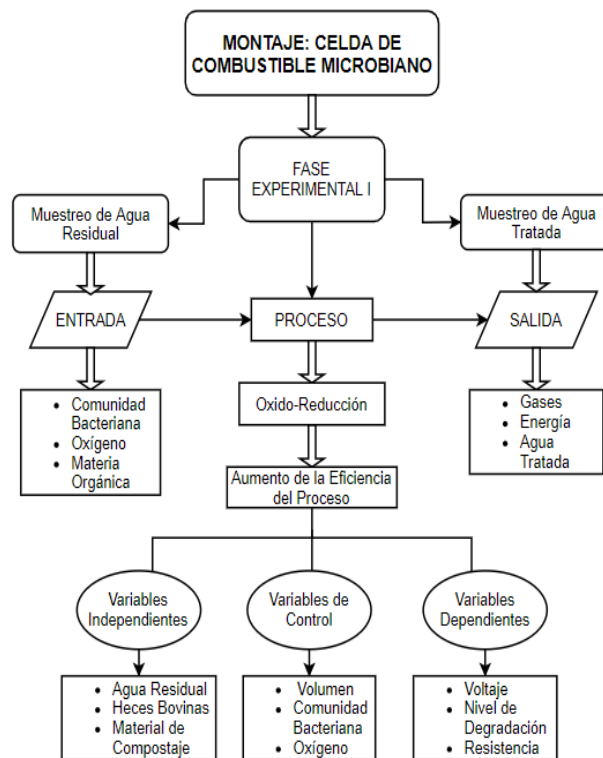
El desarrollo de las pruebas experimentales se realizó en recipientes de plásticos con especificaciones de sustrato, electrodo y membrana descritas en cada una de las fases.

## **7.9. Diseño experimental**

Se desarrollaron varios prototipos siguiendo una metodología experimental cuantitativa, la cual permitió la modificación de variables seleccionadas como independientes, con la finalidad de observar el comportamiento dentro de la celda mediante la fluctuación de las variables denominadas dependientes. Los resultados obtenidos en cada fase experimental se evaluaron, para implementar las mejores configuraciones en la siguiente fase, de esta forma en cada una de las fases se desarrolla CCM más efectivas (Ver Anexo. 4).

## FASE I

Esta primera fase de experimentos se desarrolló con un diseño pre-test y pos-test, el cual desarrolló un grupo de 3 celdas, con diferente sustrato cada una. Entre los que se encuentran: las heces bovinas, material de compostaje y aguas residuales domésticas como las variables independientes y las variables de voltaje, amperaje y resistencia denominadas como dependientes; como se muestra en la ilustración 6.



**Ilustración 6.** Desarrollo experimental fase I.

**Fuente:** Diseño elaborado por los autores.

Cada celda contiene un volumen por cámara de 1 litro de sustrato. En la Tabla N°6 se describe el contenido en la cámara catódica de las 3 celdas, con aguas residuales domésticas clasificadas como aguas grises, las cuales son provenientes de la cocina y la el baño (ducha, lavamanos), y el contenido de cada cámara anódica se realizó con una dilución de los sustratos materia de compostaje y heces bovinas en agua con una concentración de 260 g/L de cada sustrato, y 1 litro de agua residual doméstica (aguas negras), esta concentración 1:3 fue desarrollado por (Espinal, Olvera, Hernández, 2016).

| Celda de Combustible Microbiana | Subtipos de Celdas Microbianas | Ánodo               | Cátodo                   |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------|
| FASE I                          | Celda 1                        | Aguas Negras        | Agua Gris (baño, cocina) |
|                                 | Celda 2                        | Heces Bovinas       |                          |
|                                 | Celda 3                        | Material Compostaje |                          |

**Tabla 6.** Celdas de combustible microbianas fase I

**Fuente:** Diseño elaborado por los autores.

La medición de los parámetros físico-químicos realizado al momento de la toma de las muestras se denominó pre-test. Posteriormente a la puesta en marcha de las celdas con un tiempo de retención de 10 días se miden nuevamente los parámetros físico-químicos denominados pos-test. La comparación entre los valores pre-test y pos-test de estos parámetros permite evaluar la fluctuación generada y obtener un análisis del comportamiento en dichos parámetros en cada una de las celdas desarrolladas.

Los parámetros dependientes se midieron con un intervalo de 5 horas en el día, con un total de 3 tomas en parámetros como voltaje, amperaje y resistencia, estos datos se midieron durante el tiempo de retención establecido.

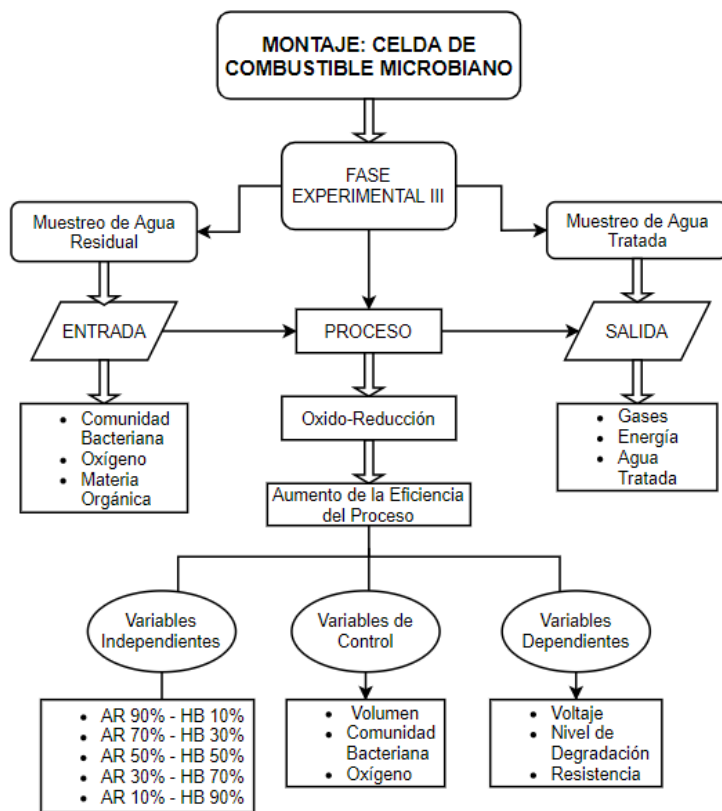
## FASE II

Esta segunda fase de experimentos se desarrolla con la misma configuración y metodología que la Fase I en cuanto a la toma de datos pre-test y pos-test, así como de las variables dependientes y manteniendo el tiempo de retención de 10 días. Pero se modificaron las concentraciones de los sustratos heces bovinas y material de compostaje en la cámara anódica, esto con la finalidad de obtener una comparación en la generación de energía entre las dos Fases, la concentración de los sustratos en esta fase es de 520 g/L. Este aumento de la concentración del sustrato se realizó con la finalidad de obtener más biogás, como lo demostró (Aguilera, 2016), y la comparación de su comportamiento con respecto a la generación del voltaje, con respecto a la fase I.

## FASE III

Teniendo en cuenta los 3 tipos de sustratos producidos en la zona rural, se hizo la comparación del rendimiento de las celdas en las fases anteriores, con la intención de unificar los mejores sustratos, dichos sustratos se distribuyen en diferentes concentraciones para cada celda, con la finalidad de que sean utilizados gradualmente para su posterior comparación, como se observa en la ilustración 7 dentro de las variables independientes, describiendo (AR) como aguas residuales negras y (HB) como heces bovinas en la cámara anódica; En las cámaras catódicas de las celdas se utilizó como sustrato el 100% de aguas grises.

En esta fase se realizó la evaluación de los parámetros físico-químicos denominados pre-test y pos-test, y se mantienen las variables experimentales de control y dependientes, así como el área de los electrodos utilizados en las celdas y el área de la membrana, de igual manera se dejaron los electrodos a las misma mismas distancias entre cámaras; De igual manera, en esta fase se realiza un monitoreo constante de los parámetros dependientes establecidos en la ilustración 7.

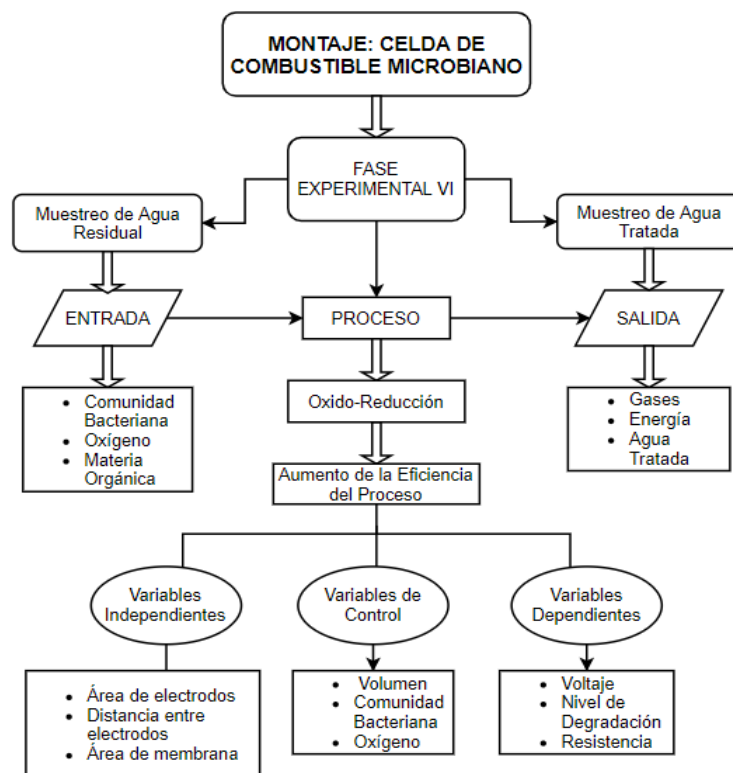


**Ilustración 7.** Desarrollo experimental fase III.

**Fuente:** Diseño elaborado por los autores.

#### FASE IV

Siguiendo la metodología cuantitativa de experimentación, esta fase de la experimentación se enfocó en el diseño de las celdas de combustible microbiano teniendo en cuenta nuevas variables independientes las cuales se encuentran ilustradas en la ilustración 8, Esto con el fin de determinar cómo se relacionan estas variables con el resultado obtenido al medir las variables dependientes, de igual manera su efecto en los parámetros fisicoquímicos mediante las mediciones de pre-test y pos-test. En esta fase se utiliza como sustrato la combinación con mejor resultado en la generación de voltaje de la fase III,



**Ilustración 8.** Desarrollo experimental fase IV.

**Fuente:** Diseño elaborado por los autores.

Las variables independientes se van a modificar teniendo en cuenta la Tabla N°7, en la cual se describe las variaciones que se realizan en cada una de las celdas, partiendo de una celda base la cual se ha utilizado en las fases anteriores, esto con la finalidad de tener un punto de referencia ante los demás montajes, con respecto a la eficiencia en los variables dependientes como la generación de energía y la reducción en los parámetros físico químicos.

| Celda de Combustible Microbiana | Subtipos de Celdas Microbianas | Área de Electrodo | Área de Membrana | Distancia entre Electrodo |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|
| FASE IV                         | Celda 1                        | 0,028333          | 0,01405          | 0,025                     |
|                                 | Celda 2                        | 0,01419           | 0,0208           | 0,025                     |
|                                 | Celda 3                        | 0,01419           | 0,01405          | 0,5                       |
|                                 | Celda Base                     | 0,01419           | 0,01405          | 0,025                     |

**Tabla 7.** Configuraciones físicas de las CCMs de la fase IV.

**Fuente:** Diseño elaborado por los autores.

Esta fase da como resultado el sustrato y el diseño de la celda a utilizar en la siguiente fase, ya que la modificación y comparación de los tipos de sustratos, sus concentraciones y la mezcla de las mismas, así como las dimensiones en los elementos de los prototipos de las celdas, nos permite identificar cuáles de estas características son más efectivas en la generación de energía y en la reducción de los parámetros fisicoquímicos.

## FASE V

En esta fase se diseñó una celda a escala banco, teniendo en cuenta las características más eficientes que se ejecutaron en las fases anteriores recolectadas en la Tabla N°8, el prototipo de banco se desarrolla con un volumen de 3 litros por cámara, esto con la intención de obtener un resultado comparativo entre los efectos de los volúmenes en las celdas en la generación de energía.

| Celda de Combustible Microbiana | Subtipos de Celdas Microbianas | Área de Electrodo (m <sup>2</sup> ) | Área de Membrana (m <sup>2</sup> ) | Distancia entre Electroodos (m) | Sustrato Ánodo                              | Sustrato Cátodo                      | Volumen (litros) |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| FASE V                          | CCM-B                          | 0,01419                             | 0,01405                            | 0,025                           | Aguas residuales domésticas y heces bovinas | Aguas residuales domésticas (grises) | 3                |

**Tabla 8.** Configuraciones físicas de la CCM de la fase V.

**Fuente:** Diseño elaborado por los autores.

## Medición de la generación de gas

la captación del biogás producido por la CCM se realizó en las dos últimas fases, debido a que presenta las condiciones más óptimas, en ellas se realizó un montaje que utiliza la metodología de volumen desplazado, para realizar la medición de la generación de gas dentro en la cámara anódica de la CCM a escala laboratorio, para ello se utilizó un recipiente plástico de tapa hermética con un volumen de 300 ml, el cual está conectado por medio de una manguera que transporta el gas generado y desplaza el líquido hacia la probeta por medio de una aguja, la probeta que se utilizó tiene un volumen de 100 ml; Las mediciones se realizaron con intervalos de tiempo de 8 horas. Para la CCM a escala de banco se utilizó la misma metodología con un recipiente de 1000 ml de volumen.

### **7.9.1 Equipos empleados en las celdas de combustibles microbianas**

#### **Multímetro**

Se implementó este instrumento con la finalidad de obtener mediciones de voltaje discontinua, resistencias externas y corrientes. Para llevar a cabo las mediciones se implementó un multímetro digital DT830B, que ayuda a medir voltaje AC Y DC, corriente DC, resistencia  $\Omega$ .

#### **Fotómetro HI83399**

Mediante este aparato implementado en la medición de parámetros relacionados a la calidad del agua y de las aguas residuales, se logró identificar el DQO de las aguas residuales domésticas y se determinó que este valor se encuentra en un rango alto.

#### **DBO DB 600 Lovibond**

Por medio del aparato se determinó la DBO<sub>5</sub> presente en las concentraciones de aguas residuales domésticas y heces bovinas. Además de estableció los porcentajes de remoción de este parámetro de acuerdo los resultados obtenidos a los 5 días, con el fin de identificar si el tratamiento fue apto implementado las CCM en las fases establecidas.

#### **Multiparámetro HI 9829**

Este instrumento fue ideal para la toma de parámetros fisicoquímicos como pH, % OD, potencial redox, conductividad y temperatura presentes en las aguas residuales, heces bovinas y compostaje. Además de servir como herramienta de seguimiento y control para determinar los cambios químicos que presentaron los parámetros anteriormente mencionados después del tiempo de operación.

## 8. ANALISIS Y RESULTADOS

### 8.1 CAPÍTULO I

#### 8.1.1. CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Mediante el muestreo compuesto realizado en la vivienda rural promedio seleccionada, se caracterizó de manera fisicoquímica las aguas residuales, de acuerdo con el planteamiento de la metodología en el numeral 7.7. A continuación, se detalla en la tabla 9 los resultados obtenidos:

| Parámetros                                  | Aguas residuales domésticas | Aguas grises de cocina | Aguas grises de baño (ducha) |
|---------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------------|
| pH                                          | 8,41                        | 9,25                   | 6,5                          |
| T °C                                        | 21,2                        | 33,8                   | 29,2                         |
| %OD                                         | 37,8                        | 40,5                   | 36,9                         |
| ORP                                         | 147,2                       | 60,5                   | 235                          |
| Conductividad ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) | 1774                        | 318                    | 290                          |
| Sólidos Sedimentables (mg/L)                | 0,5                         | 0,7                    | 0,3                          |

**Tabla 9.** Caracterización fisicoquímica las aguas residuales domésticas

**Fuente:** Elaborada por los autores.

Las aguas residuales domésticas generadas por las viviendas rurales presentan algunos parámetros que se compararon con la resolución 631 del 2015 (Ver Anexo. 5), en esta comparación se presentan el cumplimiento de la mayoría de los parámetros e incumplimientos de unos pocos, por ejemplo: según el (Ver Anexo) la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales pre-test, el valor del pH que se obtuvo en las aguas grises sobrepasa el límite permisible por dicha Resolución, sin embargo, posterior al tratamiento por la CCM este valor se neutraliza cumpliendo en dicha normativa.

De igual manera el análisis de la Demanda Química de Oxígeno, se obtuvieron valores superiores a 1500 mg/L, debido a que superó el rango medio de medición, esta variable supera el límite permisible y se identifica como una variable primordial en la evaluación del sistema de tratamiento para cumplir con lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los residuos generados por la actividad ganadera se caracterizaron antes y después de la fase IV como se evidencia (Ver Anexo), en el cual se utilizó un sustrato combinado tanto de heces bovinas como de aguas residuales manejados por las CCM, esta caracterización se comparó con la Resolución 631 del 2015 en el (Ver Anexo 6), en donde se evidencia el cumplimiento del pH y de la demanda biológica de oxígeno posterior al tratamiento, con valor de 155 mg/L de DBO<sub>5</sub> en la cámara anódica como se muestra en el numeral 9.5.2., la cual está por debajo de la resolución, que tiene como límite permisible 450 mg/L.

## 8.2 CAPÍTULO II

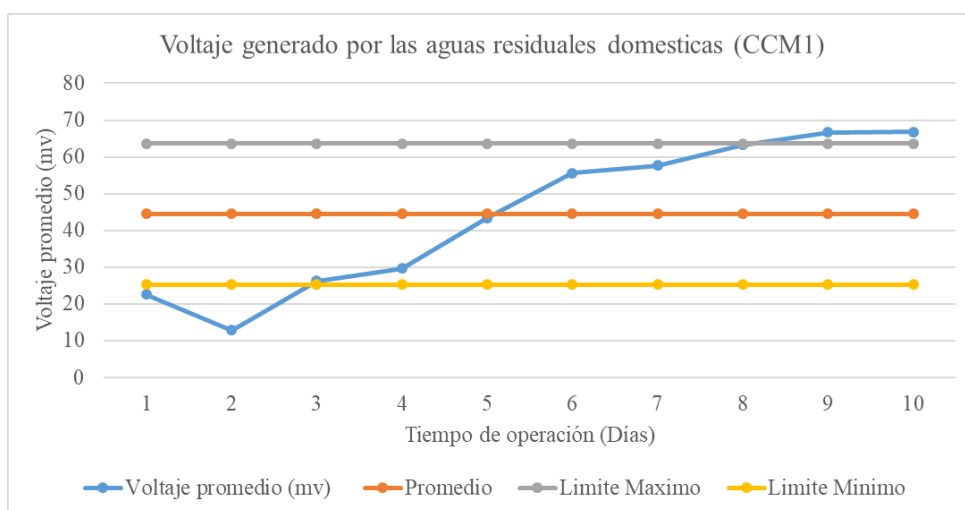
### 8.2.1. CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA A ESCALA LABORATORIO

#### 8.2.2. Fase I: Ensayo preliminar

Los ensayos preliminares de la fase I y II se realizan con el fin de observar, analizar y determinar el comportamiento sustratos teniendo en cuenta un tiempo de operación de 10 días y la obtención del parámetro de medición como es el voltaje. Para posteriormente implementarlos en las fases III, IV y V.

##### Aguas Residuales Domésticas

Se realizó un experimento con una duración de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y aguas residuales domesticas en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 7):



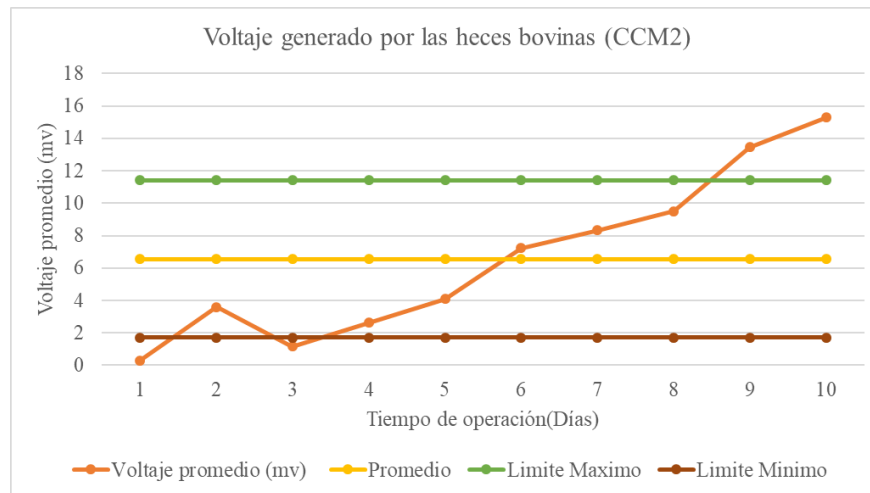
**Ilustración 9.** Voltajes generados por las aguas residuales domésticas

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 9, se puede observar que entre los días 3 y 8 el voltaje presento una variación entre los valores de 25.31 y 63.62 mV. así mismo se muestra que para el día 5 el valor de voltaje supera el promedio de los 44.46 mV lo cual evidencia una tendencia creciente al final de los 10 días. De lo que se concluye que las cantidades utilizadas en esta fase de 1L de aguas grises (en la cámara catódica) y 1L de aguas residuales domesticas (en la cámara anódica) generan voltajes mayores a los reportados por la literatura entre los 0.3 y 0.7mV (Aragón, 2018).

## Heces bovinas

Se realizó un experimento durante un tiempo de 10 días, implementado sustratos de aguas grises en la cámara catódica y heces bovinas en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 7):



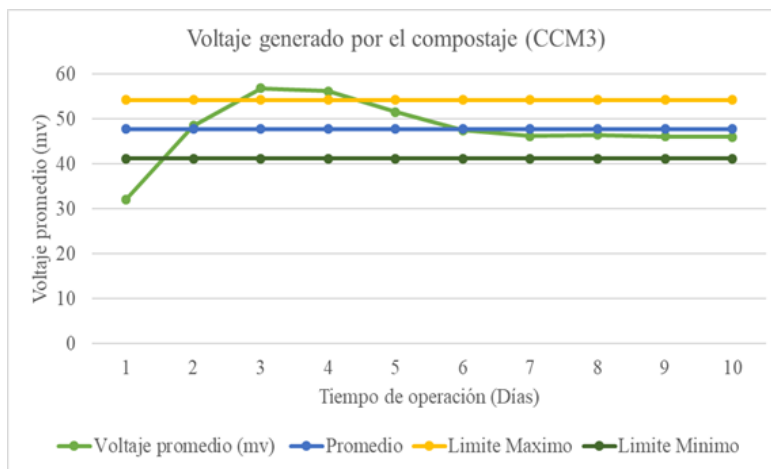
**Ilustración 10.** Voltajes generados por las heces bovinas.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 10, se puede observar que entre los días 2 y 8 el voltaje presento una variación baja alrededor de los valores de 1.72 y 11.14 mV. así mismo se muestra que para el día 6 el valor de voltaje supera el promedio de los 6.56 mV lo cual evidencia una tendencia creciente al final de los 10 días. De lo que se concluye que las cantidades utilizadas en esta fase de 1L de aguas grises (en la cámara catódica) y 0.26 gr/L de heces bovinas (en la cámara anódica) generan voltajes mayores a los reportados por la literatura entre los 0.3 y 0.7 mV (Aragón, 2018). Del mismo modo la formación de una biopelícula permite mejorar la producción de energía (Salazar, 2016), ya que esta celda obtuvo menores voltajes con respecto a las CCM1. De igual manera esto fue un indicador para las siguientes fases.

## Compostaje

Se realizó un experimento durante un tiempo de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y compostaje como sustrato en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 7):



**Ilustración 11.** Voltaje generado por el compostaje

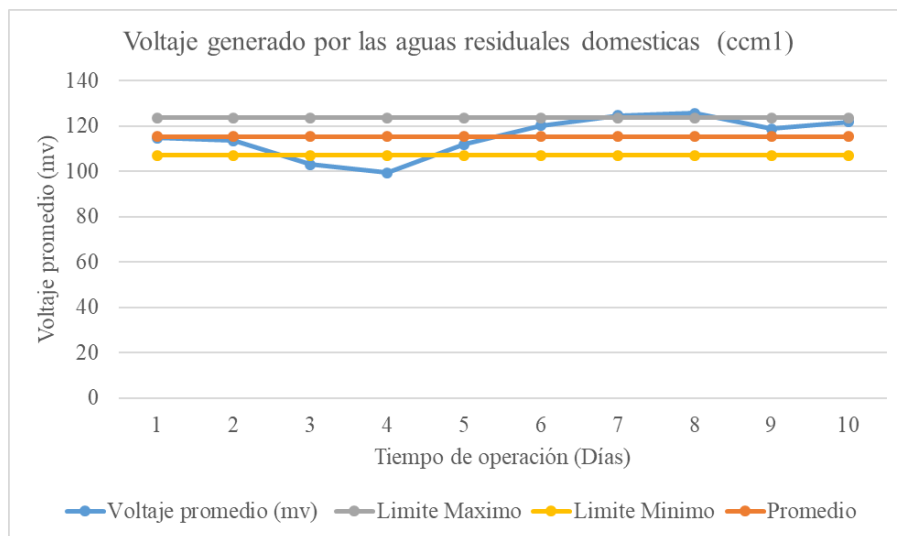
**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 11, se puede observar que entre los días 2 y 7 el voltaje (mV) presento una variación baja alrededor de los valores de 41.26 y 54.30. Particularmente el día 6 el valor de voltaje estuvo por debajo del promedio de los 47.77 mV lo cual evidencia una variación cercana al promedio y una tendencia constante hasta el día 10. De lo que se concluye que las cantidades utilizadas en esta fase de 1L de aguas grises (en la cámara catódica) y 0.26 gr/L de compostaje (en la cámara anódica) generan voltajes menores y adecuados a los encontrados en la literatura, además presentan un comportamiento similar al crecimiento bacteriano, con respecto a la producción de energía en la celda, el comportamiento que presento es un incremento rápido en el voltaje alrededor de los 400 mV para posteriormente disminuir, como se observa en la gráfica a causa de la degradación de materia orgánica de manera gradual (Nacional, 2010). De igual manera esto fue un indicador para las siguientes fases.

### 8.2.3. Fase II: Ensayo preliminar N°2

#### Aguas Residuales Domésticas

El desarrollo del experimento se realizó durante un tiempo de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y aguas residuales domesticas como sustrato en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 8):



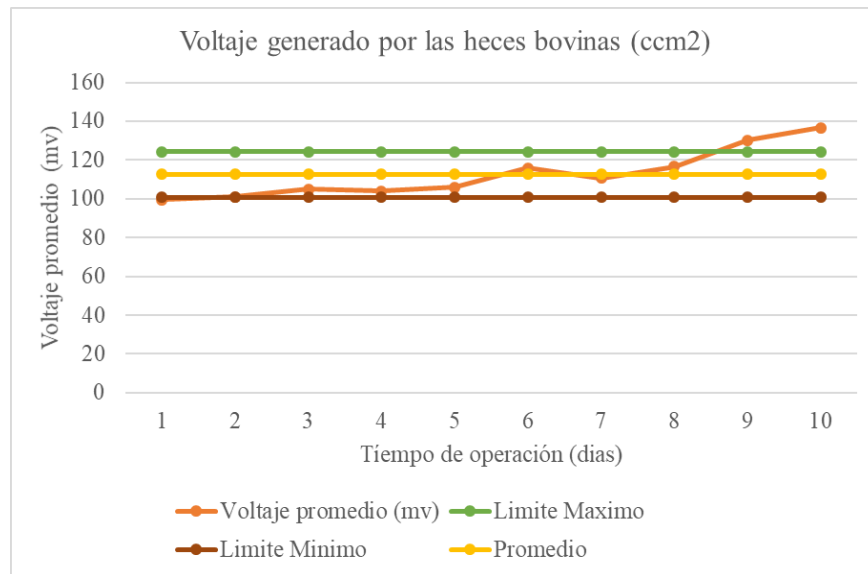
**Ilustración 12.** Voltaje generado por las aguas residuales domesticas

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 12, se puede observar que entre los días 2 y 9 el voltaje (mV) presento una variación baja alrededor de los valores de 107.07 y 123.77. pero tuvo una tendencia variada la cual se muestra entre los días 4 y 6 con un comportamiento creciente, posteriormente los días 7 y 8 presenta valores de voltaje constantes y finalmente los días 9 y 10 decrecen estos valores. De lo que se concluye que las cantidades utilizadas en esta fase de 1L de aguas grises (en la cámara catódica) y 1L de aguas residuales domesticas (en la cámara anódica) corresponden a las mismas tanto en la fase I y II, la diferencia en la generación puede deberse a la diferencia en la microflora bacterias presentes en las aguas residuales, que contribuyeron a generar mayores voltajes con respecto a la fase I y cercanos a los encontrados en la literatura de otros montajes similares, los cuales están entre los 80 y 170 mV (Álzate, 2008). De igual manera esto fue un indicador para las siguientes fases.

## Heces bovinas

Se realizó el experimento durante un tiempo de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y heces bovinas como sustrato en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 8):



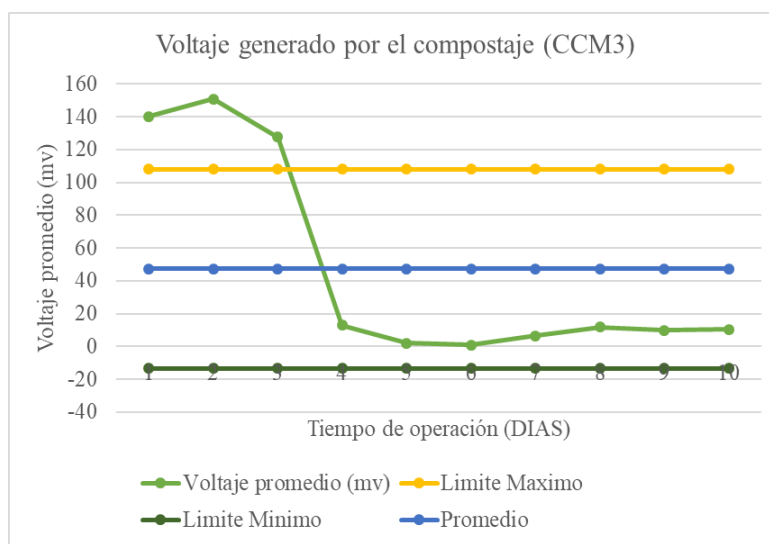
**Ilustración 13.** Voltaje generado por las heces bovinas

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 13, se puede observar que entre los días 2 y 8 el voltaje (mV) presenta una variación baja alrededor de los valores de 100.72 y 124.35. Al igual con la fase I el valor de voltaje para el día 6 superó el promedio lo que evidencia una tendencia creciente al final de los 10 días. De lo que se concluye que las cantidades utilizadas en esta fase de 1L de aguas grises (en la cámara catódica) y 0.54 gr/L de heces bovinas (en la cámara anódica) generan mayores cantidades de voltaje con respecto a la fase I, debido al efecto que tiene la concentración del sustrato y la velocidad de transporte en función de los sistemas biológicos (Nacional, 2010). De igual manera fue un indicador importante para las posteriores fases.

## Compostaje

Se realizó un experimento de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y compostaje como sustrato en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 8):



**Ilustración 14.** Voltaje generado por el compostaje.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 14, se puede observar que entre los días 1 y 8 el voltaje (mV) presento una variación alta alrededor de los valores de -13.40 y 108.01. así mismo se muestra una tendencia decreciente al final de los 10 días. De lo que se concluye que las cantidades utilizadas en esta fase de 1L de aguas grises (en la cámara catódica) y 0.52 gr/L de compostaje (en la cámara anódica) presenta fluctuaciones muy variadas con respecto a la generación de voltaje. Pero es de aclarar que esta CCM3 tiene un funcionamiento correcto ya que según la literatura las celdas de combustible microbianas generan voltajes al máximo entre los 0,3 y 0,7 mV independientemente de la configuración del circuito.

Se debe resaltar que este tipo de tecnologías se les forma una biopelícula en los electrodos la cual puede afectar el rendimiento y funcionamiento de la celda ya que existe gran variedad de microorganismos que se almacenan en los electrodos inhibiendo la generación de energía (Aragón, 2018).

### **8.3. Comparación de parámetros fisicoquímicos en el cátodo-ánodo antes y después del tiempo de operación: Fase I – Fase II**

En la fase I, la CCM con aguas residuales presentó un mejor comportamiento en la generación de energía, esto se debe al aumento del potencial de óxido reducción, que presenta la cámara anódica, ya que indica que la cámara presenta un proceso de oxidación y por ende libera electrones en el sustrato, que son captados por los electrodos para transportarlos a la cámara catódica; En la cámara anódica se obtuvieron valores negativos del potencial de óxido reducción, lo cual indica que se estaba generando una aceptación de electrones, mediante el proceso de reducción del medio (Myers M., Leland M., Robert O. 2006), este comportamiento se ve reflejado en la generación de voltaje el cual tiene un valor máximo de 66,8 mV. La cámara anódica se encontraba en el proceso de transición hacia un ambiente anaerobio, ya que el porcentaje de oxígeno disuelto se redujo en un 28,3% llegando a valores de 12,2% después del tiempo de operación.

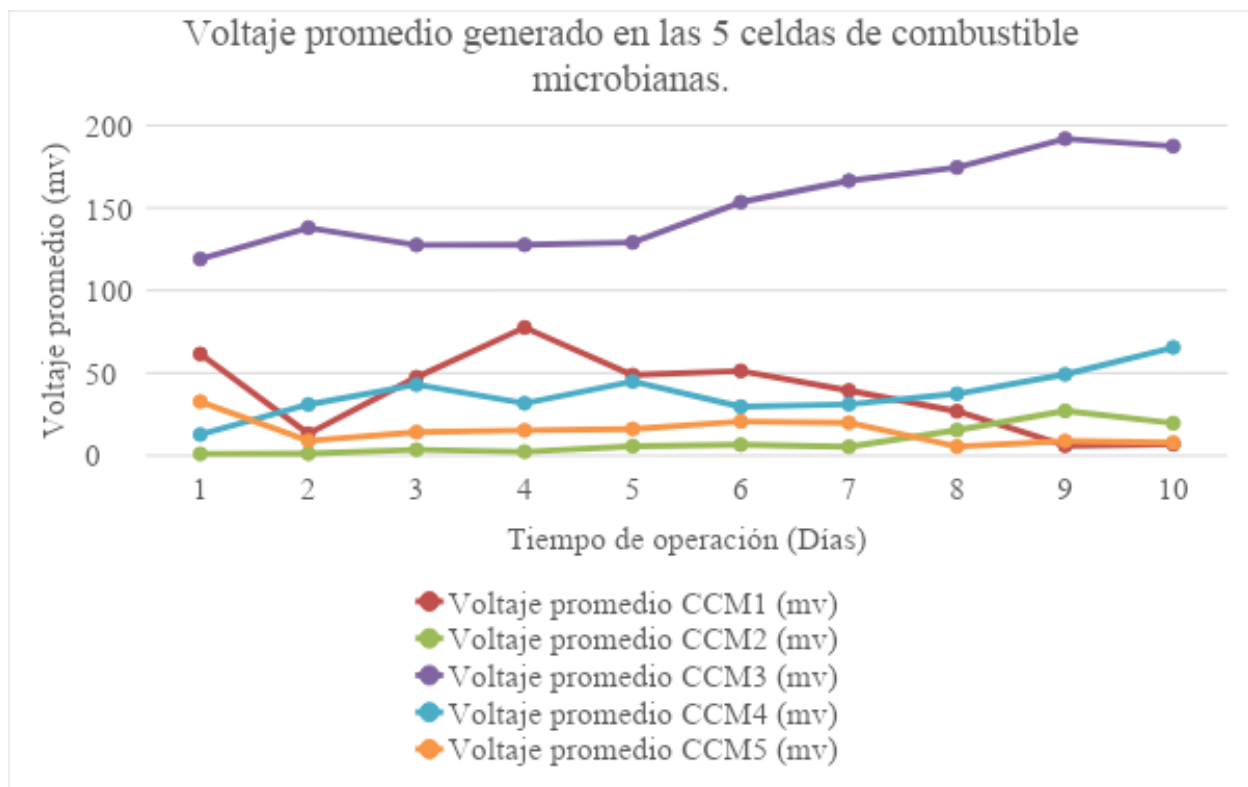
Las CCMs con sustratos de heces bovinas y material de compostaje tuvieron un rendimiento menor en la generación de energía, esto se debe a que las dos cámaras ánodo y cátodo presentaban procesos de reducción, lo cual reducía el transporte de electrones entre las cámaras (Ver Anexo 9).

En la fase II, las 3 celdas desarrolladas presentan un proceso de reducción en las dos cámaras ánodo y cátodo, pero el mejor comportamiento en cuanto a la generación de energía fue de la CCM con sustrato de heces bovinas, ya que su potencial de óxido reducción en la cámara anódica fue el más cercano a 0 con un valor de -2.7, a comparación de la CCM con sustrato de material de compostaje la cual presentaba un valor de -122.2 de ORP, además la conductividad del sustrato de material de compostaje, obtuvo el valor más elevado a comparación de las demás celdas, lo cual genera que los electrones libres dentro del sustrato tengan menor resistencia en su movilidad, generando que la disponibilidad de los mismos a diversos aceptores de electrones como el oxígeno (López, 2014).

#### 8.4. Fase III: Combinación de sustratos seleccionados de acuerdo a los ensayos preliminares

Al identificar previamente en la fase I y II los mejores sustratos con respecto a la generación de voltaje, se seleccionaron las aguas residuales domésticas y las heces bovinas con el fin de implementar diferentes concentraciones de estos sustratos en la cámara anódica y así determinar la concentración más óptima con respecto a la generación de voltaje.

Se realizó un experimento de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y concentraciones de aguas residuales domésticas y heces bovinas en la cámara anódica. Se obtuvieron los siguientes resultados:



**Ilustración 15.** Voltajes promedios de acuerdo a las combinaciones de sustratos en las celdas de combustibles microbianas.

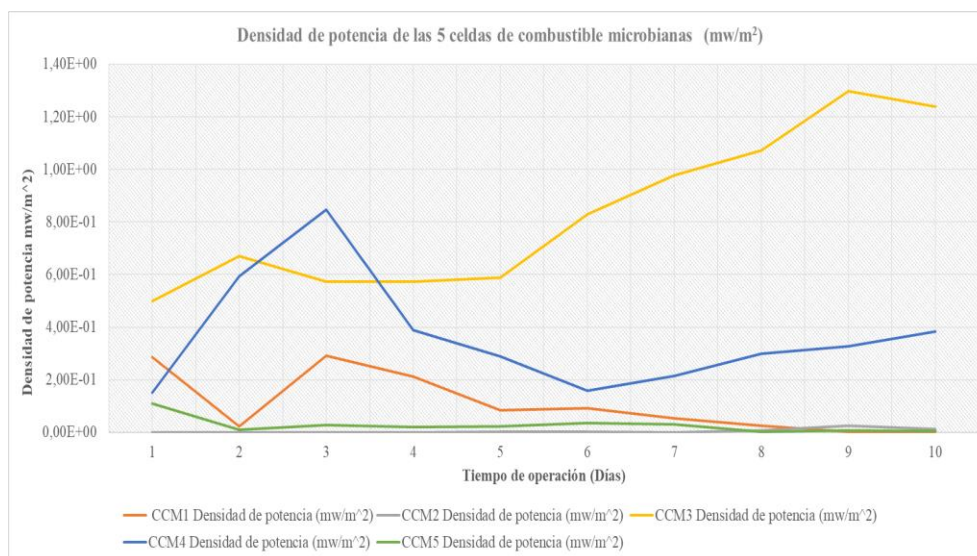
**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

Se puede observar con respecto a la ilustración 15, que la CCM3 que contiene 50% de aguas residuales domésticas y 50% heces bovinas generó el voltaje máximo con 191.9 mV, mientras que la CCM2 la cual tenía 70% de aguas residuales domésticas y 30% de heces bovinas produjo un menor valor de voltaje en comparación a las otras celdas. El comportamiento del voltaje en este tipo de tecnologías se encuentra relacionado con el crecimiento bacteriano, es decir; la presencia de microorganismos presentes en la colonización del electrodo (Aragón, 2018).

La curva de crecimiento bacteriano se puede evidenciar en cada una de las celdas de combustible microbianas a través de su comportamiento en el tiempo. Para el caso de las CCM2 y CCM4 se identificó claramente las fases de aclimatación. Caso contrario a las CCM1, CCM3 y CCM5 las cuales no presentan esta fase. De igual manera las distintas combinaciones de sustratos en cada una de las celdas de combustible microbianas se pueden identificar que la CCM2 requiere un tiempo de aclimatación largo con respecto a las otras celdas. A mayor tiempo de operación se espera un mayor rendimiento por parte de la CCM3 la cual finalizó con una fase estacionaria y la CCM4 con una fase exponencial (Prediqué, 2008). y finalmente se estableció que cada celda de combustible microbiano presenta diferentes periodos de 24h, 120h, 144h y 168 h para dar inicio a la fase exponencial.

#### 8.4.1. Densidad de potencia

El desempeño de la CCM3 se evaluó teniendo en cuenta las mediciones de voltaje a lo largo de tiempo. Pero además existen otros parámetros como la densidad de potencia, la cual permite evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de tecnologías, ya que expresa la potencia generada por unidad del electrodo. Se obtuvieron los siguientes resultados:



**Ilustración 16.** Densidad de potencia relacionada a la combinación de sustratos.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 16, se puede observar el comportamiento de las densidades de potencia que se obtuvieron en las distintas celdas en la fase III implementado un área de electrodo de  $0.01419 \text{ m}^2$ , durante el tiempo de operación de 10 días. Se implementó diferentes concentraciones de sustratos en el sistema, y la mejor eficiencia se obtuvo en la CCM3, la cual tenía una concentración de 50% aguas residuales domésticas y 50% heces bovinas. El valor máximo obtenido fue de  $1.30 \text{ (MW/m}^2\text{)}$  al 9 día de operación con un voltaje de 191,9 mV.

Esto se da a través de la cantidad de materia orgánica presente los sustratos y de igual modo se relacionada con las reacciones que ocurren de óxido – reducción en las superficies del electrodo. De igual manera este valor de densidad de potencia obtenido se encuentra entre los valores de 0.1 MW/m<sup>2</sup> a 4.3 MW/m<sup>2</sup> reportados por la literatura, debido a que en los último 10 años se han logrado avances que han permitido incrementar en diferentes órdenes de magnitud este parámetro con respecto a las CCMs (Dolly M. Revelo, 2013).

Por otra parte, se debe tener en cuenta que la presencia de bacterias metanogénicas generan una escasa transferencia de oxígeno a la cámara anódica causando la proliferación de estas bacterias y tiene diferentes concentraciones la síntesis biológica del metano ocasiona una reducción de la densidad de potencia producida especialmente en las CCM1, CCM2 y CCM5.

#### **8.4.2. Muestra del calculo**

Se realizó la muestra del cálculo con respecto al parámetro de densidad de potencia en la producción de energía relacionado a la CCM3 de la fase III, se determinó en el apartado 8.4.1. con un área de electrodos de 0.01419 m<sup>2</sup> y en el 8.5.1. con un área de electrodos de 0.02833 m<sup>2</sup>.

##### **Potencia (P)**

$$P = V * I$$

$$P = (191.9 \text{ mv}) * (0.000096 \text{ mA}) = 0.00184 \text{ MW}$$

##### **Densidad de potencia (DP)**

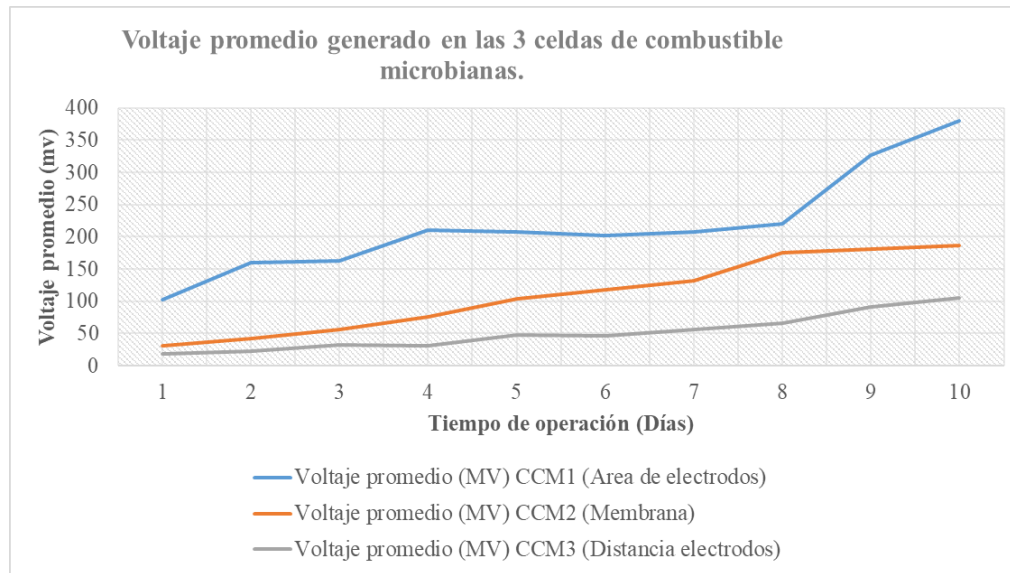
$$P = P/a$$

$$DP = (0.00184 \text{ MW}) / (0.01419 \text{ m}^2) = 0.130 \text{ MW/m}^2$$

#### **8.5. Fase IV: Configuraciones del diseño en las celdas de combustible microbianas teniendo en cuenta la mejor combinación de sustratos**

Por medio de la fase III se identificó la mejor concentración de sustratos teniendo en cuenta la generación de voltaje y densidad de potencia. Es por esto que para la fase IV se implementó esta concentración de 50% aguas residuales domésticas y 50% de heces bovinas en todas las celdas a desarrollar, para evaluar el diseño de las CCMs, por medio de variación del aumento del área de los electrodos, el área de la membrana y la distancia de los electrodos durante el tiempo de operación. A fin de identificar el diseño adecuado para obtener mayores voltajes y densidad de potencia.

En esta fase se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 11):



**Ilustración 17.** Voltajes promedio de acuerdo a las configuraciones físicas en las celdas de combustible microbianas.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

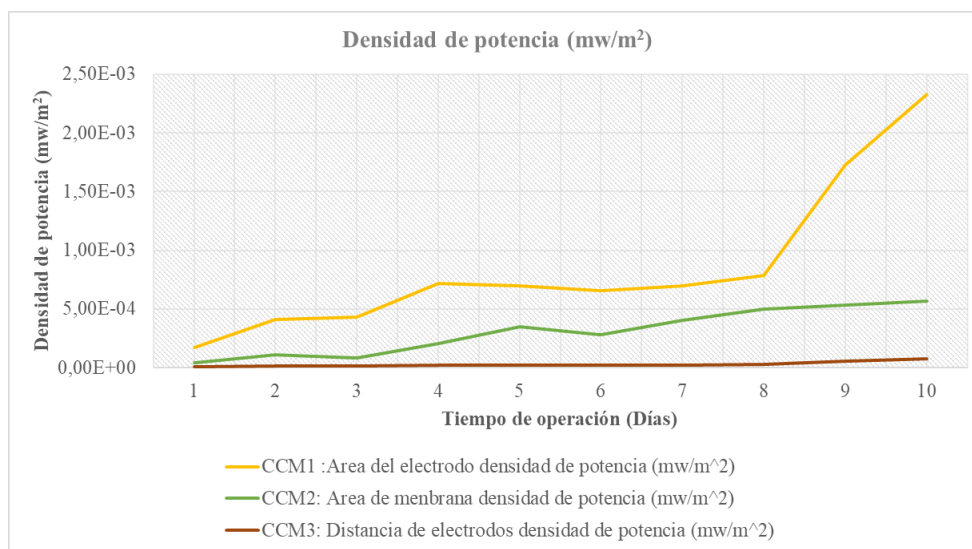
En la ilustración 17, se puede observar que al aumentar la distancia de los electrodos de 0.025 a 0.05 m, influye de manera negativa en la generación de energía, debido a que la asimilación de electrones en la cámara anódica presenta mayor resistencia, reduciendo su transferencia entre las cámaras (Buitrón, 2011). De acuerdo a esto se explica el desempeño de la CCM3 a lo largo del tiempo de operación obteniendo un voltaje menor a 105.1 mV en comparación a la CCM1 de la fase III con una distancia entre electrodos de 0.025m y un voltaje mayor de 191.9 mv.

Con respecto a la CCM2 un aumento del área de la membrana a 0.0208 m<sup>2</sup> permite que se genere un mayor paso de protones al cátodo a través del ánodo, lo cual se evidencia en la ilustración 17 al obtener valores de voltaje de 186.8 mV, comparado con la CCM3 de la fase III con un área de membrana de 0.01405 m<sup>2</sup>, de acuerdo al comportamiento de las gráficas se pronostica que un mayor tiempo de operación, obtengan mejores resultados relacionados a la generación de energía (Ana Del Pilar Pineda Marín, 2016)

De igual manera en la CCM1 al aumentar el área de los electrodos 0.01419 a 0.02833 m<sup>2</sup>, se obtiene un reacción positiva en cuanto al flujo de electrones, ya que este tipo de material presenta características conductoras aceptables, y por ende la generación de energía obtiene resultados más eficientes con respecto a las demás celdas, como se observar en la ilustración 17 el desempeño de esta CCM obtiene un valor máximo de voltaje de 379,5 mv a comparación a los 191,9 generados por la CCM3 de la fase III con un área de 0.01419 m<sup>2</sup>. Otras de las mejorías es el incremento de las bacterias electrogénicas y la disminución de bacterias que no son generadoras de electricidad (Néstor Ariel Algecira Enciso, 2016).

### 8.5.1. Densidad de potencia

El desempeño de la CCM3 se evaluó teniendo en cuenta las mediciones de voltaje a lo largo de tiempo. Pero además existen otros parámetros como la densidad de potencia la cual permite evaluar el comportamiento eléctrico de este tipo de tecnologías, ya que expresa la potencia generada por unidad del electrodo. Se obtuvieron los siguientes resultados:



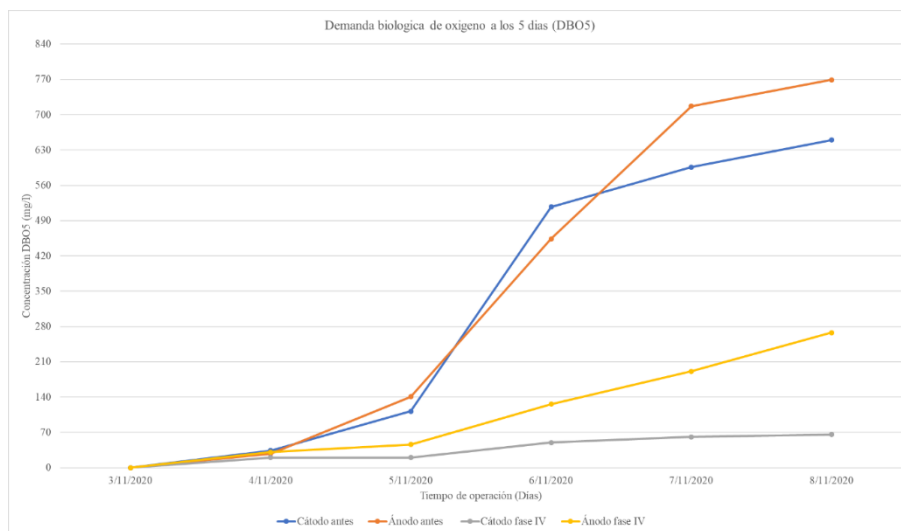
**Ilustración 18.** Densidad de potencia relacionada a las modificaciones de las CCM.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 18, se puede observar el comportamiento de las densidades de potencia que se llevaron a cabo durante el tiempo de operación de 10 días, implementando la misma concentración para todas, es decir; 50% aguas residuales domesticas – 50% heces bovinas, obteniendo la CCM1 una cantidad de energía generada por unidad de área del electrodo de  $2.33 \text{ (MW/m}^2\text{)}$ , siendo el diseño con la mayor producción de energía eléctrica con un voltaje de  $379.5 \text{ mV}$ . Este valor de densidad de potencia comparado a la literatura se encuentra entre el rango de  $0.0132 \text{ MW/m}^2$  y  $0.0000363 \text{ MW/m}^2$  (Rojas, 2017). Por otra parte, se debe principalmente a la superficie de los electrodos que es mayor comparados con la CCM2 – CCM3 por ende la cantidad de energía generada es mayor en la CCM1.

### 8.5.2. Demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Para determinar el tratamiento de las aguas residuales a través del DBO<sub>5</sub> en la fase IV, se seleccionó la mejor CCMs con respecto a la generación de energía y densidad de potencia la cual fue la CCM1 con una mayor área de electrodos y se tuvo en cuenta las concentraciones seleccionadas de la fase III, es decir; aguas grises (en la cámara catódica) y 50% de aguas residuales domésticas y 50% de heces bovinas (en la cámara anódica). Así mismo se realizó una comparación teniendo en cuenta dichas concentraciones antes y después del tratamiento y se obtuvieron los siguientes resultados:



**Ilustración 19.** Comparación del DBO<sub>5</sub> en la cámara catódica y anódica antes y después del tratamiento en la fase IV

**Fuente:** Los autores. Trabaja de campo 2020.

Según la ilustración 19, se evidencia que el DBO<sub>5</sub> obtenido del sustrato antes de haber pasado por el proceso de tratamiento de CCM, en la cámara catódica fue de 650 mg/l y en la cámara anódica de 769 mg/l, se determinó un alto grado de contaminación por parte de la combinación de aguas residuales domésticas y heces ya que contienen gran cantidad de compuestos degradables, por ende, los microorganismos requirieron de una mayor cantidad de oxígeno para descomponer la materia orgánica por medio de la oxidación bioquímica (Carranza, 2014).

### 8.5.3. Porcentaje de remoción del DBO<sub>5</sub>

Al obtener los datos de DBO<sub>5</sub> tanto del inicio y del final de proceso se procedió a el porcentaje de remoción teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$Remocion = \frac{DBO \text{ (Inicio del proceso)} - DBO \text{ (Final del proceso)}}{DBO \text{ (Inicio del proceso)}}$$

$$\%Remocion = R * 100$$

$$\text{Remoción Cátodo} = \frac{650 - 66}{650} = 0.898$$

$$\% \text{ Remoción Cátodo} = 0.898 \times 100 = 89.8$$

$$\text{Remoción Ánodo} = \frac{769 - 268}{769} = 0.651$$

$$\% \text{ Remoción Ánodo} = 0.651 \times 100 = 65.1$$

#### **Ecuación 9. Remoción DBO5 Cátodo - Ánodo**

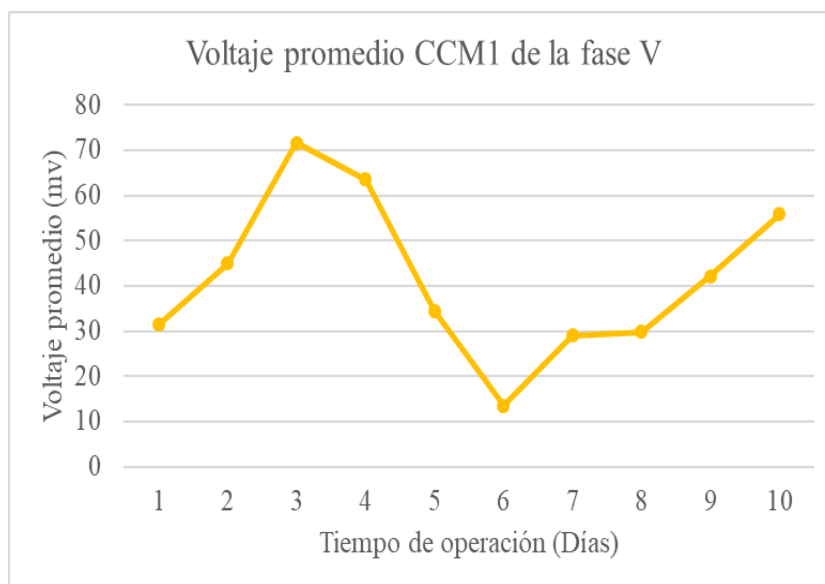
Por otra parte, en la fase IV se obtuvo los valores de DBO<sub>5</sub> después del tratamiento mediante la CCM, donde el cátodo tuvo 66 mg/l y el ánodo 268 mg/l, dando a entender que la cantidad de compuestos orgánicos biodegradables presentes en el agua residual de las dos cámaras se redujeron durante el tiempo de operación de 10 días, generando así un porcentaje de descontaminación del 89,9% en el cátodo y de 65.1% para el ánodo en comparación con el DBO<sub>5</sub> de las muestras iniciales sin tratamiento (Ver Anexo. 12)

#### **8.5.4. Demanda química de oxígeno**

Se determinó la concentración inicial y final del respectivo parámetro a fin de identificar una disminución con respecto al tiempo de operación de 10 días y el funcionamiento de la CCM de doble cámara. Se identificó que la concentración inicial fue mayor a 1500 mg/L (Ver Anexo 13), superando el rango de medición del equipo, por ende, no se pudo determinar la variación en la reducción de este parámetro, se espera que la variación del DQO esté relacionada a la variación del DBO, la cual disminuyó en un 65.1%.

#### **8.6. Fase V: Celda de combustible microbiana a escala banco**

Al identificar la mejor concentración de sustrato en la fase III, la cual corresponde a 50% aguas residuales domésticas y 50% heces bovinas y el mejor diseño de la CCM en la fase IV, el cual corresponde a una mayor área de los electrodos. Se procede a realizar una CCM teniendo en cuenta los criterios anteriormente mencionados y adicionalmente implementado un recipiente para las cámaras de la celda con un volumen de 3 litros, a fin de identificar y comparar el comportamiento que presentan las CCM a escala laboratorio y escala banco, con parámetros como voltaje, la potencia volumétrica y el DBO<sub>5</sub>. Durante el desarrollo de la fase se obtuvieron los siguientes resultados (Ver Anexo 14):



**Ilustración 20.** Voltaje promedio a escala banco de 3 litros.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

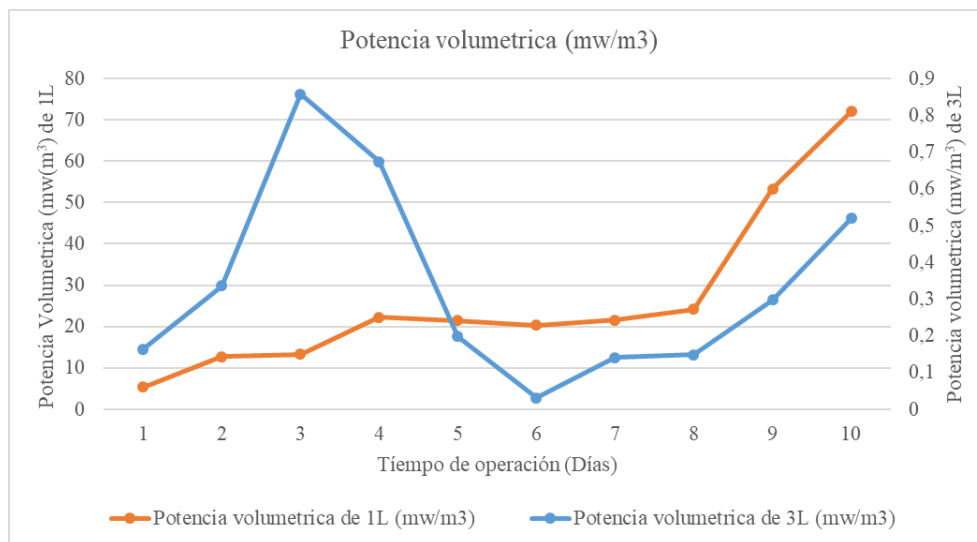
En la ilustración 20, se puede observar el comportamiento que tuvo la CCM a escala de banco, donde se utilizó 3 litros de aguas grises en la cámara catódica y en la cámara anódica 3 litros de la concentración de 50% aguas residuales domésticas y 50% heces bovinas. De acuerdo al tiempo de operación se evidencia un valor máximo de voltaje de 71.7 mV, el cual es menor en comparación al obtenido por la CCM a escala laboratorio de la fase IV con mayor área de los electrodos, en donde se obtuvo un voltaje máximo de 379.5 mV.

La celda a escala banco presento el mismo problema de la CCM 3 de la fase IV, al verse afectada por el transporte de electrones entre las cámaras debido a que se incremental a distancia de los electrodos y por ende dificultan que la generación de energía dentro de la CCM (Ana Del Pilar Pineda Marin, 2016)

De igual manera se debe tener en cuenta que al implementar un prototipo a escala piloto, debe estar relacionado el aumento del volumen de la celda, con el área de la membrana, el área de los electrodos y la distancia entre los electrodos, ya que tienen una relación directa en la generación de voltaje dentro de las celdas, ocasionando que los procesos internos que favorecen la generación de energía sea más tardíos, obteniendo valores de potencia bajos para la celda.

### 8.6.1. Potencia volumétrica

Con respecto a la comparación de la potencia volumétrica, se tuvo en cuenta los resultados obtenidos con la CCM1 de 1L con mayor área de los electrodos de la fase IV y la CCM de 3L con la misma área de los electrodos de la CCM1 de la fase IV.



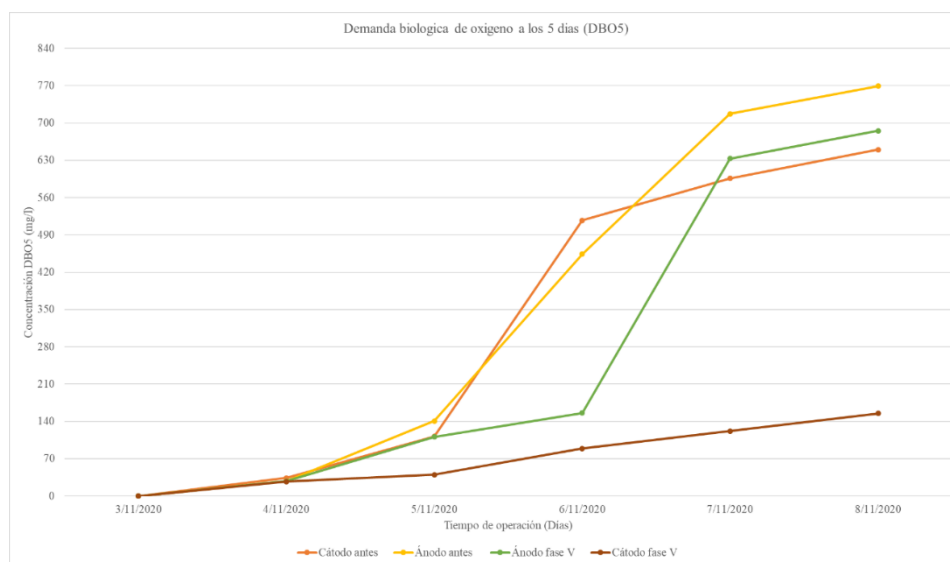
**Ilustración 21.** Comparación de la potencia volumétrica de CCM.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

En la ilustración 21, se puede observar que el comportamiento relacionado a la potencia volumétrica en cada una de las CCM es distinto, ya que la CCM1 de 1L (rango de 0 a 80 MW/m<sup>3</sup>) presenta una conducta de crecimiento en la mayoría del tiempo de operación, mientras que la CCM2 de 3L (rango de 0 a 0.9 MW/m<sup>3</sup>) muestra una conducta más variada a través de todo el tiempo de operación. De igual manera la CCM1 obtuvo mejor potencia volumétrica con un valor de 72.01 (MW/m<sup>3</sup>) en comparación a los 0,51 (MW/m<sup>3</sup>) generados por la CCM3. Esta diferencia significativa se debe a la resistencia interna creada por el sustrato, dificultando la captación de electrones mediante el electrodo para transportarlos hacia la cámara catódica, caso contrario para la CCM a escala laboratorio que obtuvo una menor resistencia. Esta diferencia es notoria en la gráfica y al mismo tiempo significativa debido que al tener un mayor volumen de agua se debe tener en cuenta que habrá una mayor cantidad de energía – hora para la CCM2 que tuvo una menor potencia volumétrica, por ende la polarización de los electrodos ocurre con un valor menor para esta celda y al tener una mayor separación de electrodos requiere de mayores tiempo de funcionamiento a fin de obtener valores de voltaje mejores y potencias volumétricas más altas (Buitrón, 2011).

### 8.6.2. Demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Para determinar el tratamiento de las aguas residuales a través del DBO<sub>5</sub> en la fase V se tuvo en cuenta las concentraciones seleccionadas de la fase III, es decir; aguas grises (en la cámara catódica) y 50% de aguas residuales domésticas y 50% de heces bovinas (en la cámara anódica), adicionalmente se identificó el comportamiento del respectivo tratamiento, teniendo en cuenta el volumen de 3L y se comparó mediante las concentraciones antes y después del tratamiento, donde se obtuvieron los siguientes resultados.



**Ilustración 22.** Comparación del DBO<sub>5</sub> en la cámara catódica y anódica antes y después del tratamiento en la fase V.

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

De acuerdo a la ilustración 22, en la fase V se obtuvo un valor de DBO<sub>5</sub> para el cátodo de 155 mg/l y para el ánodo de 685 mg/l, se evidencia que, a mayor cantidad de volumen de sustrato en la CCM, se requiere un mayor tiempo de operación al establecido, debido a que no hubo un cambio significativo en la concentración de DBO<sub>5</sub> del ánodo, por lo que aún se encuentran presentes gran cantidad de compuestos degradables en el agua residual (Ver Anexo. 12). Donde se obtuvieron porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub> para la cámara catódica de 76.2%, y para la cámara anódica del 10.9%.

Finalmente es importante resaltar que el DBO<sub>5</sub> obtenido antes y después del tratamiento en las fases IV y V, presentan un comportamiento el cual se refleja en los primeros días la oxidación de la materia carbonosa, como se evidencia tanto en las ilustraciones N° 22 y N° 19, de igual manera se muestran curvas suaves de manera ascendente las cuales requieren de un tiempo aproximado de 3 días para dar paso al proceso de nitrificación en el cual el DBO aumenta de manera abrupta manteniendo el uso de oxígeno a una velocidad constante (Cárdenas, 2015).

### **8.7. Análisis de la comparación de parámetros fisicoquímicos en el cátodo-ánodo antes y después del tiempo de operación: Fase III.**

El porcentaje de Oxígeno disuelto en la cámara catódica es mayor al oxígeno presente en la cámara anódica, debido a que las cantidades de comunidades bacterianas son mayores en la cámara anódica y por ello se consume en una mayor proporción (Ver Anexo 15), este comportamiento favorece las dinámicas de la CCM en cuanto a la generación de energía, debido a que en la cámara catódica se deben presentar aceptores de electrones como protones, oxígeno o microorganismos y en la cámara anódica se deben presentar condiciones anaerobias.

Pero cuando en las dos cámaras de la CCM el potencial de oxidación y reducción presentan valores negativos, infiere que en las dos cámaras se presentan reacciones de reducción creando de un ambiente anaeróbico, por lo tanto, las comunidades bacterianas actúan como un aceptor de electrones reduciendo el transporte de los mismo por medio de los electrodos, provocando una reducción en la generación de voltaje máximo (Myers M., Leland M., Robert O. 2006). Por otra parte, la presencia de Oxígeno disuelto en la cámara anódica no permite la aceptación de electrones por los electrodos, debido a que el oxígeno disuelto es un aceptor de electrones (López, 2014).

De igual manera cuando la velocidad en la generación de protones en el ánodo es mayor a la velocidad de transporte por medio de la membrana y a la asimilación de los mismos en el cátodo, se genera una conglomeración de protones en el ánodo causando un diferencial en el pH de las cámaras, con valores mayores en el ánodo como se evidencia en la CCM 3 de la fase III en el anexo 10, por lo cual se aumenta la fuerza motriz que facilita la difusión de protones de la cámara anódica hacia la cámara catódica (Gallo, 2018).

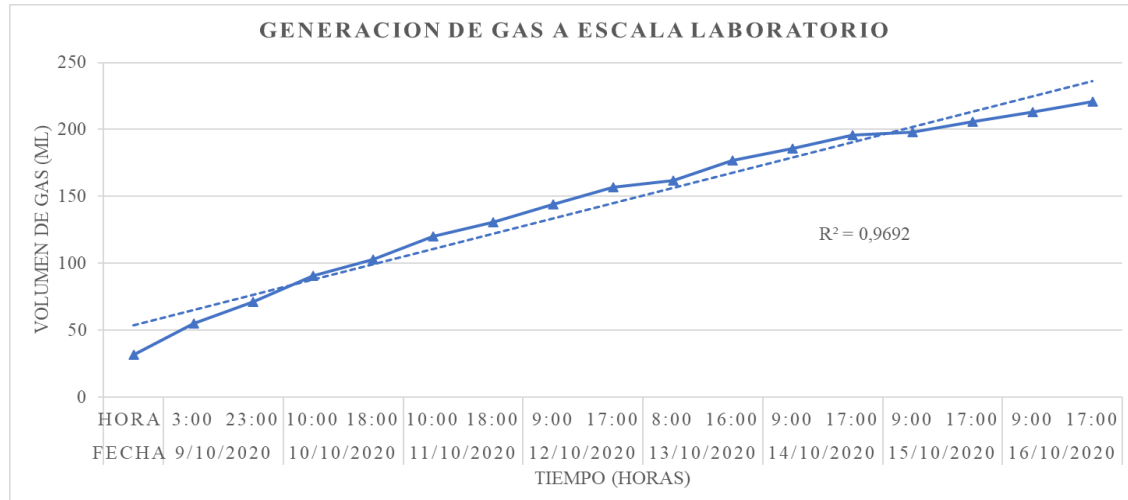
## 8.8. CAPÍTULO III

### 8.8.1. GENERACIÓN DEL GAS METANO

#### 8.8.2. Potencial y eficiencia en la generación de gas metano

El potencial de los sustratos utilizados para generar gas metano, está directamente relacionado a la cantidad de sólidos, ya que, según el IPCC las heces de los bovinos tienen un 20% de sólidos volátiles en el total de sus excrementos, además que cada kilogramo de sólidos volátiles tiene la capacidad de producir 0,1 Kg de CH<sub>4</sub> (Hongmin, y otros, 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, se relaciona la cantidad de heces utilizadas dentro de los montajes para determinar el potencial en la generación de gas metano, en la fase IV la CCM utilizó 173,3 gr de heces bovinas, con un estimado de sólidos volátiles de 34,66 gr. Al realizar la conversión de SV a Kg de CH<sub>4</sub>, se obtiene que 34,66 gr de heces bovinas pueden generar 3,466 gr de CH<sub>4</sub>; El volumen del gas se obtiene mediante la densidad del gas metano en condiciones de temperatura de 0 a 10 °C y a 1 atm de presión determinada por (Klein & Alvarado, 1996) con un valor de 0,717 Kg/m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta lo anterior se determinó que 3,466 gr de gas metano ocupa un volumen de 4825 ml, de los cuales la CCM generó dentro de su tiempo de operación un volumen de biogás de 221ml (ver Anexo 16), con un comportamiento ascendente como observa en la ilustración 23.

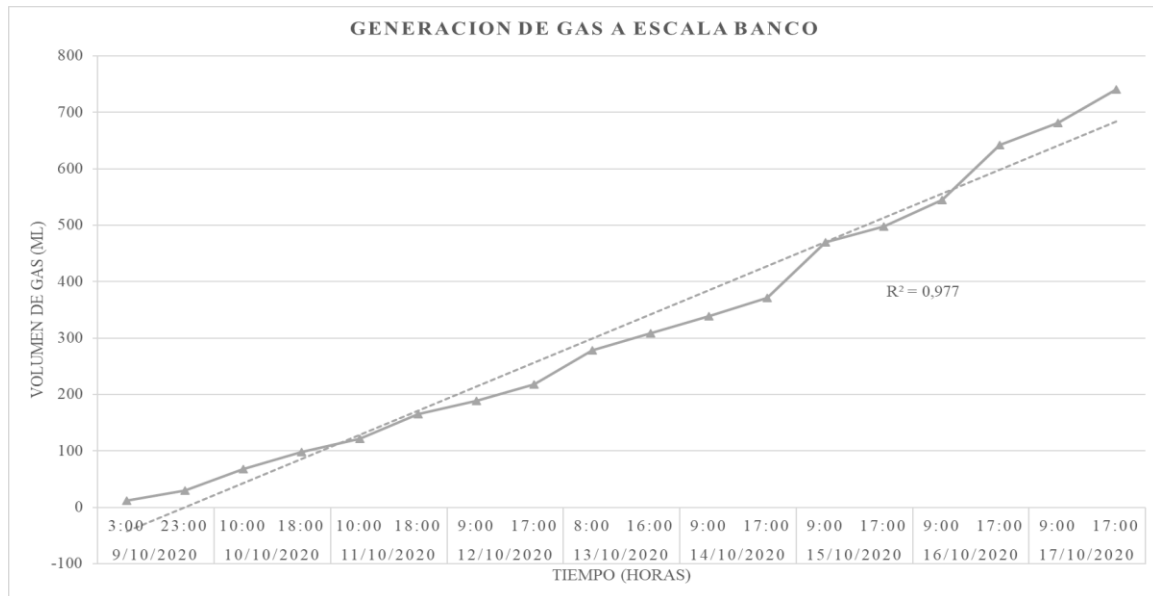


**Ilustración 23.** Generación de gas metano en CCMs a escala laboratorio

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

Teniendo en cuenta los valores generados de gas por la celda, se relaciona con la cantidad de gas que podría generar y se determina el porcentaje de eficiencia de la celda, bajo las condiciones de su funcionamiento, dicha eficiencia se determinó en 4,5%.

Para la CCM a escala banco, se desarrolló el mismo procedimiento con los datos obtenidos por el IPCC, en la cual se utilizaron 333,3 gramos de heces bovinas, con un contenido de sólidos volátiles de 66,6 gramos, con la capacidad de generar 6,66 gramos de  $\text{CH}_4$  que ocupa un volumen de 9289 ml, de los cuales la CCM a escala banco generó durante su tiempo de retención un volumen de 741 ml (Ver Anexo 16); Esta CCM obtuvo una eficiencia en la generación de gas de 8 %, con un comportamiento ascendente como se evidencia en la ilustración 24.



**Ilustración 24.** Generación de gas metano en CCMs a escala banco

**Fuente:** Los autores. Trabajo de campo 2020.

### 8.8.3. Análisis de la generación de gas metano

Un aumento en el pH de las aguas residuales tratadas, el cual llegó a obtener un promedio de 9, por fuera del rango entre 6,8 y 8, este pH elevado inhibe el proceso de metanogénesis y dificulta el proceso de fermentación, de igual manera se relaciona con el primer proceso de fermentación del sustrato denominado hidrólisis (Villacres, 2016), corroborado con la presencia de oxígeno disuelto, el cual evidencia que la cámara anódica se encontraban en el proceso de transición hacia un ambiente anaerobio. De igual manera para alcanzar un ambiente anaerobio los valores del porcentaje de óxido-reducción debe estar en el rango de -350 y -550 en la cámara anódica, la CCM después del tiempo de retención se encontraba en valores de -274.3 en el ánodo, por ende, el desarrollo de las bacterias metanogénicas aún estaba en su etapa de adaptación (López, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, se espera un mayor rendimiento en la generación de gas con el aumento del tiempo de retención del sustrato dentro de la CCM o con la implementación de un sistema de aclimatación bacteriana (Aguilera, 2016); Pero por factores externos que dificultó la disponibilidad de tiempo, el análisis de cada celda se desarrolló en 10 días.

## **9. IMPACTO SOCIAL, HUMANISTA DEL PROYECTO**

Con el desarrollo de esta investigación se pretende dar a conocer una tecnología que permita aprovechar los productos que se generan durante la descomposición de la materia orgánica, enfocada en la generación de energía, gas metano, y a su vez realice el tratamiento de aguas residuales con la finalidad de reducir las cargas contaminantes, tanto en fuentes hídricas como en campos de infiltración. Esta es una tecnología que puede ser implementada en las zonas rurales y en comunidades de bajos recursos, donde se presentan dificultades económicas y estructurales para la prestación de servicios públicos como gas y alcantarillado.

Esta investigación se desarrolló con la utilización de materiales convencionales, de bajo costo y accesibles (Ver anexo 17), para su elaboración y el posterior mantenimiento de sus partes que lo conforman, dichos materiales se pueden conseguirse en almacenes comerciales como ferreterías y droguerías presentes en municipios.

La implementación de esta tecnología en una vivienda rural, genera un impacto socio económico positivo, ya que se reduce el uso de materiales como el carbón y la leña utilizados como fuentes de energía, los cuales sería reemplazados por biogás generado por CCM, reduciendo el tiempo y energía térmica que es destinada para la actividad culinaria, de igual manera reduce la deforestación con fines energéticos, y el costo en la adquisición de combustibles fósiles como el carbón.

## 10. CONCLUSIONES

Mediante el desarrollo y diseño del prototipo de CCM a escala laboratorio se realizó el tratamiento de las aguas residuales conformadas por ARD de la vivienda rural y heces bovinas, con un tiempo de operación de 10 días, obteniendo un porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> 65,1% en la cámara anódica y para la cámara catódica (ARG) obtuvo un porcentaje de remoción del DBO del 90%.

Por medio de la caracterización fisicoquímica se identificó los parámetros de Ph, Conductividad, % OD, Potencial redox, sólidos sedimentables y DQO de las aguas residuales domésticas, estos parámetros se compararon con la resolución 631 de 2015 donde se identificó que el DQO obtenido es superior a los 1500 mg/L y no se encuentra dentro de los límites permisibles es decir los 200 mg/L presente en la resolución.

Durante el desarrollo experimental del proyecto, se identificó que el aumento de la concentración de las heces bovinas, genera una mayor actividad microbiana evidenciada en el voltaje, el cual aumentó un 88,8%, con la variación de la concentración de 260 mg/L en la fase I a 520 mg/L en la fase II, pasando de 15,3 mV a 136,6 mV. De igual manera en la fase IV el área de los electrodos incide de manera positiva en la generación de voltaje, ya que la CCM con doble electrodo obtuvo un valor máximo de 379.5 mV, con respecto a 191,9 mV de la CCM en la fase III con electrodos sencillos e igual concentración de sustrato. Del mismo modo se realizó la comparación volumétrica con la misma configuración y sustrato, donde se estuvo que los voltajes generados a escala laboratorio en la fase IV fue de 379.5 mV mientras que en la fase V a escala banco se obtuvo como valor máximo 71.7 mV.

De acuerdo a lo anterior se identificó como mejor CCM a escala laboratorio el diseño con mayor área de electrodos y una combinación de sustrato de 50% de ARD Y 50% HB, para la generación de energía y tratamiento de aguas residuales; Al realizar la mezcla proporcional de diferentes sustratos ARD y HB en la cámara anódica de las CCM, se obtiene un aumento en la capacidad de generación de energía, esto se debe al aumento en la diversidad de microorganismos, lo cual permitió obtener densidades de potencia con un valor máximo de 1,30 (MW/m<sup>2</sup>).

Se identificó el potencial de generación de gas metano de las heces bovinas dentro de la CCM, el cual está directamente relacionado con la cantidad de sólidos dentro de la cámara, determinado para la CCM a escala laboratorio con 173,3g de heces bovinas una capacidad de generar gas metano de 4825 ml, y para la CCM escala banco con 333,3g de heces bovinas una capacidad de generación de 9289 ml de gas metano.

En cuanto a la eficiencia de producción de gas por CCM, se estableció que, bajo las condiciones de operación de 15°C durante un tiempo de operación de 10 días, se obtuvo que para la CCM a escala laboratorio la eficiencia en la generación es de 4,5%, y para la CCM a escala banco la eficiencia en la generación es del 8%.

Se evidencio que nuestro prototipo de CCM a escala laboratorio en comparación a otros estudios realizados bajo la misma tecnología, se destaca por haber implementado materiales convencionales, de bajo costo con la finalidad de implementar en zonas rurales con comunidades de bajos recursos obteniendo valores aptos con respecto a DBO<sub>5</sub> y densidad de potencia.

## 11. RECOMENDACIONES

Para obtener mejores resultados en la generación de energía mediante el aumento del volumen de la celda de combustible microbiana a escala banco, se debe tener en cuenta un aumento proporcional de los electrodos y la membrana, acompañado de un proceso de aclimatación por medio de inóculos bacterianos o energéticos.

La conservación de la temperatura en un rango mesofílico es fundamental para el correcto desarrollo de los procesos microbianos en un tiempo de operación corto, es por ello que el uso de aislantes térmicos en regiones con temperaturas bajas, es una alternativa a utilizar durante el desarrollo de celda.

Con respecto a los materiales implementados en la construcción de las cámaras de las celdas es importante utilizar alternativas eficientes que permitan generar una mejor hermeticidad de estas tecnologías para disminuir las pérdidas del gas metano, aumentar los procesos microbiológicos y mantener una temperatura constante en el sistema.

Aplicar la metodología implementada en posteriores investigaciones, teniendo en cuenta el empleo de diversos materiales en la CCM, con el propósito de comparar la generación de energía, producción de gas metano y reducción de materia orgánica, con respecto al tipo de materiales utilizado enfocado hacia los materiales convencionales y de bajo costo.

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, E. A. (2016). Producción de biogás a partir de Biomasa. Revista Científica FAREM-Estelí, Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano N°17, Adaptación al cambio climático. Pág. 11-12. Recuperado de: <https://camjol.info/index.php/FAREM/article/view/2610>
- Alzate, L., Fuentes, C., Álvarez, A., & Sebastian, J. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. Interciencia, 33(7), 510-517. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33933706.pdf>
- Ahrens, T., & Weiland, P. (2007). Biomethane for future mobility. Landbauforschung Volkenrode, 57(1), 71. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Peter\\_Weiland2/publication/240640469\\_Biomethane\\_for\\_future\\_mobility/links/543bf7ff0cf204cab1db5c3d/Biomethane-for-future-mobility.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Peter_Weiland2/publication/240640469_Biomethane_for_future_mobility/links/543bf7ff0cf204cab1db5c3d/Biomethane-for-future-mobility.pdf)
- Asensio, J. A., Peña, J., Pérez-Coll, D., Ruiz-Morales, J. C., Marrero-López, D., Núñez, P., & Gómez-Romero, P. (2011). Pilas de combustible de Membrana polimérica. Afinidad, 68(554).
- Asefi, B., Li, S. L., Moreno, H. A., Sanchez-Torres, V., Hu, A., Li, J., & Yu, C. P. (2019). Characterization of electricity production and microbial community of food waste-fed microbial fuel cells. Process Safety and Environmental Protection, 125, 83-91. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582018311443>
- Ayala, M. E., Mesa, G. P., & Montoya, J. L. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (38), 53-63. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/430/43003805.pdf>
- Beegle, J. R., & Borole, A. P. (2018). Energy production from waste: Evaluation of anaerobic digestion and bioelectrochemical systems based on energy efficiency and economic factors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96, 343-351. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032118305653>
- Bo, T., Zhu, X., Zhang, L., Tao, Y., He, X., Li, D., & Yan, Z. (2014). A new upgraded biogas production process: coupling microbial electrolysis cell and anaerobic digestion in single-chamber, barrel-shape stainless steel reactor. Electrochemistry Communications, 45, 67-70. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1388248114001581>
- Bose, D., Gopinath, M., Vijay, P., Sridharan, S., Rawat, R., & Bahuguna, R. (2019). Bioelectricity generation and biofilm analysis from sewage sources using microbial fuel cell. Fuel, 255, 115815. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119311676>
- Buitron ,G, J. P. (2011). Producción de electricidad en celdas de combustible microbianas utilizando agua residual: efecto de la distancia entre electrodos. Mexico. Recuperado de

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-888X2011000100001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2011000100001)

- Cazorla, M. (2015). Estudio de Celdas de Combustible Microbianas como sistema LCE aplicado a plantas de tratamiento de residuos. Sevilla. Recuperado de: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90270>
- Chemes, E. D. (2019). *Generación de Bio-energía a partir de biomasa residual en feedlot*. San Miguel de Tucumán: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán. Recuperado de: <https://ria.utn.edu.ar/handle/20.500.12272/4363>
- Carmona, J., Bolívar, D., & Giraldo, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 18(1), 49-63. Recuperado de: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/rccp/article/view/323994>
- Cristancho, D. L., Gámez, W., Guerra, J. A., & y Dueñas, M. F. (2019). Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 25-44. Recuperado de: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/2411>
- Condori, A., & Torres, G. (2019). Biodegradación de la materia orgánica y producción de Bioelectricidad en Celdas de Combustible Microbiano (CCM) a partir del agua residual doméstica. Lima. Recuperado de: <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1655>
- Corporación Autónoma de Boyacá (Corpoboyaca). Obtenido de Corpoboyaca: <https://www.corpoboyaca.gov.co/la-corporacion/funciones-corporativas/>
- DANE. (2014). Censo Nacional agropecuario. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
- Del Duca, M. &. (1967). *Termodinámica y aplicaciones de sistemas de conversión de energía bioelectroquímica*. Estados Unidos: NASA.
- Durazno, A. D. (2018). *Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigester de producción por etapas*. Cuenca, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15445>
- Espinal, J., Olvera, O., Hernández, V., & Morillon, D. (2016). *Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cuautlalpan*. Artículo Revista de Sistemas Experimentales Septiembre, 3(8), 36-52. Recuperado de: [http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas\\_Experimentales/vol3num8/Revista\\_de\\_Sistemas\\_Experimentales\\_V3\\_N8\\_5.pdf](http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol3num8/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V3_N8_5.pdf)
- Fernández, C. G. (2011). El cambio climático: Los aspectos científicos y económicos más relevantes. *Nómadas. Critical Journal of Social and Juridical Sciences*, 32(4). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/181/18120706003.pdf>
- Faoro, D. (2011). Modelo de programação multiobjetivo de um sistema de produção leiteira: considerando objetivos de sustentabilidade. Recuperado de: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/215>

- González, N. K. (2013). Evaluación de sedimentos procedentes de la ciénaga de puerto progreso y puerto de abrigo de yucalpetén en celdas de combustible microbianas de sedimentos. México: Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Recuperado de: [https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/696/1/PCER\\_M\\_Tesis\\_2013\\_Nancy\\_Gonzalez\\_Gamboa.pdf](https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/696/1/PCER_M_Tesis_2013_Nancy_Gonzalez_Gamboa.pdf)
- González, M., Jurado, E., González, S., Aguirre, Ó. A., Jiménez Pérez, J., & Návar Cháidez, J. D. J. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. Ciencia uanl, 6(3). Recuperado de: <http://eprints.uanl.mx/1287/>
- Henze, M., Harremoës, P., LaCour-Jansen, J., & Arvin, E. (2002). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes. Heidelberg, Germany. Ed. Softcover of or edición. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/48447747\\_Wastewater\\_Treatment\\_Biological\\_and\\_Chemical\\_Processes](https://www.researchgate.net/publication/48447747_Wastewater_Treatment_Biological_and_Chemical_Processes)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). Métodos analíticos de laboratorio de suelos. Bogotá. Recuperado de: <https://www.igac.gov.co/es/catalogo/metodos-analiticos-del-laboratorio-de-suelos>
- Jiménez, A. A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. Revista interdisciplinaria de gestión ambiental, 2(23), 12-19. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2926089>
- Kondaveeti, S., Abu-Reesh, I. M., Mohanakrishna, G., Pant, D., & He, Z. (2019). Utilization of residual organics of Labanah whey for renewable energy generation through bioelectrochemical processes: Strategies for enhanced substrate conversion and energy generation. Bioresource technology, 286, 121409. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241930639X>
- Lee, K. Y., Choi, I. K., Lim, K. H., Lee, K. Y., Choi, I. K., & Lim, K. H. (2018). Nitrogen removal and electrochemical characteristics depending on separators of two-chamber microbial fuel cells. Environmental Engineering Research, 24(3), 443-448. Recuperado de: <http://eeer.org/journal/view.php?doi=10.4491/eeer.2018.211>
- Liu, S., Deng, Z., Li, H., & Feng, K. (2019). Contribution of electrodes and electric current to process stability and methane production during the electro-fermentation of food waste. Bioresource technology, 288, 121536. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852419307667>
- López, J. (2014). *Desarrollo de una celda de combustible microbiana (CCM) para aplicación en tratamiento de aguas residuales* (Tesis de pregrado) Santiago de Querétaro: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQU). Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-56912016000100148](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-56912016000100148)
- Márquez, M. Tecnologías no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Matices del Posgrado Aragón, 5(13). Recuperado de: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/matices/article/view/25740>
- Martínez, C., Oechsner, H., Brulé, M., & Marañón Maison, E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción

- de biogás en Cuba. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 23(2), 63-69. Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542014000200011&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071-00542014000200011&script=sci_arttext&tlng=en)
- Miranda, J. P. (2019). *Obtención de energía eléctrica a partir de materia orgánica biodegradable mediante el sistema integrado humedal construido-celda combustible microbiana* (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Ambientales). Concepción, Chile. Recuperado de: <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/3589>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado de: <https://bit.ly/2VJx00t>
- Moradian, J. M., Xu, Z. A., Shi, Y. T., Fang, Z., & Yong, Y. C. (2020). Efficient biohydrogen and bioelectricity production from xylose by microbial fuel cell with newly isolated yeast of *Cystobasidium slooffiae*. International Journal of Energy Research, 44(1), 325-333. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.4922>
- Nacional, U. T. (2010). Energía a partir de las aguas residuales. Argentina. Recuperado de [http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia\\_aguas\\_residuales/energia\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/energia_aguas_residuales/energia_aguas_residuales.pdf)
- Organización de las Naciones Unidas. La agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible una oportunidad para américa latina y el caribe. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf)
- Pannell, T. C., Goud, R. K., Schell, D. J., & Borole, A. P. (2016). Effect of fed-batch vs. continuous mode of operation on microbial fuel cell performance treating biorefinery wastewater. Biochemical engineering journal, 116, 85-94. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X16301279>
- Pedrique, M. (2008). Reproducción y crecimiento microbiano. Recuperado de [http://www.ucv.ve/fileadmin/user\\_upload/facultad\\_farmacia/catedraMicro/08\\_Tema\\_6\\_c\\_recimiento.pdf](http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_farmacia/catedraMicro/08_Tema_6_c_recimiento.pdf)
- Petropoulos, E., Shamurad, B., Acharya, K., & Tabraiz, S. (2020). Domestic wastewater hydrolysis and lipolysis during start-up in anaerobic digesters and microbial fuel cells at moderate temperatures. International Journal of Environmental Science and Technology, 17(1), 27-38. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-019-02426-z>
- Potter, M. C. (1911). Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. Proceedings of the royal society of London. Series b, containing papers of a biological character, 84(571), 260-276. Recuperado de: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspb.1911.0073>
- Ragab, M., Elawwad, A., & Abdel-Halim, H. (2019). Simultaneous power generation and pollutant removals using microbial desalination cell at variable operation modes. Renewable Energy, 143, 939-949. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148119307281>
- Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía

- eléctrica. Información tecnológica, 24(6), 17-28. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642013000600004](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000600004)
- Ríos, S. C. (2016). Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, Estación Experimental Tunshi ESPOCH (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5662>
- Rojas, S. A. (2017). Evaluación de la producción de energía eléctrica y disminución de dco en aguas residuales sintéticas mediante celdas de combustible microbianas a escala laboratorio. Bogotá. Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6032/1/5152236-2017-1-IQ.pdf>
- Salazar, J. L. (2016). Remoción de la materia orgánica de efluentes de la industria cafetalera usando celdas de combustible microbiana. Tingo María. Recuperado de <https://www.slideshare.net/kevinalejandruruizbalcazar/celdas-de-combustible-microbiano>
- SPENA, G. Recuperado el 01 de Julio de 2020 en SPENA GROUP: <https://spenagroup.com/tipos-tratamiento-agua-aguas-residuales/#1561762217672-1567bfa2-456a>
- Torres, D. L. (2011). Caracterización microbiológica del agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ubicada en el campus de la Universidad Militar Nueva Granada Sede Cajicá. Bogotá. Recuperado de: [https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod\\_rh=0000857980](https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000857980)
- Torres, C. G. (2015). Uso de desechos orgánicos urbanos para la producción energética mediante una celda de combustible microbiana de Escherichia coli (generado Abril 2015). MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide, (19), 13. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5208925>
- Troconi, A & Herbert, K. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Miami, FL USA: Belzona Inc. Recuperado de: [https://www.belzona.com/es/solution\\_maps/wastewater/money\\_map.pdf](https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf)
- Vaca, D. Tratamiento primario de aguas residuales domésticas: Unidad didáctica como eje interdisciplinar en ciencias. Maestría en Enseñanza de las Ciencias Exactas y Naturales. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56270>
- Vera, I. (2012). *Análisis de funcionamiento y patrones asociativos de sistema de tratamiento convencionales y naturales de aguas servidas para la eliminación de materia orgánica y nutrientes*. (Tesis) Chile: Universidad de Concepción. Recuperado de: [http://repositorio.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/180821/VERA\\_ISMAEL\\_2018D.pdf?sequence=1](http://repositorio.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/180821/VERA_ISMAEL_2018D.pdf?sequence=1)
- Vera, I., Estrada, M., Martínez, J., & Ortiz, A. (2013). *Potencial de generación de biogás y energía eléctrica Parte I: Excretas de ganado Bovino y Porcino*. Ingeniería, Investigación y tecnología, Volumen XV (numero 3), julio-septiembre 2014: 429-436. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S140577431470352X>

- Villacres, M. A. (2016). *Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado porcino para el aprovechamiento energético en la Granja Porcina García en el Cánton La Maná, barrio Miraflores sector el Toquillal en el año 2016. Diseño de un biodigestor alternativo*. Latacunga, Ecuador: Universidad Tecnica de Cotopaxi. Recuperado de: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6068>
- Wei, C. H., Harb, M., Amy, G., Hong, P. Y., & Leiknes, T. (2014). Sustainable organic loading rate and energy recovery potential of mesophilic anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Bioresource technology*, 166, 326-334. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414007123>
- Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2014). Microbial electrolysis cells turning to be versatile technology: recent advances and future challenges. *Water research*, 56, 11-25. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313541400147X>.
- Myers M., Leland M., Robert O. (2006). The use of oxidation-reduction potential as a means of controlling effluent ammonia concentration in an extended aeration activated sludge system. *Proceedings of the water environment federation, WEFTEC*, session 71-80, pp. 5901-5926. Recuperado de: <https://www.accesswater.org/publications/-293365/the-use-of-oxidation-reduction-potential-as-a-means-of-controlling-effluent-ammonia-concentration-in-an-extended-aeration-activated-sludge-system>.
- Aldana, N. P. M., & Castellanos, P. M. A. (2009). La cultura Investigativa de los estudiantes tomasinos en Tunja. In *Vestigium Ire*, 2(1). Recuperado de: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ivestigium/article/view/90>.
- Acosta-Castellanos, P. M., Queiruga-Dios, A., Hernández Encinas, A., & Acosta, L. C. (2020). Environmental Education in Environmental Engineering: Analysis of the Situation in Colombia and Latin America. *Sustainability*, 12(18), 7239. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/18/7239>.
- Castellanos, P. M. A., García, B. P., Cuéllar, L. Á., & Pita, M. D. (2019). Análisis de variables físicas y microbiológicas en el proceso de compostaje de biosólidos en pilas menores a un metro cúbico. *Cuaderno Activa*, 11, 23-32. Recuperado de: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/576>.
- Araque, I. D., Britto, M. C., Granados, N. R. P., & Cuellar, L. Á. (2018). Diagnóstico y propuesta de fitorremediación para el tratamiento de aguas residuales, sector tierra negra. *L'esprit Ingénieux*, 9(1), 132-140. Recuperado de: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/1849>.

## 13. ANEXOS

### 13.1. Anexo 1. Formatos de vistas


**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**  
 PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA  
 FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACREDITACIÓN  
 INSTITUCIONAL  
 DE ALTA CALIDAD  
 MULTICAMPUS

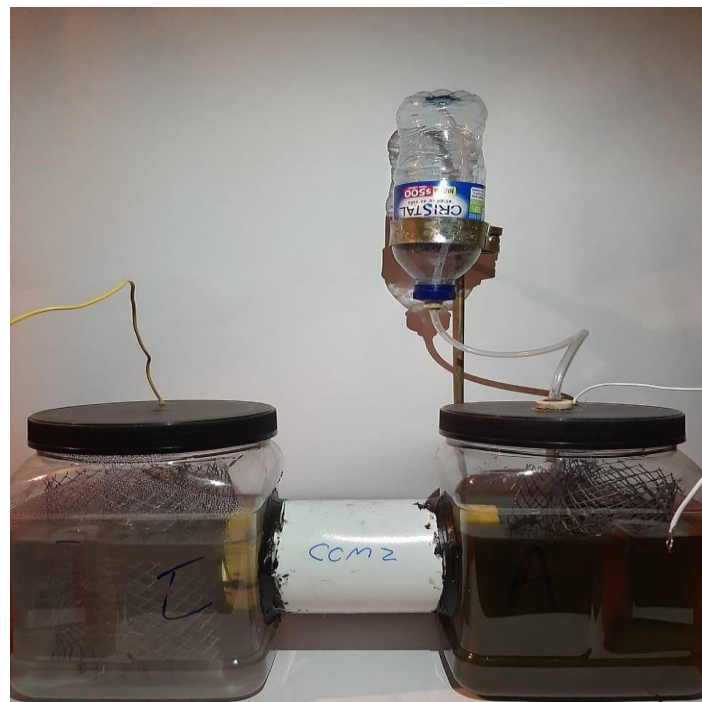
ENCUESTAS GENERAL DE VIVIENDAS EN ZONAS RURALES

Esta encuesta tiene como finalidad sustentar el estudio de elección de la vivienda rural, para el desarrollo de la tesis: DISEÑO Y EJECUCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y GENERACIÓN DE GAS METANO A PARTIR DE RESIDUOS EN UNA VIVIENDA RURAL PROMEDIO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ.

Estudiantes: Welmer Francisco Silva Cuevas, Julián Armando Peña Granda

| Nº | Nombres       | Apellidos      | Municipio | Vereda     | Sector            | # habitantes por vivienda | Celular      | Separación de aguas |    | Tanque séptico |    | Observaciones                                              |
|----|---------------|----------------|-----------|------------|-------------------|---------------------------|--------------|---------------------|----|----------------|----|------------------------------------------------------------|
|    |               |                |           |            |                   |                           |              | Si                  | No | Si             | No |                                                            |
| 1  | Elva Rocio    | Rojas Avila    | Tunja     | El Carmen  | Piragua           | 4                         | 316 8680144  | X                   |    | X              |    | Tanque séptico<br>Casa 10: Beano diluido la Tona           |
| 2  | Julian        | Campos         | Tunja     | El Carmen  | Piragua           | 1                         | 316 3615515  |                     | X  | X              |    | Piso con aguas<br>Casas 10 de la zona, zona                |
| 3  | Edison        | Hernandez      | Tunja     | El Carmen  | Piragua           | 5                         | 316 2626528  |                     | X  | X              |    | Tanque séptico<br>Casa 20: con eloncha de concreto         |
| 4  | Ana Milena    | Raquirá        | Soraca    | La Cruz    | Puente<br>hormaca | 6                         | 310 614 9848 | X                   |    | X              |    | Cajón<br>Tanque séptico                                    |
| 5  | Ema           | Hernandez      | Soraca    | La Cruz    | Puente<br>hormaca | 3                         | 315 48 29189 |                     | X  |                | X  | Agua negra con<br>Casa 5: con aguas de entrada             |
| 6  | Nancy         | Bernal Alvarez | Soraca    | La Escuela | Puente<br>hormaca | 3                         | 312 532 2558 | X                   |    | X              |    | Agua Negra a<br>Casa 10: con aguas de recolección          |
| 7  | Sandy Paola   | Aguilar        | Soraca    | La Escuela | Puente<br>hormaca | 3                         | 313 271 2168 | X                   |    | X              |    | Agua Negra<br>Casa 7: con aguas de recolección             |
| 8  | Hector Manuel | Raquirá        | Soraca    | La Escuela | Puente<br>hormaca | 3                         | 313 510 5881 | X                   |    | X              |    | Tanque séptico<br>Casa 10: con aguas de recolección        |
| 9  | Laura         | Hernandez      | Soraca    | La Escuela | Puente<br>hormaca | 6                         | 310 216 8697 |                     | X  | X              |    | Tanque séptico<br>Casa 10: con aguas de recolección        |
| 10 | Dora          | Gutierrez      | Chivata   | Quinota    | Rica-va<br>sur    | 3                         | 321 458 614  |                     | X  | X              |    | Tanque séptico<br>Casa 10: con aguas de recolección        |
| 11 | Laura         | Bernal         | Chivata   | La Capilla | Rica-va<br>sur    | 7                         | 316 208 553  | X                   |    | X              |    | Tanque séptico<br>Casa 11: con aguas de recolección        |
| 12 | Luz Marina    | Hernandez      | Chivata   | La Capilla | Rica-va           | 4                         | 321 282 2968 | X                   |    | X              |    | Manejando subterráneo<br>Casa 12: con aguas de recolección |

### 13.2. Anexo 2. Prototipo de Celda de Combustible Microbiana.



### 13.3. Anexo 3. Muestreo de las aguas residuales



Toma de datos de parámetros fisicoquímicos mediante el multiparametro



Análisis de solidos sedimentables (Conos de Imhoff)



Muestras compuestas de aguas residuales domesticas

#### 13.4. Anexo 4. Diseño experimental



Fase I: Ensayo preliminar



Fase II: Ensayo preliminar



Fase III: Combinación de sustratos



Fase IV. Aumento de la membrana



Aumento del área de los electrodos



Distancia entre los electrodos



Fase V. Celda de combustible microbiana a escala banco

### 13.5. Anexo 5. Resolución 631 del 2015 vertimiento de aguas residuales

| Parametros                        | Unidades            | Aguas Residuales Domesticas de las soluciones individuales saneamiento de viviendas unifamiliar o bifamiliar |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| pH                                | Unidades de pH      | 6.0 - 9.0                                                                                                    |
| DQO                               | mg/L O <sub>2</sub> | 200                                                                                                          |
| Solidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L                | 100                                                                                                          |
| Solidos Sedimentables (SSED)      | mg/L                | 5                                                                                                            |
| Grasas y Aceites                  | mg/L                | 20                                                                                                           |

Tabla de Resolución 631 del 2015

### 13.6. Anexo 6. Vertimiento de aguas residuales de ganadería

| PARAMETRO        | UNIDAD | GANADERIA |
|------------------|--------|-----------|
| pH               |        | 6,00-9,00 |
| DQO              | mg/L   | 900       |
| DBO <sub>5</sub> | mg/L   | 450       |
| SST              | mg/L   | 200       |
| SSED             | mg/L   | 5         |

### 13.7. Anexo 7. Voltajes fase I

| Nº Dias | Voltaje promedio<br>ARD (mv) | Voltaje promedio<br>HB (mv) | Voltaje promedio<br>CM (mv) |
|---------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1       | 22,55                        | 0,3                         | 32,15                       |
| 2       | 12,9                         | 3,6                         | 48,5                        |
| 3       | 26,3                         | 1,16                        | 56,93                       |
| 4       | 29,63                        | 2,63                        | 56,26                       |
| 5       | 43,4                         | 4,1                         | 51,56                       |
| 6       | 55,53                        | 7,23                        | 47,5                        |
| 7       | 57,63                        | 8,33                        | 46,2                        |
| 8       | 63,2                         | 9,5                         | 46,53                       |
| 9       | 66,7                         | 13,46                       | 46,16                       |
| 10      | 66,83                        | 15,3                        | 46                          |

Voltaje obtenido en los 10 días

### 13.8. Anexo 8. Voltajes fase II

| Nº Dias | Voltaje promedio<br>ARD (mv) | Voltaje promedio<br>HB (mv) | Voltaje promedio<br>CM (mv) |
|---------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1       | 114,75                       | 99,55                       | 140,3                       |
| 2       | 113,5                        | 101                         | 150,75                      |
| 3       | 103,15                       | 104,9                       | 127,5                       |
| 4       | 99,35                        | 104,05                      | 12,95                       |
| 5       | 111,9                        | 106,05                      | 2,1                         |
| 6       | 120,35                       | 115,75                      | 1                           |
| 7       | 124,75                       | 110,65                      | 6,35                        |
| 8       | 125,75                       | 116,6                       | 11,9                        |
| 9       | 118,8                        | 130,2                       | 9,85                        |
| 10      | 121,9                        | 136,6                       | 10,35                       |

Voltaje obtenido en los 10 días

### 13.9. Anexo 9. Parámetros Pretest y Postest.

|        | Sustrato                    | Parametros | Catodo |         | Anodo |         |
|--------|-----------------------------|------------|--------|---------|-------|---------|
|        |                             |            | Antes  | Despues | Antes | Despues |
| FASE I | Aguas Residuales Domesticas | Ph         | 9,25   | 8,9     | 8,41  | 6,7     |
|        |                             | Mvorp      | 60,5   | 135,9   | 147,2 | 81,2    |
|        |                             | %OD        | 40,5   | 12,2    | 37,8  | 58,2    |
|        |                             | us/cm      | 318    | 2973    | 1774  | 1694    |
|        |                             | T°C        | 33,8   | 14,45   | 21,2  | 16,12   |
|        | Heces Bovinas               | Ph         | 9,25   | 6,62    | 6,67  | 6,51    |
|        |                             | Mvorp      | 60,5   | -29,1   | -41,4 | -109,9  |
|        |                             | %OD        | 40,5   | 15,4    | 1,5   | 2       |
|        |                             | us/cm      | 318    | 281     | 3014  | 3790    |
|        |                             | T°C        | 33,8   | 15,25   | 15,79 | 15,11   |
|        | Compostaje                  | Ph         | 9,25   | 7,08    | 7,56  | 7,38    |
|        |                             | Mvorp      | 60,5   | -122,2  | -66   | -123,6  |
|        |                             | %OD        | 40,5   | 10      | 2,2   | 0       |
|        |                             | us/cm      | 318    | 346     | 1093  | 1703    |
|        |                             | T°C        | 33,8   | 15,87   | 14,65 | 16,26   |

Parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento fase I (Cátodo – Ánodo)

### 13.10. Anexo 10. Voltajes fase III

| Nº Dias | Voltaje promedio CCM1(90%ARD - 10% HB) (mv) | Voltaje promedio CCM2 (70%ARD - 30% HB) (mv) | Voltaje promedio CCM3 (50% ARD - 50% HB) (mv) | Voltaje promedio CCM4 (30% ARD - 70% HB) (mv) | Voltaje promedio CCM5 (10% ARD - 90% HB)(mv) |
|---------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1       | 61,5                                        | 1                                            | 119,05                                        | 12,7                                          | 32,7                                         |
| 2       | 13,15                                       | 1,15                                         | 138                                           | 30,9                                          | 9                                            |
| 3       | 47,4                                        | 3,55                                         | 127,55                                        | 42,9                                          | 14,15                                        |
| 4       | 77,55                                       | 2,35                                         | 127,65                                        | 31,65                                         | 15,25                                        |
| 5       | 48,75                                       | 5,7                                          | 129,1                                         | 44,85                                         | 16,1                                         |
| 6       | 51,25                                       | 6,55                                         | 153,5                                         | 29,6                                          | 20,65                                        |
| 7       | 39,35                                       | 5,35                                         | 166,5                                         | 31,05                                         | 19,9                                         |
| 8       | 26,8                                        | 15,4                                         | 174,5                                         | 37,4                                          | 5,45                                         |
| 9       | 6                                           | 27,05                                        | 191,9                                         | 49,15                                         | 8,8                                          |
| 10      | 6,85                                        | 19,6                                         | 187,45                                        | 65,5                                          | 7,75                                         |

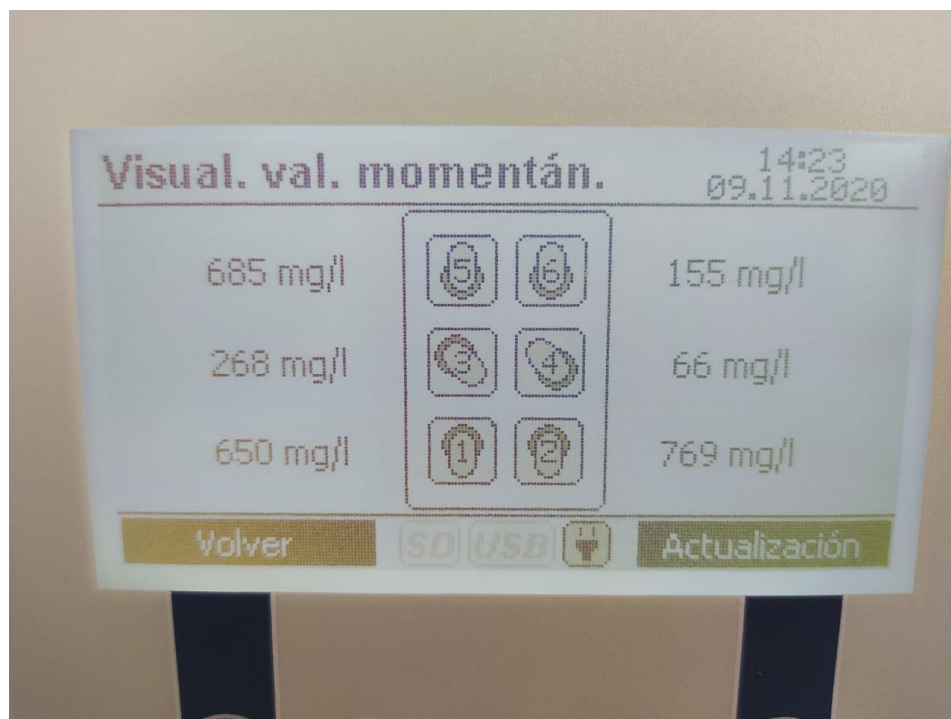
Voltaje obtenido en los 10 días

### 13.11. Anexo 11. Voltajes fase IV

| Nº Dias | Voltaje promedio (MV) CCM1 (Area de electrodos) | Voltaje promedio (MV) CCM2 (Membrana) | Voltaje promedio (MV) CCM3 (Distancia electrodos) |
|---------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1       | 103                                             | 30,9                                  | 19                                                |
| 2       | 159,6                                           | 42,7                                  | 22,4                                              |
| 3       | 162,7                                           | 55,5                                  | 32,1                                              |
| 4       | 211                                             | 75,9                                  | 31,6                                              |
| 5       | 207                                             | 104,5                                 | 47,8                                              |
| 6       | 201,5                                           | 117,2                                 | 46,9                                              |
| 7       | 207,5                                           | 132,3                                 | 56,5                                              |
| 8       | 220                                             | 175,8                                 | 66,1                                              |
| 9       | 326,5                                           | 181,3                                 | 91,1                                              |
| 10      | 379,5                                           | 186,8                                 | 105,1                                             |

Voltaje obtenido en los 10 días

### 13.12. Anexo 12. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)



Toma de datos DBO5 por medio del sistema de medición DBO DB 600

### 13.13. Anexo 13. Demanda Química de Oxígeno (DQO)



Toma de datos del DQO a través del fotómetro HI83399

### 13.14. Anexo 14. Voltajes fase V

| Nº DIAS | Voltaje promedio CCM1 (mv) |
|---------|----------------------------|
| 1       | 31,35                      |
| 2       | 44,9                       |
| 3       | 71,7                       |
| 4       | 63,6                       |
| 5       | 34,5                       |
| 6       | 13,5                       |
| 7       | 29,05                      |
| 8       | 29,85                      |
| 9       | 42,2                       |
| 10      | 55,85                      |

Voltaje obtenido en los 10 días

### 13.15. Anexo 15. Parámetros Pretest y Postest.

|          | Sustrato | Parametros | Catodo |         | Anodo  |         | Variacion |         |
|----------|----------|------------|--------|---------|--------|---------|-----------|---------|
|          |          |            | Antes  | Despues | Antes  | Despues | Catodo    | Anodo   |
| FASE III | CCM 1    | Ph         | 9,25   | 6,73    | 7,39   | 9,51    | 2,52      | -2,12   |
|          |          | Mvorp      | 60,5   | 41,4    | 37,1   | -230,8  | 19,1      | 267,9   |
|          |          | %OD        | 40,5   | 98,4    | 18,8   | 42,7    | -57,9     | -23,9   |
|          |          | us/cm      | 318    | 283     | 5963   | 14,83   | 35        | 5948,17 |
|          |          | T°C        | 33,8   | 14,71   | 16,55  | 14,75   | 19,09     | 1,8     |
|          | CCM2     | Ph         | 9,25   | 6,42    | 8,46   | 9,42    | 2,83      | -0,96   |
|          |          | Mvorp      | 60,5   | -15,8   | -39,8  | -234,9  | 76,3      | 195,1   |
|          |          | %OD        | 40,5   | 31      | 11,9   | 4,2     | 9,5       | 7,7     |
|          |          | us/cm      | 318    | 275     | 5496   | 12,28   | 43        | 5483,72 |
|          |          | T°C        | 33,8   | 14,78   | 16,61  | 14,81   | 19,02     | 1,8     |
|          | CCM3     | Ph         | 9,25   | 6,49    | 8,53   | 9,25    | 2,76      | -0,72   |
|          |          | Mvorp      | 60,5   | -232,4  | -55,2  | -274,3  | 292,9     | 219,1   |
|          |          | %OD        | 40,5   | 10,3    | 11,1   | 4,8     | 30,2      | 6,3     |
|          |          | us/cm      | 318    | 314     | 4655   | 10,23   | 4         | 4644,77 |
|          |          | T°C        | 33,8   | 14,83   | 16,59  | 14,84   | 18,97     | 1,75    |
|          | CCM4     | Ph         | 9,25   | 6,39    | 8,65   | 8,97    | 2,86      | -0,32   |
|          |          | Mvorp      | 60,5   | -83,2   | -104,9 | -265    | 143,7     | 160,1   |
|          |          | %OD        | 40,5   | 8,5     | 10,8   | 3,3     | 32        | 7,5     |
|          |          | us/cm      | 318    | 261     | 4175   | 6763    | 57        | -2588   |
|          |          | T°C        | 33,8   | 14,88   | 16,63  | 14,85   | 18,92     | 1,78    |
|          | CCM5     | Ph         | 9,25   | 6,61    | 8,74   | 7,37    | 2,64      | 1,37    |
|          |          | Mvorp      | 60,5   | -2,7    | -92,3  | -176,5  | 63,2      | 84,2    |
|          |          | %OD        | 40,5   | 26,6    | 15     | 4,1     | 13,9      | 10,9    |
|          |          | us/cm      | 318    | 270     | 3118   | 3586    | 48        | -468    |
|          |          | T°C        | 33,8   | 14,91   | 16,47  | 14,9    | 18,89     | 1,57    |

Parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento fase III (Cátodo – Ánodo)

### 13.16. Anexo 16. Generación de Gas Metano



Medición del gas metano a partir del método de volumen desplazado CCM a escala laboratorio

| Fecha      | Hora  | Gas metano (ml) | Generación de Gas |
|------------|-------|-----------------|-------------------|
| 9/10/2020  | 3:00  | 6               | 6                 |
|            | 23:00 | 32              | 32                |
| 10/10/2020 | 10:00 | 55              | 55                |
|            | 18:00 | 71              | 71                |
| 11/10/2020 | 10:00 | 91              | 91                |
|            | 18:00 | 12              | 103               |
| 12/10/2020 | 9:00  | 29              | 120               |
|            | 17:00 | 40              | 131               |
| 13/10/2020 | 8:00  | 53              | 144               |
|            | 16:00 | 66              | 157               |
| 14/10/2020 | 9:00  | 71              | 162               |
|            | 17:00 | 86              | 177               |
| 15/10/2020 | 9:00  | 95              | 186               |
|            | 17:00 | 10              | 196               |
| 16/10/2020 | 9:00  | 12              | 198               |
|            | 17:00 | 20              | 206               |
| 17/10/2020 | 9:00  | 27              | 213               |
|            | 17:00 | 35              | 221               |

Generación de gas en la CCM escala laboratorio



Medición del gas metano a partir del método de volumen desplazado CCM a escala banco

| Fecha      | Hora  | Gas metano (ml) | Generación de Gas |
|------------|-------|-----------------|-------------------|
| 9/10/2020  | 3:00  | 12              | 12                |
|            | 23:00 | 30              | 30                |
| 10/10/2020 | 10:00 | 68              | 68                |
|            | 18:00 | 93              | 98                |
| 11/10/2020 | 10:00 | 24              | 122               |
|            | 18:00 | 67              | 165               |
| 12/10/2020 | 9:00  | 91              | 189               |
|            | 17:00 | 29              | 218               |
| 13/10/2020 | 8:00  | 60              | 278               |
|            | 16:00 | 90              | 308               |
| 14/10/2020 | 9:00  | 31              | 339               |
|            | 17:00 | 63              | 371               |
| 15/10/2020 | 9:00  | 99              | 470               |
|            | 17:00 | 28              | 498               |
| 16/10/2020 | 9:00  | 75              | 545               |
|            | 17:00 | 97              | 642               |
| 17/10/2020 | 9:00  | 39              | 681               |
|            | 17:00 | 99              | 741               |

Generación de gas en la CCM a escala banco

**13.17. Anexo 17 Costo Celda de Combustible Microbiana**

|                                               |
|-----------------------------------------------|
| <b>COSTOS CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA</b> |
|-----------------------------------------------|

| ITEM         | DESCRIPCIÓN                           | UNIDAD | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL          |
|--------------|---------------------------------------|--------|----------|----------------|----------------------|
| 1            | <b>TRANSPORTE DE AGUAS RESIDUALES</b> |        |          |                |                      |
| 1.1          | Tubería Sanitaria (3")                | m      | 6        | \$ 10.400,00   | \$ 62.400,00         |
| 1.2          | Codos Sanitaria (3")                  | Und    | 9        | \$ 4.850,00    | \$ 43.650,00         |
| 1.3          | Soldadura PVC (28 ml)                 | Und    | 2        | \$ 4.000,00    | \$ 8.000,00          |
| 1.4          | Limpiador PVC                         | Und    | 2        | \$ 4.000,00    | \$ 8.000,00          |
| 1.5          | Adaptador para tanque Entrada (3")    | Und    | 4        | \$ 20.000,00   | \$ 80.000,00         |
| 1.6          | Adaptador para tanque Salida          | Und    | 4        | \$ 20.000,00   | \$ 80.000,00         |
| <b>TOTAL</b> |                                       |        |          |                | <b>\$ 282.050,00</b> |

| ITEM         | DESCRIPCIÓN                               | UNIDAD | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL            |
|--------------|-------------------------------------------|--------|----------|----------------|------------------------|
| 2            | <b>ALMACENAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</b> |        |          |                |                        |
| 2.1          | Tanque PVC (1 m3)                         | Und    | 4        | \$ 250.000,00  | \$ 1.000.000,00        |
| <b>TOTAL</b> |                                           |        |          |                | <b>\$ 1.000.000,00</b> |

| ITEM         | DESCRIPCIÓN                    | UNIDAD | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL          |
|--------------|--------------------------------|--------|----------|----------------|----------------------|
| 3            | <b>ALMACENAMIENTO DE GAS</b>   |        |          |                |                      |
| 3.1          | Bolsa de almacenamiento de gas | Und    | 1        | \$ 350.000,00  | \$ 350.000,00        |
| 3.2          | Adaptador de Salida (1/2")     | Und    | 4        | \$ 6.000,00    | \$ 24.000,00         |
| 3.3          | Abrazadera (1/2 ")             | Und    | 4        | \$ 3.900,00    | \$ 15.600,00         |
| <b>TOTAL</b> |                                |        |          |                | <b>\$ 389.600,00</b> |

| ITEM         | DESCRIPCIÓN                          | UNIDAD | CANTIDAD | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL          |
|--------------|--------------------------------------|--------|----------|----------------|----------------------|
| 4            | <b>ENERGIA</b>                       |        |          |                |                      |
| 4.1          | Malla alambre galvanizado            | m2     | 25       | \$ 8.000,00    | \$ 200.000,00        |
| 4.2          | Cable de cobre recubierto calibre 16 | m2     | 5        | \$ 8.000,00    | \$ 40.000,00         |
| 4.3          | lamina de grafito diámetro 3mm       | m2     | 3,12     | \$ 8.000,00    | \$ 24.960,00         |
| 4.4          | Batería                              | m2     | 6        | \$ 8.000,00    | \$ 48.000,00         |
| <b>TOTAL</b> |                                      |        |          |                | <b>\$ 312.960,00</b> |

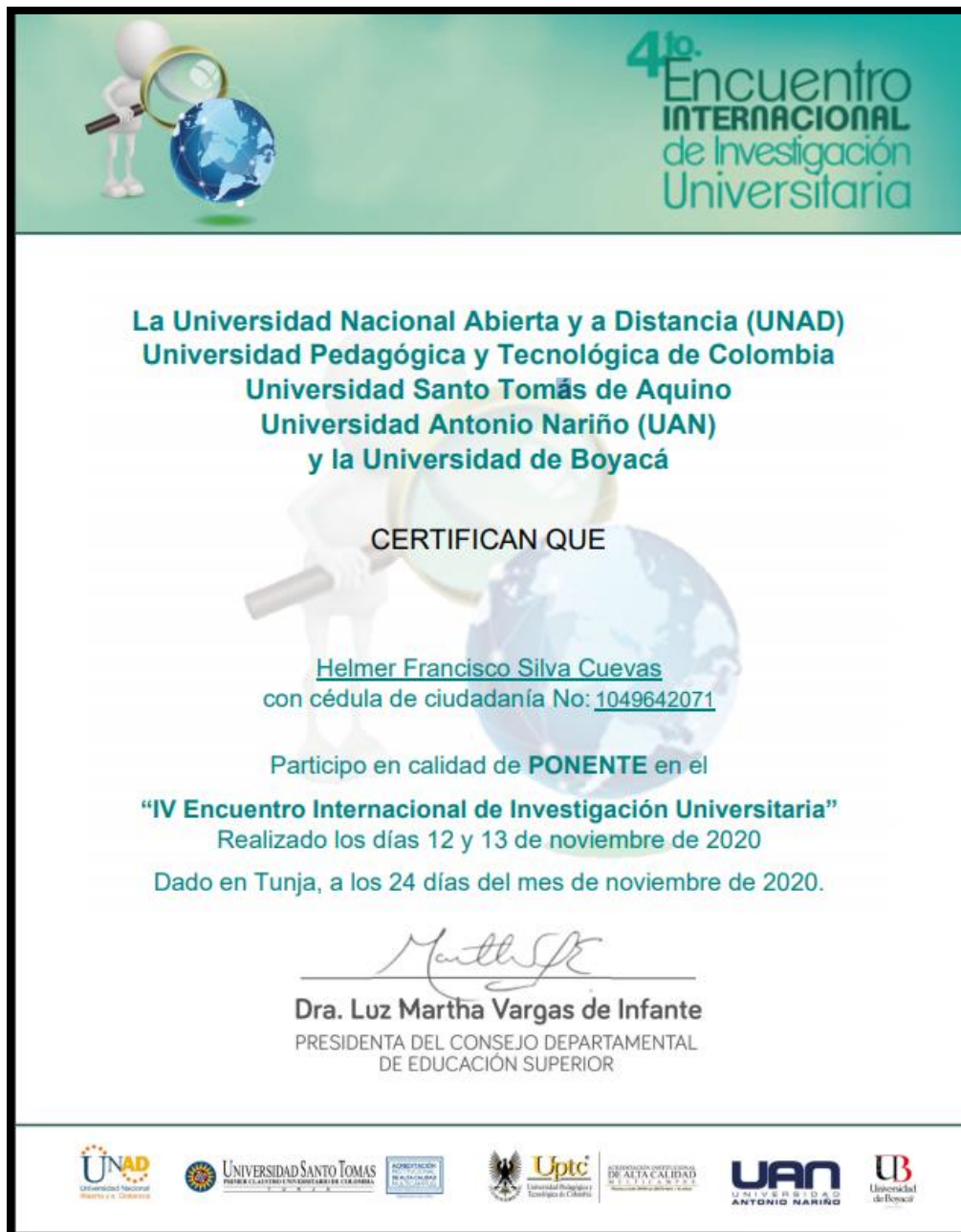
---

|                                      |  |  |  |  |                     |
|--------------------------------------|--|--|--|--|---------------------|
| <b>INVERSION TOTAL DE MATERIALES</b> |  |  |  |  | <b>\$ 1.984.610</b> |
|--------------------------------------|--|--|--|--|---------------------|

### 13.18. Anexo 18. Participación en eventos de investigación

Congreso Internacional Objetivos del Desarrollo Sostenible Esfuerzos en América Latina y el Caribe 2020







## 4to. Encuentro INTERNACIONAL de Investigación Universitaria

La Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
Universidad Santo Tomás de Aquino  
Universidad Antonio Nariño (UAN)  
y la Universidad de Boyacá

CERTIFICAN QUE

Julian Armando Peña Garcia  
con cédula de ciudadanía No: 1049652095

Participo en calidad de **PONENTE** en el  
“IV Encuentro Internacional de Investigación Universitaria”  
Realizado los días 12 y 13 de noviembre de 2020  
Dado en Tunja, a los 24 días del mes de noviembre de 2020.

**Dra. Luz Martha Vargas de Infante**  
PRESIDENTA DEL CONSEJO DEPARTAMENTAL  
DE EDUCACIÓN SUPERIOR



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE EDUCACIÓN Y CIENCIAS DE LA SALUD



Uptc  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia



UAN  
UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

