



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA
RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA,
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieros Ambientales

Autores:

Pérez Quiña Leonor Estefanía
Velasco Barros Alexander Vinicio

Tutor:

Ágreda Oña José Luis

LATACUNGA – ECUADOR Febrero 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Pérez Quiña Leonor Estefanía, con cédula de ciudadanía No. 1724668585 y Velasco Barros Alexander Vinicio con cédula de ciudadanía No. 1726346149, declaramos ser autores del presente Proyecto de Investigación: **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, siendo el Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg. Tutor del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 17 de febrero del 2025



Leonor Estefanía Pérez Quiña

C.C: 1724668585

ESTUDIANTE



Alexander Vinicio Velasco Barros

C.C: 1726346149

ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **PÉREZ QUIÑA LEONOR ESTEFANÍA**, identificada con cédula de ciudadanía **1724668585** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE** y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2021 - Agosto 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 12 de diciembre 2024

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 17 días del mes De febrero del 2025.



Leonor Estefanía Pérez Quiña

LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **VELASCO BARROS ALEXANDER VINICIO**, identificado con cédula de ciudadanía 1726346149 de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL CEDENTE** y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Abril 2021 - Agosto 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 12 de diciembre del 2024

Tutor: Ing. José Luis Ágreda Oña, Mg.

Tema: **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - **OBJETO DEL CONTRATO:** Por el presente contrato **EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **EL CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 17 días del mes de febrero del 2025.

Alexander Vinicio Velasco Barros

EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI” de Pérez Quiña Leonor Estefanía y Velasco Barros Alexander Vinicio, de la carrera de Ambiente, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 17 de febrero del 2024



Ing. José Luis Ágreda, Mg.
C.C: 0401332101
DOCENTE TUTOR

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Pérez Quiña Leonor Estefanía y Velasco Barros Alexander Vinicio, con el título de Proyecto de Investigación: **“DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 17 de febrero del 2025



Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante,
Mg.
C.C: 0502188451
LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Lic. Manuel Patricio Clavijo Cevallos,
PhD.
C.C: 0501444582
LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Andres Sebastian Moreno Avila, Mg.
C.C: 0503220063
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a mi madre Narcisa por ser mi inspiración y fuerza a cada momento de mi vida, ella ha sido mi pilar y la persona que siempre me da la mano para seguir adelante. Luego quiero agradecer a mi hermana Kimberly por siempre estar a mi lado y al pendiente de cada paso que daba en el transcurso de mi carrera, siempre me sacaba una sonrisa en mis peores momentos y sabía en todo momento que podía contar con ella para las que sea. Mis abuelitos papi Carlos y mami Flor que a pesar de la distancia siempre están al pendiente, se alegran por cada cosita que he venido haciendo durante toda mi vida, ellos son mi fortaleza y la familia por la que siempre velare. Ahora quiero agradecer a mi enamorado, que gracias a su apoyo incondicional ahora puedo terminar mi carrera a pesar de las adversidades, el desde que nos conocemos ha sido mi motor, fortaleza y paño de lágrimas y parte de todo lo que he logrado es del también. Por último, quiero agradecer a mi perrita Perla, que a pesar de estar en el cielo siempre fue mi felicidad y la perrita más fiel que he tenido a mi lado, hubiera deseado que todavía este a mi lado, pero sé que desde el cielo perruno me está alentando y está feliz por mi logro.

Leonor Estefanía Pérez Quiña

AGRADECIMIENTO

Primero agradecer a Dios, por permitirme culminar mi carrera, también a mi familia que estuvieron para mí, mis abuelitos que siempre me ampararon en mi proceso universitario, nunca me dejaron solo, muchas gracias papito Ángel, usted me enseñó a seguir adelante y ser un hombre de bien, ahora que no estás conmigo me haces mucha falta pero estás en el cielo cuidándome como un angelito TE AMARE MUCHO POR SIEMPRE, también muchas gracias mamita Tere que estuvo para mi ayudándome en todo lo que ha estado a su alcance, con sus palabras y consejos para el día a día. A mis padres también les agradezco mucho ya que siempre me acompañaron en todo momento, dios le pague mamita bella Mirian por nunca dejarme solo y siempre darme ánimos sobre todo cuando no he podido en los momentos difíciles, a mi papito Walter también le agradezco mucho porque me brindo muchas fuerzas para seguir adelante a pesar de la distancia. A mi hermano, que estuvo alentándome y brindándome compañía en cualquier momento. A mi novia con la que tuve el gusto de compartir y hacer este proyecto de investigación, gracias por apoyarme y ser mi sustento cada vez que lo necesitaba, así que este es un pasito más para ser grandes como lo hemos dicho para seguir adelante. Agradezco también a mi demás familia que estuvieron dándome cada palabra, ayuda, consejos, les doy un dios le pague por estar para mí y por creer en mí.

Alexander Vinicio Velasco Barros

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto y el fruto de mi esfuerzo a mi mamita hermosa, mi hermana querida, mi enamorado, a mis queridos abuelitos, mis gatitas Gema, Dorami y a mi Perlita que siempre han sido mi motor incondicional en cada paso que daba, ellos son mi inspiración de seguir siempre adelante y querer darles un mejor futuro. Todo el esfuerzo es dedicado a ellos que siempre serán el motor de mi corazón.

Leonor Estefanía Pérez Quiña

DEDICATORIA

Este triunfo lo dedico al cielo, ya que ahí está mi papito Ángel hermoso, que me acompañó desde el primer día y estuvo en mis mejores momentos, te mando un beso al cielo, también se lo dedico a mi mamita Tere que me apoyo sin desampararme, dios le pague papitos hermosos, de igual manera, a mi mami Mirian, papi Walter y hermano Sebas, porque gracias a su ayuda logre culminar mi proceso universitario, si no les tuviera no lo hubiera logrado. También a mi novia le dedico este proyecto ya que se cumplió la misión y que las duras batallas que tuvimos juntos, lo logramos y tenemos más misiones que conseguir en la vida, este es solo el comienzo, sigamos luchando por nuestros sueños.

Alexander Vinicio Velasco Barros

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TITULO: “DISEÑO DE UN BIORREACTOR A ESCALA PILOTO PARA RECUPERAR NUTRIENTES Y ENERGÍA DE LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL CAMPUS CEASA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”

Autores:

Pérez Quiña Leonor Estefanía
Velasco Barros Alexander Vinicio

RESUMEN

Los lodos residuales, al ser tratados en biorreactores, pueden transformarse en biogás, contribuyendo así a la generación de energía y promoviendo la sostenibilidad ambiental. En este contexto, el presente proyecto de investigación se enfocó en diseñar un biorreactor a escala piloto para recuperar nutrientes y energía de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus CEASA de la Universidad Técnica de Cotopaxi. El biorreactor se diseñó con un sistema de control programado en ARDUINO, que mantuvo la temperatura en 60°C durante un periodo de monitoreo de 32 días, con un pH que oscila entre 6.8 y 7.5. Estos parámetros fueron cruciales para optimizar la digestión anaeróbica y maximizar la producción de energía. Los análisis fisicoquímicos del lodo revelaron una demanda química de oxígeno de 198.22 mg/L y una demanda biológica de oxígeno de 74.93 mg/L. En cuanto a la recuperación de nutrientes, se obtuvo un 0.52 % de nitrógeno y un 0.0047 % de fósforo, lo que convierte al biol en un recurso valioso para la mejora de suelos. Sin embargo, se detectó arsénico en una concentración de 0.150 mg/L, superando el límite permitido de 0.1 mg/L. Para evaluar la producción de energía, se registraron 235 ppm de metano durante los 32 días de monitoreo, lo que resultó en una generación de 0.01503 kWh, suficiente para encender electrodomésticos por un tiempo limitado. Posteriormente, se realizó una extrapolación a 100 días, obteniendo 3339 ppm, lo que equivale a 0.1545 kWh, mejorando así la producción energética y prolongando el uso de los electrodomésticos. Este hallazgo destaca el potencial del biorreactor para contribuir a la generación de energía renovable a partir de lodos residuales, subrayando su importancia en la sostenibilidad y la economía circular.

Palabras clave: biol, digestión anaeróbica, lodo residual, metano, sostenible.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

THEME: “DESIGN OF A PILOT SCALE BIOREACTOR TO RECOVER NUTRIENTS AND ENERGY OF SEWAGE SLUDGE FROM THE CEASA CAMPUS TREATMENT PLANT, TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI”.

Authors:

Pérez Quiña Leonor Estefanía
Velasco Barros Alexander Vinicio

ABSTRACT

Sewage sludge, when treated in bioreactors, can be transformed into biogas, thus contributing to energy generation and promoting environmental sustainability. In this context, the present research project focused on designing a pilot-scale bioreactor to recover nutrients and energy from the sludge generated at the wastewater treatment plant of the CEASA Campus of the Technical University of Cotopaxi. The bioreactor was designed with a control system programmed in ARDUINO, which maintained the temperature at 60°C during a 32-day monitoring period, with a pH ranging between 6.8 and 7.5. These parameters were crucial to optimize anaerobic digestion and maximize energy production. Physicochemical analysis of the sludge revealed a chemical oxygen demand of 198.22 mg/L and a biological oxygen demand of 74.93 mg/L. In terms of nutrient recovery, 0.52 % nitrogen and 0.0047 % phosphorus were obtained, making the biol a valuable resource for soil improvement. However, arsenic was detected at a concentration of 0.150 mg/L, exceeding the permitted limit of 0.1 mg/L. To assess energy production, 235 ppm of methane were recorded during the 32 days of monitoring, resulting in a generation of 0.01503 kWh, sufficient to power appliances for a limited time. Subsequently, an extrapolation to 100 days was performed, resulting in 3339 ppm, equivalent to 0.1545 kWh, thus improving energy production and prolonging the use of household appliances. This finding highlights the potential of the bioreactor to contribute to renewable energy generation from sewage sludge, underlining its importance in sustainability and circular economy.

Key words: Biol, Anaerobic Digestion, Sewage Sludge, Methane, Sustainable

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vi
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	viii
AGRADECIMIENTO.....	xi
AGRADECIMIENTO.....	xii
DEDICATORIA.....	xiii
DEDICATORIA.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2

3. JUSTIFICACIÓN	3
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	3
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
6. OBJETIVOS.....	5
6.1. OBJETIVO GENERAL	5
6.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	5
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	8
8.1. Aguas residuales	8
8.2. Lodos residuales	9
8.3. Tratamiento de lodos residuales.....	9
8.4. Tipos de lodos residuales.....	9
8.4.1. Lodo crudo.....	9
8.4.2. Lodos primarios.....	9
8.4.3. Lodo activo	10
8.4.4. Lodos secundarios	10
8.4.5. Lodo digerido	10
8.5. Caracterización de lodos residuales.....	10
8.5.1. pH.....	10
8.5.2. Temperatura	10
8.5.3. Sólidos totales	11
8.5.4. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	11
8.5.5. Demanda química de oxígeno (DQO).....	11
8.5.6. Cromo.....	11
8.5.7. Hierro	11
8.6. Biorreactor.....	12
8.7. Biorreactor anaeróbico	12
8.8. Digestión anaeróbica	12
8.8.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH)	12
8.8.2. Proceso de digestión anaeróbica.....	12
8.8.3. Hidrólisis	13
8.8.4. Acidogénesis	13

8.8.5. Acetogénesis	13
8.8.6. Metanogénesis.....	13
8.9. Factores que afectan el proceso de digestión anaerobia.....	14
8.9.1. Fuente de carbón	14
8.9.2. Tamaño del sustrato.....	14
8.9.3. Inóculo.....	14
8.9.4. Temperatura	14
8.9.5. Humedad.....	14
8.9.6. Tiempos de retención hidráulica.....	15
8.10. Materia orgánica	15
8.11. Transformación de la materia orgánica.....	15
8.12. Remoción de materia orgánica:.....	15
8.13. Microorganismos	15
8.13.1. Aerobio	15
8.13.2. Anaerobio.....	16
8.14. Recuperación de energía.....	16
8.15. Recuperación de biogás	16
8.15.1. Metano	16
8.16. Recuperación de nutrientes	17
8.17. Reciclaje Energético.....	17
8.17.1. Fomento de plantas de cogeneración de energía	17
8.17.2. Incentivos para la inversión en tecnología limpia y energías renovables.....	17
8.17.3. Monitoreo y Control	17
8.18. Economía Circular	18
8.19. Ciclo del Carbono	18
8.20. Suelos Carbonados.....	18
8.21. Sistema operativo y control automatizado para el diseño del biodigestor	18
8.21.1. LM35 Sensor de Temperatura	18
8.21.2. Arduino	19
8.21.3. Tarjeta ESP32.....	19
8.21.4. Proto-Board.....	19
8.21.5. Sensor de temperatura analógico LM35	19
8.21.6. Relé de tiempo definido	19

9. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTA CIENTIFICA E HIPOTESIS	19
10. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
11. METODOLOGIA	21
11.1. ENFOQUE	21
11.1.1. Enfoque Cuantitativo	22
11.1.2. Enfoque Cualitativo	22
11.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	22
11.2.1. Investigación Bibliográfica	22
11.2.2. Investigación Descriptiva.....	23
11.2.3. Investigación de Campo.....	23
11.2.4. Investigación Analítica	23
11.3. MÉTODOS.....	24
11.3.1. Método de Análisis Físico-químicos.....	24
11.3.2. Método de Análisis Estadístico.....	24
11.3.3. Método de Producción Anaeróbica.....	24
11.4. TÉCNICAS	25
11.4.1. Técnica de Muestreo discreto	25
11.4.2. Técnica de Observación directa	25
11.4.3. Técnica de campo	25
11.5. EQUIPOS & MATERIALES	26
11.5.1. Equipos.....	26
11.5.2. Materiales.....	26
11.5.3. Reactivos.....	27
11.5.4. Software.....	27
11.6. SELECCIÓN DE PUNTO DE MUESTREO.....	27
11.7. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DE LODO RESIDUAL.....	28
11.7.1. pH.....	28
11.7.2. Conductividad Electrica	28
11.7.3. Temperatura	28
11.7.4. Salinidad	29
11.7.5. Sólidos Totales	29
11.7.6. Sólidos Volátiles.....	30

11.7.7. Sólidos Fijos.....	30
11.7.8. Demanda química de oxígeno	31
11.7.9. Demanda bioquímica de oxígeno.....	31
11.7.10. Arsenico	31
11.7.11. Hierro.....	31
11.7.12. Cromo.....	31
11.8. PROTOTIPO DEL BIORREACTOR A ESCALA PILOTO	32
11.8.1. DISEÑO DEL BIORREACTOR.....	32
11.8.2. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO DEL BIORREACTOR	32
11.9. DETERMINACIÓN DE ENERGÍA Y NUTRIENTES	34
11.9.1. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA	34
11.9.2. RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES.....	35
11.10. ANOVA	36
12. COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS Y RESPUESTAS DE INVESTIGACIÓN	36
13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	38
13.1. Zona de estudio.....	38
13.2. Caracterización del lodo residual	38
13.3. DISEÑO DEL BIORREACTOR A ESCALA PILOTO.....	43
13.4. RESULTADOS DE PROGRAMACIÓN	45
13.5. RESULTADOS DEL MONITOREO DEL BIORREACTOR A ESCALA PILOTO	46
13.6. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y COSTOS ENERGÉTICOS.....	50
13.7. RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES.....	57
13.8. RESULTADOS DEL ANALISIS DE VALIANZA.....	59
14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
14.1. CONCLUSIONES.....	60
14.2. RECOMENDACIONES	61
15. BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios directos e indirectos del proyecto.	3
Tabla 2. Actividades y metodología para el desarrollo del proyecto.	5
Tabla 3. Coordenadas del punto de muestreo.	26
Tabla 4. Resultados de parámetros fisicoquímicos del lixiviado del lodo residual.	36
Tabla 5. Resultados del proceso anaeróbico en el biorreactor (Metano, pH, Temperatura). ...	44
Tabla 6. Resultados de los macronutrientes del lodo residual.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de área de estudio.	19
Figura 2. Resultados de los análisis fisicoquímicos del lixiviado del lodo residual	39
Figura 3. Resultados de los análisis fisicoquímicos de sólidos totales, volátiles y fijos.	40
Figura 4. Diseño de biorreactor a escala piloto del proyecto de investigación.	42
Figura 5. Tablero de circuitos de conexión en base al lenguaje de programación planteado. .	43
Figura 6. Esquema de conexión en base al lenguaje de programación planteado.	44
Figura 7. Gráfico de dispersión de metano en función de los 32 días de monitoreo.....	46
Figura 8. Resultados del monitoreo de metano, pH y temperatura.	48
Figura 9. Resultados comparativos del biol de lodo residual y biol comercial.	56

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto: Diseño de un biorreactor escala piloto para recuperar nutrientes y energía de lodos residuales de la planta de tratamiento del Campus CEASA, Universidad Técnica de Cotopaxi

Fecha de inicio: octubre 2024

Fecha de finalización: marzo 2025

Lugar de ejecución: Campus de Experimentación Académica Salache (CEASA)

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería Ambiental

Equipo de trabajo:

Tutor: Ing. José Luis Agreda Oña, Mg.

Investigador 1: Leonor Estefanía Pérez Quiña.

Investigador 2: Alexander Vinicio Velasco Barros.

Lector 1: Ing. Vladimir Marconi Ortiz Bustamante, Mg.

Lector 2: Ing. Manuel Patricio Clavijo Cevallos, Ph.D.

Lector 3: Ing. José Andrés Moreno Ávila, Mg.

Área de conocimiento: Ambiente.

Línea de investigación: Análisis de recuperación de energía, nutrientes y protección ambiental.

Sublíneas de Investigación de la carrera: Manejo y conservación del recurso hídrico.

Línea de vinculación con la sociedad: Gestión de Recursos Naturales, Biodiversidad, Biotecnología y Genética, para el Desarrollo Humano y Social.

2. INTRODUCCIÓN

La gestión de los lodos residuales se presenta como una oportunidad valiosa en el ámbito del tratamiento de aguas y el manejo de residuos. Estos materiales, que se generan principalmente durante el tratamiento de aguas residuales, tienen un potencial significativo que, si se utilizan de manera adecuada, pueden contribuir a la sostenibilidad ambiental (Gil & León, 2021). Por ello, la búsqueda de soluciones eficientes y sostenibles para gestionar estos lodos se convierte en una prioridad. Esto nos permite transformar un desafío en una oportunidad para aprovechar recursos que, de otro modo, podrían considerarse desechos. Así, se abre un camino hacia prácticas innovadoras que no solo ayudan a mitigar los impactos ambientales, sino que también fomentan un uso más responsable y eficiente de los recursos que tenemos a nuestra disposición.

En este contexto, el proyecto de diseño de un biorreactor a escala piloto, utilizando lodos residuales de la planta de tratamiento del Campus CEASA, se presenta como una solución innovadora y sostenible. Este biorreactor tiene como objetivo transformar los residuos orgánicos en recursos valiosos, como biogás y nutrientes. Los nutrientes generados se capturan y reutilizan, lo que no solo reduce la necesidad de insumos adicionales, sino que también contribuye a un tratamiento de residuos más sostenible. A través de un proceso controlado, se optimiza el procesamiento de la materia orgánica contenida en los lodos, lo que resulta en un manejo más eficiente de estos materiales. Según Castillo et al. (2020), la implementación de este biorreactor no solo representa un avance significativo hacia una gestión más eficiente de los residuos, sino que también muestra cómo la tecnología puede integrarse de manera armoniosa con el entorno, generando beneficios tanto ambientales como energéticos.

Este enfoque no solo es beneficioso desde el punto de vista ambiental, sino que también impulsa la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías (Pincay et al., 2023). La optimización de este proceso a través del proyecto piloto proporciona datos valiosos que pueden ser utilizados para implementar sistemas similares a gran escala. Además, el biorreactor genera biogás, una fuente de energía renovable que se aprovecha para satisfacer parte de las necesidades energéticas del sistema. De esta manera, se posiciona como una opción ideal para tratar los lodos residuales de forma sostenible, transformando lo que normalmente se considera un desperdicio en un recurso útil y valioso.

3. JUSTIFICACIÓN

Construir un biorreactor a escala piloto fue un paso fundamental para validar y optimizar las condiciones operativas y técnicas del proceso de tratamiento de lodos residuales antes de su implementación a gran escala. Esta etapa piloto permitió evaluar el rendimiento del sistema en condiciones controladas y ajustar variables clave, como la temperatura, la carga orgánica y el tiempo de retención, con el objetivo de maximizar la producción de biogás y la eficiencia en la degradación de los contaminantes (Izamara & Macedo, 2022). Además, el desarrollo de un biorreactor a escala piloto proporcionó información valiosa sobre el comportamiento del sistema en función de la variabilidad de los lodos generados, lo que facilitó la identificación de posibles problemas operativos o de diseño.

Este proyecto ha impulsado el desarrollo de nuevos enfoques que mejoran los procesos de digestión anaerobia. Los avances teóricos logrados no solo optimizaron la eficiencia de los sistemas de tratamiento de residuos, sino que también proporcionaron herramientas valiosas para futuras investigaciones sobre la gestión de lodos y la producción de biogás (Cárdenas & Molina, 2022). Al integrar modelos predictivos, se lograron optimizar los parámetros operativos de los biorreactores, lo que resultó en una mayor eficiencia tanto en la producción de energía como en la recuperación de nutrientes. A pesar de que los lodos contienen compuestos constitutivos, microorganismos y contaminantes orgánicos, se gestionaron alternativas innovadoras de gran relevancia, las cuales favorecieron la sostenibilidad y ayudaron a enfrentar los desafíos ambientales actuales.

Asimismo, el proyecto representó una oportunidad de innovación tecnológica que permitió reducir los costos asociados con el tratamiento y la disposición final de los lodos residuales. Al transformar los lodos en biogás y materiales reutilizables, no solo se mejoró la eficiencia operativa de las plantas de tratamiento, sino que también se generaron fuentes de ingresos adicionales mediante la producción de energía renovable (Yugla, 2024). De esta manera, el proyecto promovió una economía circular que favoreció la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

En la **Tabla 1** se indica los beneficiarios directos e indirectos.

Tabla 1. Beneficiarios directos e indirectos del proyecto.

Directos	Indirectos
Campus CEASA	Universidad Técnica de Cotopaxi
Docentes: 86	Docentes: 350
Estudiantes: 2 440	Estudiantes: 11 580
Total: 2 526	Total: 11 930

Nota. Esta tabla refleja los beneficiarios directos e indirectos del proyecto.

Fuente. (UTC, 2025).

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La gestión de lodos es uno de los desafíos ambientales más complejos y preocupantes relacionados con el tratamiento de aguas residuales, ya que estos lodos contienen microorganismos patógenos que representan riesgos para la salud y el medio ambiente. La disposición final de los lodos residuales conlleva costos económicos muy altos, debido a la necesidad de instalar reactores estabilizadores o sistemas de deshidratación e incineración para su tratamiento y eliminación (Castillo et, al. 2020). Por esta razón, en muchas ocasiones, estos lodos son vertidos en el drenaje, descargados en cuerpos de agua superficiales, llevados a rellenos sanitarios e incluso incinerados sin las protecciones adecuadas para prevenir la contaminación ambiental.

Según Montoya (2023) estos lodos, según su tipo, pueden presentarse en diversas formas: líquidos, sólidos o semisólidos. Esta falta de regulación específica sobre los niveles de acumulación de lodos puede generar problemas ambientales y de salud si no se gestionan adecuadamente, ya que estos residuos pueden contener sustancias peligrosas. Además, contaminantes como metales pesados (plomo, mercurio, cromo, arsénico) y productos químicos industriales pueden llegar a los lodos residuales debido a actividades como la minería, el vertido de desechos de fábricas o el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes (Toapaxi, 2022). La falta de regulación específica sobre los niveles de acumulación de estos lodos puede generar serios problemas ambientales y de salud si no se gestionan adecuadamente. Es más, entre los contaminantes más comunes se encuentran los desechos sólidos, grasas, aceites y plásticos, que deterioran la calidad del lodo residual, alterando los ecosistemas acuáticos y afectando la salud de las personas (Santillán, 2021).

Esta situación resalta la urgencia de mejorar los sistemas de tratamiento de aguas residuales en el Campus CEASA y de implementar políticas más efectivas para mitigar la contaminación. Esto no solo contribuirá a minimizar el impacto negativo en la salud pública y el medio ambiente, sino que también permitirá establecer un modelo de gestión sostenible que beneficie a toda la comunidad. La implementación de políticas más efectivas y la mejora de los sistemas de tratamiento son pasos cruciales para enfrentar este desafío ambiental (Cárdenas & Molina, 2022).

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL.

Diseñar un biorreactor a escala piloto para recuperar nutrientes y energía de lodos residuales de la planta de tratamiento del campus CEASA, Universidad Técnica de Cotopaxi.

6.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Realizar análisis fisicoquímicos del lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus CEASA, Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Diseñar el prototipo del biorreactor a escala piloto con los parámetros operacionales como la temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica y metano.
- Evaluar el rendimiento del lodo residual dentro del biorreactor en cuanto a la recuperación de energía y nutrientes.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Acorde a los objetivos establecidos, se proyectaron a dar cumplimiento a las metodologías y actividades utilizadas, para que nos direccionen a los resultados esperados. Por lo tanto, en la **Tabla 2** se detalla lo mencionado:

Tabla 2. Actividades y metodología para el desarrollo del proyecto.

Objetivos	Actividades	Metodología	Resultados
-----------	-------------	-------------	------------

<p>Realizar análisis físico-químicos del lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus CEASA,</p>	<p>Identificación del área de estudio para la toma de muestra. Recolección de la muestra de lodo residual de la</p>	<p>Investigación en campo. Selección del punto de muestreo. Recolección de muestras para</p>	<p>Caracterización físico-química de lodo residual donde se analizó: pH, Conductividad Eléctrica,</p>
<p>Universidad Técnica de Cotopaxi.</p>	<p>planta de tratamiento de aguas residuales. Informe de resultados de pruebas físicas y químicas con el lodo residual.</p>	<p>análisis y tratamiento. Aplicación de Estándar Methods. Aplicación de y ANOVA boxplots.</p>	<p>Temperatura, Salinidad, Sólidos Totales, Fijos y Volátiles, DQO, DBO₅, Metales pesados (Cromo, Hierro y Arsénico).</p>

<p>Diseñar el prototipo del biorreactor a escala piloto con los parámetros operacionales como la temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica y metano.</p>	<p>□ Selección de los requisitos, materiales y componentes a colocar en el biorreactor a escala piloto. Elaboración del lenguaje programación ARDUINO. Diseñar el sistema control con los parámetros y el operacionales.</p> <p>□ Construcción montaje del prototipo a escala piloto.</p>	<p>Investigación bibliográfica. Diseño del biorreactor. Lenguaje de programación Técnica de observación directa.</p>	<p>□ El biorreactor adecuado para el tratamiento del lodo residual con implementación a largo plazo con viabilidad técnica. Eficacia del biorreactor en el periodo de los 32 días de TRH.</p>
<p>Evaluar el rendimiento del lodo residual dentro del</p>	<p>□ Colocar 9L de muestra de lodo</p>	<p>□ Monitoreo análisis.</p>	<p>y □ Nivel de eficacia del sistema del</p>
<p>□ Evaluación de rendimiento en</p>			

bioreactor en residual en el cuanto a la energía y bioreactor y del bioreactor.		energía y nutrientes		bioreactor y del lodo residual.
recuperación de	□ Tomar	recuperados.		□ Análisis del lodo
energía y nutrientes.	diariamente los	□ Análisis matemático.		residual y metano obtenido del
	datos de			bioreactor para plantear el uso al
	producción de			que se puede llegar a dar.
	metano,			
	temperatura y			
	pH.			
	□ Realizar análisis del			
	lodo residual			
	en base a los			
	macroelementos			
	(Nitrógeno,			
	Fosforo y			
	Potasio)			

Nota. Esta tabla muestra la organización en base a los objetivos planteados.

Fuente. Elaborado por los autores.

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1. Aguas residuales.

Las aguas residuales son aquellas cuyo estado original ha sido alterado debido a diversas actividades humanas. Estas aguas, por su calidad, requieren un tratamiento previo antes de poder ser reutilizadas, liberadas en cuerpos naturales de agua o descargadas al sistema de alcantarillado, es por esto que para Quintero (2022) las aguas residuales poseen un aproximado del 99.9 % de agua y el resto está formado por sólidos orgánicos, procedentes de la acción humana y por minerales provenientes de los subproductos de desecho de la cotidianidad humana y la calidad del agua. Las aguas residuales se pueden clasificar en:

En todos estos lugares, las actividades diarias producen residuos que terminan contaminando el agua, lo que requiere un tratamiento adecuado para evitar impactos negativos en el medio

ambiente, otro aspecto muy relevante que provoca grandes daños es la acumulación de aguas residuales en estos entornos ya que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente si no se les da un tratamiento adecuado. Es por esto que las aguas residuales suelen clasificarse en domésticas e industriales.

8.2. Lodos residuales.

Para Toapaxi (2022), los lodos activados residuales son una mezcla de agua y sólidos correspondientes al producto de la concentración y acumulación de sólidos existentes en el efluente tratado en la PTAR, que pueden ser reutilizados después de ser estabilizados. Una vez que los lodos han sido estabilizados, es posible darles un nuevo uso o, en algunos casos, eliminarlos de manera segura. El proceso de estabilización ayuda a reducir los riesgos y hacer que estos lodos sean menos perjudiciales para el medio ambiente si se deciden reutilizar.

8.3. Tratamiento de lodos residuales.

Para Saldaña & Castillo (2022) el manejo inadecuado de los lodos residuales ha surgido principalmente por la falta de conocimiento sobre las diferentes opciones de estabilización disponibles, lo que genera focos de contaminación debido a las características propias de estos lodos. La necesidad de estabilizar o tratar los lodos depende de cómo se planea disponer de ellos o reutilizarlos, y su tratamiento tiene tres objetivos clave: eliminar los malos olores, reducir el riesgo de putrefacción y disminuir la carga de patógenos presentes en ellos.

8.4. Tipos de lodos residuales.

8.4.1. Lodo crudo.

Se trata de un tipo de lodo que no ha pasado por ningún tratamiento ni proceso de estabilización, y que puede ser extraído directamente de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Este lodo suele generar problemas como la acidificación durante el proceso de digestión y emite malos olores debido a su composición (Toro & Goya, 2023).

8.4.2. Lodos primarios.

Estos lodos provienen de la sedimentación primaria, un proceso en el que se eliminan los sólidos que se depositan en el fondo. Están compuestos principalmente por una mezcla de arena fina, sólidos inorgánicos y materia orgánica (Toro & Goya, 2023).

8.4.3. Lodo activo.

Es el producto que se obtiene del tratamiento biológico de aguas residuales, en el que intervienen diferentes tipos de microorganismos para descomponer la materia orgánica. Este lodo tiene una forma de pequeñas agrupaciones llamadas flóculos, que contienen tanto biomasa como minerales que han sido absorbidos y almacenados durante el tratamiento (Castillo et al. 2020).

8.4.4. Lodos secundarios.

Estos lodos se producen durante el tratamiento secundario biológico de aguas residuales, un proceso en el que los microorganismos convierten los residuos o sustancias solubles en biomasa. Además, incluyen la materia particulada que queda en el agua tras la sedimentación primaria, es decir, los sólidos que no se eliminaron en la primera etapa del tratamiento (Castillo et al. 2020).

8.4.5. Lodo digerido.

En la opinión de (Raez et, al. 2024) los lodos se generan durante el proceso de digestión aeróbica. Tienen un color negro y contienen una cantidad significativa de gas. Si el proceso de digestión se realiza correctamente, el lodo prácticamente no emite olor o, en su defecto, produce un olor suave y no desagradable.

8.5. Caracterización de lodos residuales.

8.5.1. pH.

Es una medida que nos indica si una solución es ácida o alcalina, a través de la cantidad de iones presentes en ella. Se mide utilizando una escala que va del 0 al 14. Cuando el pH es menor a 7 o se acerca al 0, significa que la solución es ácida. En cambio, si el valor del pH está por encima de 7 o se acerca al 14, indica que la solución es básica o alcalina (Encalada, 2024). Este sistema de medición es fundamental para comprender las características de las sustancias disueltas en un líquido

8.5.2. Temperatura.

El proceso comienza con la temperatura a nivel ambiente, asegurando que ambos sistemas estén a la misma temperatura inicial. Esta temperatura es una variable que cambia a medida que avanza el proceso de estabilización de los lodos, ya que el crecimiento de los microorganismos genera un aumento de la temperatura durante el desarrollo del proceso (Ramírez, 2021).

8.5.3. Sólidos totales.

Se refiere a cualquier sustancia que se encuentra disuelta o suspendida en el agua. Para medir los sólidos disueltos totales, se evalúa el residuo sólido que permanece después de filtrar el agua a través de una membrana con poros de 2,0 μm (o más pequeños), lo que incluye tanto sales como residuos orgánicos (Quispe & Azabache, 2022).

8.5.4. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Es un parámetro que se utiliza para medir la cantidad de oxígeno que requieren las bacterias para descomponer la materia orgánica presente en las aguas residuales. Este valor ayuda a evaluar el nivel de contaminación orgánica en el agua, ya que cuanto mayor sea la DBO, mayor será la cantidad de materia orgánica que debe descomponerse (Saltos, 2023).

8.5.5. Demanda química de oxígeno (DQO).

Es una medida de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar todos los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua, utilizando un oxidante fuerte en un ambiente ácido. Este valor se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg O₂/l). En el proceso, la materia orgánica se convierte en dióxido de carbono y agua (Saltos, 2023).

8.5.6. Cromo.

El cromo, aunque se encuentra de forma natural en la tierra, se convierte en un contaminante peligroso cuando se encuentra en lodos residuales. En estos lodos, el cromo se combina con otras sustancias químicas como amoníacos, cloruros, sulfatos, cianuros y nitratos, formando complejos estables. Esta interacción lo hace aún más tóxico, lo que representa una amenaza para los organismos que se encuentran en los lodos (Carrillo et al., 2021). La presencia de cromo en el lodo puede ser muy dañina para el medio ambiente y la salud humana.

8.5.7. Hierro.

El metal pesado de hierro, está presente en las aguas residuales principalmente debido a la producción de acero y otros materiales industriales. En estas aguas, se encuentra en su forma trivalente, especialmente en las superficiales. Estos compuestos químicos causan graves problemas ambientales y de salud, afectando tanto el ecosistema como a los seres vivos que dependen del agua (Carrillo et al., 2021).

8.6. Biorreactor.

Un biorreactor es un equipo o contenedor diseñado para mantener las condiciones ideales para el crecimiento de los microorganismos, tales como el pH, la temperatura, la concentración de oxígeno, el flujo de gases, el oxígeno disuelto y la velocidad de agitación. De este modo, el biorreactor crea un ambiente controlado que asegura y favorece la producción y el desarrollo óptimo de los microorganismos que se cultivan dentro de él (Fajardo & Lodoño, 2020).

8.7. Biorreactor anaeróbico.

Para González (2020) los digestores anaeróbicos se emplean principalmente para estabilizar los lodos primarios y secundarios generados durante el tratamiento de aguas residuales. También son utilizados para tratar efluentes industriales y agrícolas que contienen una alta concentración de sólidos en suspensión. Estos digestores permiten descomponer los materiales orgánicos de manera eficiente, favoreciendo su tratamiento y reduciendo su impacto ambiental.

8.8. Digestión anaeróbica.

La digestión anaeróbica que tiene lugar en el reactor es un proceso biológico en el que las bacterias anaeróbicas descomponen la materia orgánica. El propósito de este proceso es que las bacterias obtengan energía para su supervivencia y, como resultado, generen gas metano (Castro, 2020).

8.8.1. Tiempo de retención hidráulica (TRH).

Es la relación entre el volumen del reactor y el caudal de alimentación. Este parámetro indica el tiempo promedio durante el cual las células y los sustratos permanecen dentro del reactor, lo que es clave para el proceso de tratamiento o reacción en ese sistema (Cedeño & Lascano, 2023).

8.8.2. Proceso de digestión anaeróbica.

Para De La Cueva et. al, (2021) el proceso anaerobio es una descomposición natural de materiales orgánicos, como carbohidratos, proteínas y grasas, que ocurre en ausencia de oxígeno. A través de la acción de microorganismos, estos compuestos se transforman en productos finales, como biogás y otros subproductos, este proceso combina eficiencia y sostenibilidad para gestionar de mejor manera los residuos orgánicos mientras se generan recursos útiles y estos se llevan a cabo en cuatro etapas que son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis:

8.8.3. Hidrólisis.

En un equipo de descomposición, donde las moléculas grandes y complejas, como carbohidratos, proteínas y grasas, se rompen en piezas más pequeñas y manejables. Imagínalo como si fuera un rompecabezas que se desarma para que otros puedan trabajar con las piezas más fácilmente. En este caso, son los microorganismos los que actúan como "desarmadores", preparando todo para las siguientes etapas del proceso. Es esencialmente el momento en que lo complicado se simplifica, abriendo el camino para transformaciones más profundas (Lamas & Massa, 2022).

8.8.4. Acidogénesis.

Toma las piezas más pequeñas resultantes de la hidrólisis y las transforman en compuestos aún más simples, como ácidos orgánicos, alcoholes y otros subproductos. Imagínalo como una cocina donde los ingredientes ya cortados se empiezan a cocinar para darles un nuevo sabor y forma. En este caso, las bacterias son los "chefs" que trabajan en ausencia de oxígeno, preparando todo para que, en las siguientes etapas, se puedan crear productos finales como el biogás. Es un paso clave donde la materia orgánica sigue descomponiéndose, acercándose cada vez más a su transformación final (Lamas & Massa, 2022).

8.8.5. Acetogénesis.

Es la etapa en la que los microorganismos toman los compuestos simples creados en la acidogénesis, como ácidos y alcoholes, y los convierten en ingredientes clave para la última fase del proceso. Imagínalo como un equipo de ensamblaje que prepara las piezas finales antes de que todo esté listo. En este caso, las bacterias transforman esos compuestos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, que son esenciales para la producción de metano en la siguiente etapa (Lamas & Massa, 2022).

8.8.6. Metanogénesis.

Es la etapa final del proceso, donde los microorganismos, específicamente las arqueas metanógenas, toman los productos de la acetogénesis, como el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono, y los transforman en metano y otros subproductos. Este proceso es crucial para la gestión de residuos orgánicos, ya que permite que los desechos sean tratados de manera eficiente y sostenible, generando energía y reduciendo la necesidad de vertederos (López et al. 2022).

8.9. Factores que afectan el proceso de digestión anaerobia.

8.9.1. Fuente de carbón.

El rendimiento teórico de biogás depende del contenido de carbohidratos, proteínas y lípidos presentes en los sustratos. Los lípidos generan el mayor rendimiento de biogás, pero necesitan un tiempo de retención más largo debido a su lenta biodegradabilidad. Por otro lado, los carbohidratos y las proteínas tienen tasas de conversión más rápidas, aunque producen rendimientos de biogás más bajos en comparación con los lípidos (Julio, 2016).

8.9.2. Tamaño del sustrato.

El tamaño de partícula del sustrato puede tener un impacto significativo en la velocidad de degradación, ya que influye en el área superficial disponible para que los microorganismos realicen el proceso de descomposición. Cuantas más pequeñas sean las partículas del sustrato, mayor será la velocidad de degradación, ya que los microorganismos tienen más área para trabajar (Montoya, 2023).

8.9.3. Inóculo.

El arranque de los sistemas de digestión anaeróbica es una fase crucial y delicada para asegurar una operación exitosa. Durante esta etapa, se añade una cantidad específica de inóculo al digestor junto con el sustrato, con el fin de proporcionar los microorganismos necesarios para iniciar el proceso de digestión de manera adecuada (Pulgarín et al. 2023).

8.9.4. Temperatura.

Existen dos rangos de temperatura clave para la digestión anaeróbica: mesófilo y termófilo. La temperatura óptima para el proceso mesofílico se encuentra aproximadamente a 35°C, mientras que, para el proceso termofílico, la temperatura ideal es alrededor de 55°C (Pulgarín et al. 2023).

8.9.5. Humedad.

La humedad es un factor crucial que influye en la eficiencia de la digestión anaeróbica, ya que facilita la disolución de nutrientes y sustratos, permitiendo que los microorganismos los asimilen de manera efectiva para llevar a cabo el proceso de descomposición (León et al. 2023).

8.9.6. Tiempos de retención hidráulica.

El tiempo de retención hidráulica en los reactores es el tiempo que el sustrato permanece dentro del digestor. En los digestores continuos y semicontinuos, el TRH se calcula dividiendo el volumen de carga diaria entre el volumen total del digestor, y este valor se expresa en días, lo que indica el tiempo promedio que el sustrato pasa dentro del sistema antes de ser renovado (León et al. 2023).

8.10. Materia orgánica.

Estos lodos son subproductos generados en el proceso de depuración del agua, y contienen tanto materia orgánica que puede descomponerse fácilmente como aquella que no es biodegradable. Su origen está en la descomposición de los materiales orgánicos presentes en las aguas residuales durante el proceso de tratamiento (Osorio et. al, 2021).

8.11. Transformación de la materia orgánica.

La transformación bacteriana del material orgánico biodegradable, que ocurre a temperaturas que van desde el ambiente hasta los 65°C, da lugar a un gas de alto contenido energético conocido como biogás. Además de este gas, la descomposición de la materia orgánica produce otros subproductos, que incluyen la parte mineral de la materia y compuestos de difícil degradación (Porteiro, 2021).

8.12. Remoción de materia orgánica:

Se lleva a cabo principalmente a través de procesos de biodegradación aeróbica o anaeróbica. Aunque la materia orgánica se asocia con los sólidos en suspensión, también se eliminan pequeñas cantidades mediante procesos físicos, como la sedimentación y la filtración. Estos métodos contribuyen a la purificación del agua o residuos, mejorando su calidad. Además de la biodegradación, la materia orgánica también se puede eliminar de manera más física, por ejemplo, por sedimentación, donde los sólidos más pesados se hunden en el fondo del agua o residuo (Castillo et, al. 2021).

8.13. Microorganismos.

8.13.1. Aerobio.

Para Saltos (2023) las bacterias aeróbicas viven en ambientes con oxígeno y pueden prosperar en un rango de temperaturas de 20 °C a 45 °C, siendo su temperatura ideal entre 30 °C y 40 °C. Estas bacterias son un indicador importante de la calidad higiénica del agua o producto

analizado, ya que su presencia sugiere posibles contaminaciones. También son comunes en aguas contaminadas.

8.13.2. Anaerobio.

Los microorganismos anaeróbicos forman parte del microbiota que, en ausencia de oxígeno, descompone la materia orgánica compleja en productos finales como metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, agua y amoníaco, mediante un proceso mutualista. Durante este proceso, entre el 70% y el 90% de la materia orgánica en las aguas residuales se convierte en biogás (Saltos, 2023).

8.14. Recuperación de energía.

Para Santamaría (2022) los avances recientes en la obtención de energía a partir de los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales, especialmente en entornos industriales, están contribuyendo a generar nuevos conocimientos sobre cómo aprovechar este recurso. Estos desarrollos permiten explorar diferentes alternativas para tratar las aguas residuales, al mismo tiempo que se produce energía. Este enfoque no solo ayuda a eliminar aguas potencialmente contaminadas, sino que también abre la puerta a soluciones más sostenibles y eficientes para gestionar ambos, el agua y la energía.

8.15. Recuperación de biogás.

El biogás obtenido es una mezcla compuesta principalmente por metano, dióxido de carbono y otras impurezas. Al someterlo a un proceso de purificación, se puede obtener un gas con un contenido de metano del 97% o más, lo que lo hace adecuado para su uso como fuente de energía. Por esto la recuperación de biogás también tiene un impacto positivo en la gestión de residuos. Al utilizar estos residuos orgánicos de manera eficiente, se puede minimizar la cantidad de desechos que terminan en vertederos, reduciendo así la contaminación y mejorando la sostenibilidad del proceso (Castillo et, al. 2021).

8.15.1. Metano.

El metano es un gas de efecto invernadero muy potente que contribuye al calentamiento global. Además, deteriora la calidad del aire al promover la formación de ozono troposférico, un contaminante atmosférico que es perjudicial para la salud (Nguyen et, al. 2023).

8.16. Recuperación de nutrientes.

Es un proceso fundamental para hacer más sostenibles los sistemas de tratamiento de agua, reducir la contaminación y aprovechar nutrientes valiosos como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Cuando estos nutrientes se liberan sin control en el medio ambiente, pueden provocar eutrofización en los cuerpos de agua, lo que afecta la calidad del agua y la biodiversidad. Sin embargo, si se gestionan correctamente, estos mismos nutrientes se pueden reutilizar en la agricultura y otros sectores, convirtiéndose en recursos valiosos que contribuyen a la economía circular y al cuidado del medio ambiente (Santamaría, 2022).

8.17. Reciclaje Energético.

8.17.1. Fomento de plantas de cogeneración de energía.

Castillo et. al, (2020) da a conocer que existen instalaciones especializadas que no solo se encargan de tratar los lodos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, sino que también aprovechan estos residuos para generar energía. Este proceso es un excelente ejemplo de cómo la tecnología puede transformar un desecho en un recurso valioso.

8.17.2. Incentivos para la inversión en tecnología limpia y energías renovables.

Según Moreno et, al. (2021) estas medidas no solo buscan aliviar la carga económica que supone la implementación de estas tecnologías, sino también reconocer el valor ambiental y social que aportan. Al transformar los lodos en biogás y, posteriormente, en electricidad o calor, estas instalaciones no solo resuelven un problema de residuos, sino que también contribuyen a generar energía limpia y renovable.

8.17.3. Monitoreo y Control.

El monitoreo y la supervisión son pilares esenciales para asegurar que las estrategias de manejo de lodos se lleven a cabo de manera efectiva y segura. Sin un seguimiento adecuado, incluso las mejores políticas y tecnologías podrían fallar en proteger el medio ambiente y la salud pública. Por eso, muchas políticas nacionales incluyen mecanismos robustos para garantizar que estas prácticas se implementen correctamente (Castillo et. al, 2020). En conjunto, estas medidas de monitoreo y supervisión no solo protegen el medio ambiente, sino que también construyen confianza en las estrategias de manejo de lodos, demostrando que es posible gestionar estos residuos de manera segura y sostenible.

8.18. Economía Circular.

Según Correa (2022) la economía circular es un modelo cuyo objetivo principal es optimizar el uso de los recursos disponibles, tanto energéticos como materiales, para que estos se mantengan el mayor tiempo posible en el ciclo productivo. Este enfoque busca minimizar al máximo la generación de residuos, fomentando la reutilización de aquellos que no se han podido aprovechar completamente. Además, promueve la renovación, el reciclaje y otras prácticas que permiten darle una segunda vida a los recursos y reducir el impacto ambiental.

8.19. Ciclo del Carbono.

El CO₂ en la atmósfera representa casi el 71,5% de los gases de efecto invernadero. Las plantas ayudan a almacenar carbono al absorberlo durante la fotosíntesis, y luego lo llevan al suelo cuando las hojas caen y se descomponen, formando una reserva de carbono en el suelo. Este intercambio de carbono entre el suelo y el aire se da gracias a procesos naturales como la fotosíntesis y la respiración, así como las emisiones humanas. El CO₂ y el vapor de agua son esenciales para mantener la temperatura del planeta. Además, el metano (CH₄), otro gas natural del ciclo del carbono, es el segundo gas más común de carbono en la atmósfera. Se produce cuando la materia orgánica se descompone sin oxígeno, y es mucho más potente que el CO₂, absorbiendo 20 veces más radiación infrarroja

8.20. Suelos Carbonados.

Los suelos carbonados en áreas poco desarrollados y tienen una acumulación de carbonatos y sales solubles. La cantidad y distribución de estas sales dependen del flujo de agua en el suelo. En lugares con poca lluvia, la evaporación favorece que las sales se concentren en la capa superior del suelo. Los carbonatos secundarios se quedan atrapados en la red porosa del suelo, y con los ciclos de humedecimiento y secado, y la absorción de agua por las plantas, las sales se precipitan según su solubilidad. Primero se forman carbonatos de calcio y magnesio, y luego el sulfato de magnesio, que permanece en disolución y marca las sales en el perfil del suelo (Reinoso, 2020).

8.21. Sistema operativo y control automatizado para el diseño del biodigestor.

8.21.1. LM35 Sensor de Temperatura.

Es muy utilizado para medir la temperatura ambiental con gran precisión. Su funcionamiento se basa en la variación del voltaje de salida en relación con la temperatura, lo que lo convierte en una herramienta fácil de integrar en proyectos electrónicos. Gracias a su salida analógica

lineal, es muy sencillo conectarlo y leerlo con microcontroladores, como los de la plataforma Arduino. (Swapna et al, 2020).

8.21.2. Arduino.

Es un dispositivo electrónico que cuenta con un microcontrolador, lo que le permite procesar datos y llevar a cabo diversas tareas, como mover un motor, detectar la presencia de un objeto, medir el tiempo entre dos eventos, encender o apagar una luz, entre otras (Sepúlveda & García, 2022).

8.21.3. Tarjeta ESP32.

Es un sistema de bajo consumo y bajo costo en un chip SoC (System On Chip) con Wi-Fi y modo dual con Bluetooth. En el fondo, hay un microprocesador Tensilica Xtensa LX6 de doble núcleo o de un solo núcleo con una frecuencia de reloj de hasta 240MHz (Bruno, 2019).

8.21.4. Proto-Board.

Es una placa de pruebas que permite la construcción de circuitos digitales y el software Crocodile Clips permite realizar diversas simulaciones sobre el funcionamiento de los circuitos digitales (Salas, 2021).

8.21.5. Sensor de temperatura analógico LM35.

Es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de 1°C y un rango que abarca desde 55° a +150°C (Salas, 2021).

8.21.6. Relé de tiempo definido.

Está configurado para controlar diferentes niveles de corrientes en diferentes tiempos de operación, es decir, el interruptor automático más cercano al cortocircuito se disparará durante el menor tiempo y los otros interruptores automáticos se dispararán secuencialmente, con un tiempo de espera más largo (Flores & Marca, 2022).

9. VALIDACIÓN DE LAS PREGUNTA CIENTIFICA E HIPOTESIS

Pregunta de investigación.

¿El diseño del biorreactor a escala piloto es adecuado para la recuperación de energía y nutrientes de los lodos residuales generados por la planta de tratamiento de aguas del Campus CEASA?

Hipótesis.**Hipótesis Nula.**

¿Los resultados de los parámetros físicos y del monitoreo de digestión anaeróbica no se encuentra por debajo de 0,05?

Hipótesis Alternativa.

¿Los resultados de los parámetros físicos y del monitoreo de digestión anaeróbica se encuentra por debajo de 0,05?

Variables.**Variable independiente.**

Metano (CH₄)

Variable dependiente.

□ **Parámetros físicos.**

pH, conductividad eléctrica, temperatura, salinidad, solidos totales, volátiles y fijos.

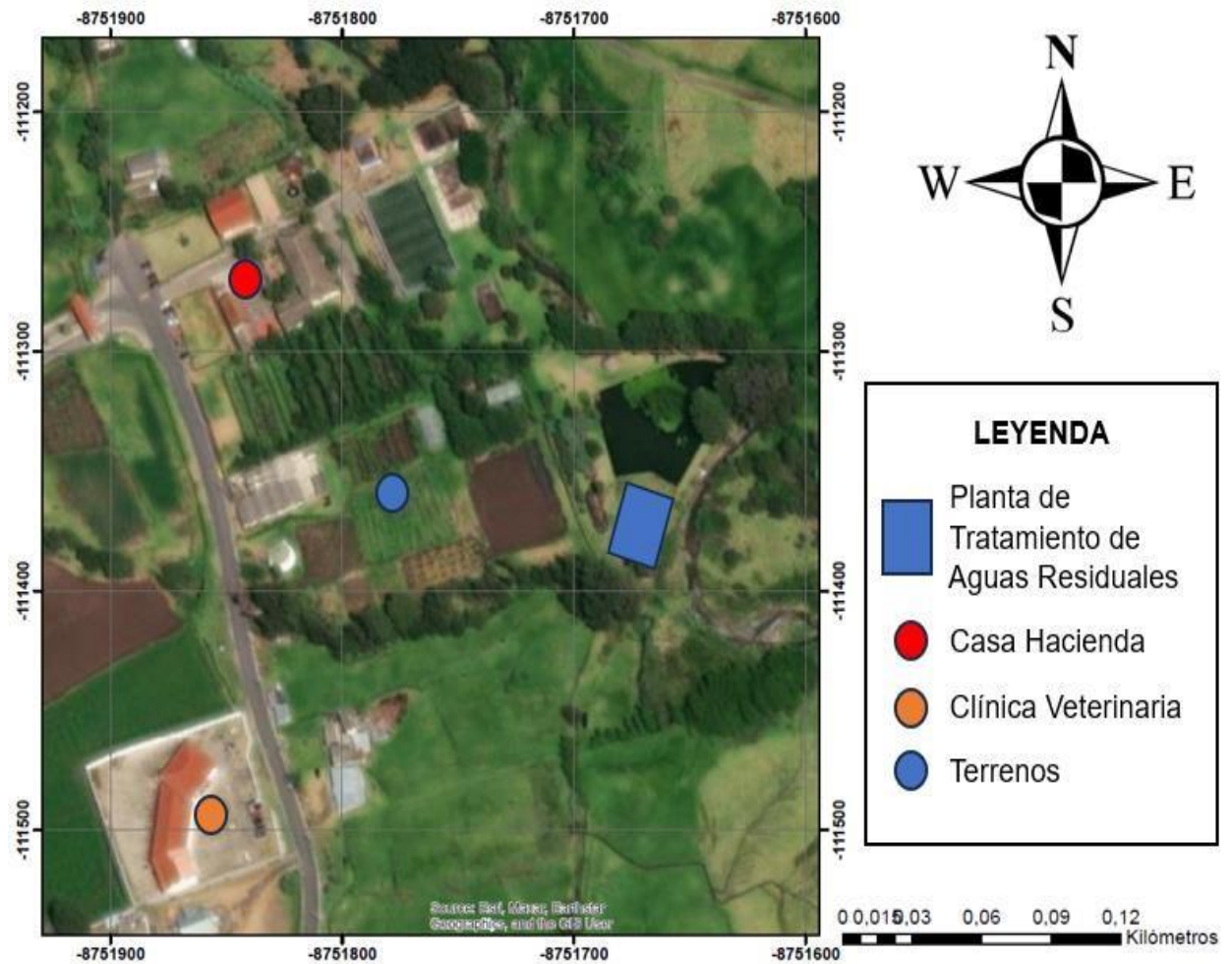
□ **Parámetros de monitoreo.**

pH, temperatura, cantidad de lodo, días.

10. ÁREA DE ESTUDIO

El proyecto de investigación se realizó en la Universidad Técnica de Cotopaxi, Centro Experimentación Académica Salache (CEASA), en donde el estudio y las muestras recolectadas fueron recogidas de la planta de tratamiento de aguas residuales de la misma, esta se encuentra dentro de la Región Interandina, Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia Eloy Alfaro, Barrio Salache, específicamente entre las coordenadas UTM Zona 17M: 765136.30m E – 9889321m S. Además, su altitud es de 2702msnm. Esta delimitada al norte la ciudad de Latacunga, al oeste la ciudad de Pujilí, al este la ciudad de Belisario Quevedo y al Sur la ciudad de Salcedo.

Figura 1. Mapa de ubicación de área de estudio.



Nota. Esta figura indica el lugar de donde se encuentra la planta de tratamiento de Campus CEASA.

Fuente. Elaborado por los autores con la aplicación de ArcGIS 10.8.2.

11. METODOLOGIA

11.1. ENFOQUE

El presente estudio adopta un enfoque de investigación mixta, combinando métodos cuantitativos y cualitativos para obtener una comprensión integral del diseño y funcionamiento del biorreactor. El enfoque cuantitativo permitió medir y analizar variables clave como la producción de biogás y lodo residual, así como el monitoreo de parámetros físico-químicos. Por otro lado, el enfoque cualitativo se empleó para evaluar los aspectos operativos del biorreactor, incluyendo el comportamiento de los microorganismos y la eficiencia de la mezcla. Esta combinación metodológica permitió no solo obtener datos numéricos, sino también interpretar las dinámicas del sistema en su entorno real.

11.1.1. Enfoque Cuantitativo

De acuerdo con Calle (2023) el enfoque cuantitativo se centra en el análisis de variables, interpretando la evidencia como la presencia de relaciones estadística entre distintos factores. Este enfoque no solo buscó identificar correlaciones, sino que también facilitó en la creación de modelos y la predicción de fenómenos. En este contexto, el enfoque cuantitativo nos permitió conocer los valores numéricos, que reflejan la eficiencia del biorreactor en la producción de biogás (energía) y lodo residual (nutrientes). Además, facilitó el monitoreo constante de parámetros clave, como la temperatura, pH y metano. Para llevar a cabo este seguimiento, se empleó la técnica de campo, anotando los valores en una libreta, lo que aseguró que los datos recolectados fueran precisos. Finalmente, se realizó un análisis estadístico, utilizando regresión lineal para estudiar la producción de metano y, por otro lado, el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la significancia de los parámetros físico-químicos, así como los datos del monitoreo constante. Estos análisis no solo nos ayudaron a entender mejor los resultados, sino que también respaldaron las hipótesis formuladas en el estudio.

11.1.2. Enfoque Cualitativo

El enfoque cualitativo se basa en comprender la complejidad y profundidad de la realidad social y humana con la interacción de funcionar de manera eficiente mediante el diseño del biorreactor (Cejas et al. 2023). De ese modo, permitió analizar aspectos operativos del biorreactor que no podían medirse directamente con datos numéricos. Se utilizaron técnicas como observaciones directas y registros descriptivos para evaluar el comportamiento de los microorganismos y la eficiencia de la mezcla homogénea. Además, se analizó factores como la sedimentación del lodo residual y la estabilidad del proceso de digestión anaeróbico en condiciones operativas.

Esta información complementó los análisis cuantitativos, proporcionando una visión más holística del funcionamiento del sistema.

11.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

11.2.1. Investigación Bibliográfica.

Este tipo de investigación permitió recopilar información en artículos científicos, académicos y libros de gran relevancia sobre los biorreactores, los lodos residuales, los parámetros operacionales, el biogás (como fuente de energía) y el lodo residual (como fuente de nutrientes). Los datos obtenidos fueron fundamentales para fortalecer el conocimiento en el área, lo que a su vez facilitó el diseño adecuado del sistema. De esta manera, se logró obtener información

precisa y pertinente, esencial para asegurar la efectividad y la adecuación del estudio, contribuyendo a la mejora en el tratamiento del lodo residual y la optimización de la recuperación de recursos (Codina, 2020).

11.2.2. Investigación Descriptiva.

Esta investigación ayudó a proporcionar una comprensión más precisa de las características y componentes observados. De ese modo, se escogieron los parámetros más importantes en cuanto al estudio de los lodos residuales, donde se llevó a cabo la caracterización de las propiedades físico-químicas de la muestra discreta de lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus CEASA. En ese sentido, los parámetros físicos evaluados incluyeron el pH, conductividad eléctrica, temperatura y salinidad, las cuales se midieron utilizando equipo especializado. Para la evaluación de sólidos totales, volátiles y fijos, se determinó mediante gravimetría. En cuanto a los parámetros químicos se realizó DQO, DBO₅, cromo, hierro y arsénico, se evaluó mediante espectrofotometría. De ese modo, esta información fue clave para avanzar en el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles en el manejo de lodos residuales.

11.2.3. Investigación de Campo.

La presente investigación se realizó en ambiente oscuro con una temperatura menor a 4°C en base a la Norma ISO 5667-10:2010. Además, se pudo observar, medir y analizar el funcionamiento del biorreactor en condiciones operativas reales. Esto resultó fundamental para evaluar de manera precisa el desempeño del sistema, proporcionando resultados valiosos contribuyendo a la mejora y optimización de los procesos de la digestión anaeróbica.

11.2.4. Investigación Analítica.

Esta investigación se llevó a cabo con el propósito de examinar, analizar e interpretar de manera profunda los datos y resultados obtenidos, con el fin de evaluar las interrelaciones dentro del estudio del biorreactor y los lodos residuales. Se realizaron dos análisis de datos, el primero, en cuanto a la regresión lineal, interpretando el coeficiente de determinación R^2 donde un valor cercano a 1 indica cuán bien el modelo explica los datos y el segundo, mediante un análisis de varianza (ANOVA) para interpretar la hipótesis nula y el p value asociado a que el valor este menor a 0,05 con significancia estadística, este análisis fue ejecutado con el software de R Studio.

11.3. MÉTODOS

11.3.1. Método de Análisis Físico-químicos.

Este método se utilizó para determinar los parámetros físico químicos del lodo residual, con la normativa vigente del Acuerdo Ministerial 097-A de la Tabla 9 de los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce. Por otro lado, los análisis que se desarrollaron fueron la determinación del pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura, Salinidad, Sólidos Totales, Volátiles y Fijos, DQO, DBO₅, Cromo, Hierro y Arsénico, se realizaron esos estudios ya que son los parámetros fundamentales para determinar la calidad del lodo residual, eso se lo realizó en laboratorio, con el multiparámetros, mufla y espectrofotómetro. Sin embargo, este análisis proporcionó la información necesaria para comprender el desempeño del proceso de caracterización de los parámetros estudiados.

11.3.2. Método de Análisis Estadístico.

Este método se utilizó con el fin de analizar y comparar la cantidad de metano generado a partir de los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas del Campus CEASA. Para garantizar la precisión de los resultados, se empleó los valores de parámetros fisicoquímicos de 6 muestras, además, los valores del monitoreo constante de metano, pH y temperatura en gráficos de boxplot y ANOVA con el software R Studio. Esto permitió tener una idea más clara de cómo varían los datos. Además, se aplicó un análisis de regresión lineal para estudiar la relación entre la cantidad de metano producido con el tiempo de 32 días, no obstante, se empleó R^2 para evaluar la significancia estadística, esta prueba ayudó a identificar si existía una conexión significativa entre el tiempo de fermentación y la cantidad de metano generado, lo cual podría ser clave para optimizar el proceso y aumentar la eficiencia en la producción de biogás a partir de los lodos residuales.

11.3.3. Método de Producción Anaeróbica.

Este método fue fundamental en el diseño del biorreactor anaeróbico a escala piloto, ya que se centró en la recuperación tanto de energía como de nutrientes de los lodos residuales generadas en la planta de tratamiento del campus CEASA. El proceso se llevó a cabo en un biorreactor anaeróbico, en un ambiente sin oxígeno, donde los microorganismos anaeróbicos descomponen la materia orgánica presente en los lodos y el agua residual, lo que da como resultado la producción de biogás, es decir, metano, el cual puede ser aprovechado como fuente de energía renovable. Durante todo el proceso, se controló parámetros fundamentales como la temperatura,

el pH y el tiempo de retención hidráulica de 32 días, asegurando que el sistema operó de manera óptima y eficiente. Además de la generación de biogás, el proceso anaeróbico también desempeña un papel clave en la remoción de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, los cuales son tratados de manera natural y otros procesos biológicos. Este método no solo contribuye a la recuperación de energía, sino también al manejo sostenible de los nutrientes.

11.4. TÉCNICAS

11.4.1. Técnica de Muestreo discreto.

Esta técnica ayudó a establecer punto específico dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales del campus CEASA, por lo cual, la recolección de muestras de lodos residuales se realizó con la Norma ISO 5667-10:2010 una sola vez entre las 08:00h, utilizando implementos de seguridad personal. En la planta de tratamiento de aguas residuales, se obtuvo un punto de muestreo que fue en la fase de tratamiento primario. La muestra se colocó en un balde donde se recolectó 14L, de lo cual, 9L se utilizaron para abastecer el biorreactor y 5L fue enviado al laboratorio para el análisis fisicoquímico.

11.4.2. Técnica de Observación directa.

Esta técnica fue fundamental para hacer un seguimiento visual detallado de diferentes aspectos clave del proceso. Uno de los primeros puntos fue la mezcla de los lodos, donde se comprobó que la agitación en el biorreactor estuviera funcionando correctamente para asegurar que el lodo residual se distribuyera de manera uniforme. La homogeneización del material es esencial para que los microorganismos trabajen de manera eficiente y el proceso de digestión sea efectivo. Además, la observación directa permitió controlar las condiciones de temperatura y pH, elementos esenciales para mantener un entorno óptimo para los microorganismos encargados de la producción de biogás y se anotó los resultados en la libreta de campo por cada día. Sin embargo, se verificó que estos parámetros se mantuvieran dentro de los rangos del monitoreo fue crucial para asegurar que la actividad microbiana no se viera afectada, ya que cualquier variación fuera de estos rangos podría interferir en la producción de biogás.

11.4.3. Técnica de campo.

Esta técnica fue fundamental para recopilar datos clave que permiten diseñar un sistema eficiente enfocado en la recuperación de nutrientes y energía de las aguas residuales. En primer lugar, se tomó los datos del monitoreo de 32 días, para posterior a aquello, se determinó la

evaluación del rendimiento del biorreactor conociendo la cantidad de biogás generado para transformarlo a energía comparando cuan eficiente sería para el uso de generados de metano y el ahorro económico en Ecuador y los si los nutrientes están aptos para el lodo residual comparando cuan eficiente resultaría para recuperar suelos áridos o en mal estado.

11.5. EQUIPOS & MATERIALES

11.5.1. Equipos.

Los equipos que se usaron para este proyecto de investigación fueron los siguientes:

- Multiparámetro HANNA HI98194.
- Termómetro Waterproof 8811.
- Medidor de pH portátil Milwaukee.
- Dispositivo electrónico de CH₄ – CO₂.
- Mufla Biobase.
- Balanza Analítica.
- Desecador.

11.5.2. Materiales.

Los materiales que se usaron para este proyecto de investigación fueron los siguientes:

- Cuaderno de campo.
- Bidón cilíndrico de polietileno de 12L.
- 6 tablas tríples de 50x50cm.
- 6 planchas de espuma Flex de 50x50cm.
- 2 focos de 40 watts.
- 2 boquillas para focos.
- Manguera de gas 8mmx5/16” – 380 PSI – 2m.
- Llave de paso de 1/4.
- Arandelas de caucho de 5/16”.
- Canaleta 2m.
- Cable de timbre 4m.
- Agitador galvanizado en forma de □ 10 barras de silicona.

- Pistola de silicona.
- Abrazadera.
- Tarjeta ESP32 de 30 pines.
- Sensor de temperatura LM35.
- Relee.
- Foco Led de 5mm.
- 6 crisoles de 25ml.
- 2 pinzas metálicas.
- Espátula.
- Piseta.
- 6 vasos de precipitación de 50ml.

11.5.3. Reactivos

Los reactivos que se usaron para este proyecto de investigación fueron los siguientes:

- Agua destilada.

11.5.4. Software

Los software que se usaron para este proyecto de investigación fueron los siguientes:

- ArcGIS 10.8.2 para realizar el mapa de área de estudio.
- Google Earth Pro para establecer las coordenadas UTM del área de estudio.
- Arduino IDE 2.3.3 para sistematizar la Tarjeta ESP32 con su lenguaje de programación.
- Fritzing 0.9.10 para realizar el tablero y esquema de los circuitos de programación.
- R Studio para realizar los boxplot y los resultados de p value.

11.6. SELECCIÓN DE PUNTO DE MUESTREO

El lugar o punto de muestreo se estableció en la planta de tratamiento de aguas residuales, específicamente en la fase de tratamiento primario, es decir, en donde empieza a dar tratamiento la planta a las aguas residuales, donde se tomó el lodo residual para realizar el proceso investigativo en campo y posterior a aquello, se recolectó 14L de lodo residual para el proceso anaeróbico, de lo cual, 9L fueron al proceso anaeróbico en el biorreactor y 5L fueron para análisis físico-químicos del mismo.

Tabla 3. Coordenadas del punto de muestreo.

Punto de muestro (UTM)	
X	Y
765140.08 E	9889330.30 S

Nota. Esta tabla indica las coordenadas UTM del punto de muestreo del estudio.

Fuente. Elaborado por los autores.

11.7. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DE LODO RESIDUAL

Para garantizar la exactitud en la caracterización de los lodos residuales y asegurar la consistencia de los resultados se analizaron varios parámetros físico-químicos de estudio, los cuales fueron:

11.7.1. pH.

Para el parámetro del pH se ocupó el equipo de laboratorio, el multiparámetro HANNA HI98194, donde en la práctica, se utilizó el lixiviado del lodo residual para determinar el potencial de hidrogeno. Se evaluó el parámetro con 6 muestras, es decir, 6 repeticiones por cada una. Limpiando cada una de los electrodos con agua destilada.

11.7.2. Conductividad Electrica.

Para el parámetro de (CE) se ocupó el equipo de laboratorio, el multiparámetro HANNA HI98194, donde en la práctica, se utilizó el lixiviado del lodo residual para determinar la conductividad eléctrica. Se evaluó el parámetro con 6 muestras, es decir, 6 repeticiones por cada una. Limpiando cada una de los electrodos con agua destilada.

11.7.3. Temperatura.

Para el parámetro de (T) se ocupó el equipo de laboratorio, el multiparámetro HANNA HI98194, donde en la práctica, se utilizó el lixiviado del lodo residual para determinar la temperatura. Se evaluó el parámetro con 6 muestras, es decir, 6 repeticiones por cada una. Limpiando cada una de los electrodos con agua destilada.

11.7.4. Salinidad.

Para el parámetro de salinidad se ocupó el equipo de laboratorio, el multiparámetro HANNA HI98194, donde en la práctica, se utilizó el lixiviado del lodo residual para determinar la salinidad. Se evaluó el parámetro con 6 muestras, es decir, 6 repeticiones por cada una.

Limpiando cada una de los electrodos con agua destilada.

11.7.5. Sólidos Totales

En los sólidos totales (ST) se ocupó el análisis por medio de Standard Methods 2540B, es decir, fue un proceso de gravimetría (González, 2023), por lo cual, primero se realizó:

- ☐ Toma de muestras de lodo residual y homogenizar adecuadamente.
- ☐ Se calibró la balanza analítica.
- ☐ Se pesó el crisol seco y limpio, después se anotó el peso exacto
- ☐ Se transfirió y dividió la cantidad de lodo residual a 6 muestras con 25ml cada uno.
- ☐ Se pesó el crisol con la muestra y se anotó el peso exacto.
- ☐ Se calibró la mufla a una temperatura de 105°C.
- ☐ Se colocó el crisol con la muestra de lodo residual en la mufla por 15 minutos.
- ☐ Se sacó el crisol y se dejó enfriar por dos minutos en el desecador.
- ☐ Se pesó el crisol con la muestra en la balanza analítica.
- ☐ Se repitió el mismo proceso de evaporación hasta obtener pesos consecutivos constantes.

Por último, se ocupó la siguiente fórmula para obtener el resultado:

$$ST = \frac{(A - B) * 1000\text{mg}}{V}$$

Donde:

ST = Sólidos Totales (mg/L).

A = Peso final del crisol con la muestra de lodo residual después del proceso de evaporación (mg).

B = Peso inicial del crisol sin muestra de lodo residual (mg).

V = Volumen de muestra de lodo residual (L).

11.7.6. Sólidos Volátiles

En los sólidos volátiles (SV) se ocupó el análisis por medio de Standard Methods 2540B, es decir, fue un proceso de gravimetría (Tipan, 2020), por lo cual, primero se realizó:

- Se tomó las muestras de la determinación anterior de sólidos totales.
- Se calibró la mufla a 550°C.
- Se llevó los crisoles con la muestra de lodo residual a la mufla.
- Se dejó la muestra en la mufla por 1 hora.
- Se sacó de la mufla la muestra se colocó en el desecador por 2 minutos.
- Finalmente se pesó la muestra.

Por último, se ocupó la siguiente fórmula para obtener el resultado:

$$SV = \frac{(A - B) * 1000\text{mg}}{V}$$

Donde:

SF = Sólidos Volátiles (mg/L).

A = Peso final del crisol con la muestra de lodo residual después del proceso de calcinación (mg).

B = Peso inicial del crisol sin muestra de lodo residual (mg).

V = Volumen de muestra de lodo residual (L).

11.7.7. Sólidos Fijos

En los sólidos fijos (SF) se ocupó el análisis por medio de Standard Methods 2540B, es decir, fue un proceso de gravimetría (González, 2023), por lo cual, primero se realizó:

- Los resultados de los sólidos totales.
- Los resultados de los sólidos fijos.

Por último, se ocupó la siguiente fórmula para obtener el resultado:

$$SF = ST - SV$$

Donde:

SV = Sólidos Volátiles (mg/L).

ST = Sólidos Totales (mg/L).

SF = Sólidos Fijos (mg/L).

11.7.8. Demanda química de oxígeno.

Los análisis de demanda química de oxígeno se realizaron por medio del método PA – 32.00. Método de Referencia: Standard Methods, Ed. 23. 2017 5220A y 5220D. Es decir, fue un proceso de Rango Alto, Reflujo cerrado, Espectrofotometría UV – VIS. Con la unidad de mg/L (Hessenauer, 2021).

11.7.9. Demanda bioquímica de oxígeno.

Los análisis de demanda bioquímica de oxígeno se realizaron por medio del método PA – 45.00. Método de Referencia: Standard Methods, Ed. 23. 2017 5210B. Es decir, fue un proceso de Winkler, Electrometría. Con la unidad de mg/L (Molina & Moya, 2022).

11.7.10. Arsenico.

Los análisis del metal pesado Arsénico (As) se realizó por medio del método PA – 117.00. Método de Referencia: EPA 3005 A, Rev. 01, 1992. EPA 6010 B, December 1996. Standard Methods Ed. 24, 2023, 3120B. Es decir, fue un proceso de espectroscopia de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado. Con la unidad de mg/L (EPMAPA, 2022).

11.7.11. Hierro.

Los análisis del metal pesado Hierro (Fe) se realizó por medio del método PA – 117.00. Método de Referencia: EPA 3005 A, Rev. 01, 1992. EPA 6010 B, December 1996. Standard Methods Ed. 24, 2023, 3120B. Es decir, fue un proceso de espectroscopia de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado. Con la unidad de mg/L (EPMAPA, 2022).

11.7.12. Cromo.

Los análisis del metal pesado Cromo (Cr) se realizó por medio del método PA – 11.00. Método de referencia Standard Methods, Ed. 23. 2017 3500-CrA y 3500-CrB. Es decir, fue un proceso de Espectrofotometría UV – VIS. Con la unidad de mg/L (EPMAPA, 2022).

11.8. PROTOTIPO DEL BIORREACTOR A ESCALA PILOTO

11.8.1. DISEÑO DEL BIORREACTOR.

El diseño del biorreactor a escala piloto para el proceso de digestión anaeróbica de lodos residuales se aplicó la metodología que menciona (Canales et al. 2021) donde se realizó el biorreactor, tipo incubadora de espuma Flex y trípex cuya área fue 50X50cm², con una altura de 56cm, cuyo espacio interior fue aislado térmicamente con poliestireno (espuma Flex) y en el exterior cubierta de madera (trípex). En su interior se colocó un tanque biorreactor en forma de un bidón cilíndrico de polietileno con capacidad de 12L en el espacio de 3/4 del bidón se utilizó para colocar el lodo residual, es decir, 9L en condiciones anaeróbicas, por otro lado, el volumen restante de 3L sirvió para almacenar metano. Además, se construyó un agitador con un tubo de acero inoxidable de 0,80m, el tanque biorreactor fue cerrado herméticamente para generar un sistema estrictamente anaeróbico. Después fue colocado en la caja tipo incubadora, calefaccionados e iluminados por dos focos de 40 watts c/u, a temperatura termofílica en el rango de 50 a 60 °C controlado por una tarjeta ESP32 que está programada con ARDUINO IDE, a la vez, conectado el mismo a un sensor de temperatura LM35 para que controle la temperatura. Al biorreactor se le insertó una manguera de gas para facilitar el registro de la concentración de metano durante cada día. Se realizó una prueba de 32 días de tiempo de retención hidráulica anaeróbico.

11.8.2. PROGRAMACIÓN EN ARDUINO DEL BIORREACTOR

Para poder automatizar el biorreactor a escala piloto para que tenga una temperatura constante de 60°C, se utilizó un microcontrolador (ESP32), en donde en su almacenamiento interno de la tarjeta se le añadió un lenguaje de programación en ARDUINO IDE, para que prenda los dos focos de 40watts cuando su temperatura este menor a 60°C y cuando la temperatura sobrepase los 60°C, con el fin de tener una temperatura en el interior continua. El código de programación se puede observar en el **Anexo 7**.

11.8.3. DETERMINACIÓN DE PARAMETROS OPERACIONALES DEL BIORREACTOR.

Para la determinación de los parámetros operacionales en el monitoreo del biorreactor, se seleccionaron cuatro criterios clave: temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica y producción de metano. El periodo de recolección de datos abarcó desde el 09 de diciembre de 2024 hasta el 09 de enero de 2025, es decir, un total de 32 días de estudio y monitoreo continuo.

La recolección de datos se llevó a cabo a las 8:00 a.m. todos los días, y para asegurar la representatividad de las muestras, se siguió un procedimiento estándar. Media hora antes de la toma de datos, se agitó el lodo residual dentro del biorreactor durante 5 minutos, con el objetivo de homogeneizar la muestra y garantizar una medición precisa de los parámetros. Este procedimiento se repitió durante todo el periodo de monitoreo. Los parámetros operacionales analizados fueron los siguientes:

11.8.3.1. Temperatura.

Se monitoreó diariamente con el equipo Termómetro Waterproof 8811 que fue calibrado antes del uso, el alambre de medición fue sumergido en la muestra de lodo residual dentro del biorreactor para medir la temperatura del lodo residual e ir monitoreando a la par con el sistema programado en la tarjeta ESP32 y Arduino IDE, el equipo se prendía media hora antes de la hora para la toma del dato, fue fundamental monitorear este dato ya que influye directamente en la actividad microbiana, dado que se pudo mantener una degradación eficiente de los residuos orgánicos. Cabe mencionar según Canales et al. (2021) la temperatura que se ocupó en el biorreactor fue constante de 60°C, es decir, temperatura termofílica para que se acelere el proceso de producción microbiana.

11.8.3.2. pH.

Este parámetro también fue fundamental, se midió diariamente con el equipo Medidor de pH portátil Milwaukee que fue calibrado antes del uso, el electrodo de medición fue sumergido en la muestra de lodo residual dentro del biorreactor, el equipo se prendía media hora antes para la toma del dato ya que influye directamente en el potencial de hidrogeno. Por ello, este dato también se monitoreo para analizar cómo se comporta la actividad microbiana con un pH mínimo de 6,5 y máximo de 8,0, ya que si está por debajo o supera el valor pueden volver menos eficientes (Canales et. al, 2021).

11.8.3.3. Tiempo de retención hidráulica.

Según Cedeño & Lascano (2023) manifiesta que el tiempo de retención hidráulica (TRH) es fundamental en el tratamiento de lodos residuales, ya que nos permite optimizar el proceso y planificar de manera eficiente el diseño del sistema para que funcione correctamente. Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica que se ocupó dentro del biorreactor fue de 32 días, porque Canales et. al, (2021) menciona que el lodo residual es más complejo en la eficiencia de degradación, no obstante, el biorreactor estuvo herméticamente cerrado, para que los

microorganismos tengan suficiente tiempo para que conviertan la materia orgánica en biogás en su proceso metabólico.

11.8.3.4. Metano.

Para asegurar las condiciones ideales de la producción de biogás, se hizo un seguimiento diario en base a factores clave como la temperatura y el pH de la mezcla en la cámara de fermentación. Estos parámetros son cruciales porque permiten que los microorganismos encargados de generar el biogás se mantengan en un ambiente óptimo para su actividad. El biogás generado fue medido utilizando un equipo especializado en la medición de metano (CH₄). El dispositivo electrónico de CH₄ – CO₂ con precisión ± 3 % permitió obtener datos precisos sobre las concentraciones producidas. Para garantizar que la mezcla en la cámara de fermentación estuviera bien distribuida y que los resultados fueran confiables, se agitó 5 minutos manualmente, 30 minutos antes de comenzar a registrar el dato. Esta acción ayudó a repartir uniformemente los componentes de la mezcla, lo que facilitó un proceso de fermentación más eficiente y controlado (Canales et al, 2021).

11.9. DETERMINACIÓN DE ENERGÍA Y NUTRIENTES

Después de haber culminado el proceso de digestión anaeróbica dentro del biorreactor, se procedió a determinar la eficiencia y la producción de cada parámetro de energía (metano) y nutrientes.

11.9.1. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

La recuperación de energía se fundamenta en la naturaleza del desecho orgánico, junto con los factores ambientales y operativos que determinan la generación de biogás por unidad de biomasa. La capacidad de producción se basa en la carga orgánica del sustrato y en su capacidad para biodegradarse (Gondi et al. 2022). Por lo tanto, los datos que se obtuvieron de metano en ppm eso se transformó a kW/h como lo menciona Possetti et al. (2024) ya que, en base a esa unidad se mide los reactores que salen de las plantas de tratamiento para estimar el rendimiento de energía producida.

Para obtener el resultado de energía a partir del metano generado en el biorreactor, primero se realizó la sumatoria de todos los datos de metano monitoreado en los 32 días, posteriormente, se transformó la unidad de metano ppm a mg/L ya que Liang et al. (2024) menciona que tienen la misma equivalencia. Para después multiplicar por el volumen el cual fue de 3L donde se formó el metano. Además, se utilizó el poder calorífico inferior del metano 55,53 kJ/g

(Rodríguez et al. 2021). Para ajustar este valor al diseño del biorreactor, se transformó a kWh/kg, para que, se pueda obtener el resultado y la fórmula que se ocupó para la eficiencia del calor liberado fue la siguiente:

$$Q = m * PCI$$

Donde:

Q = Calor liberado (kWh). m

= Masa de metano (kg).

PCI = Poder calorífico inferior del metano (kWh/kg).

Por consiguiente, para medir el potencial energético en equipos de uso diario en cuestión del resultado obtenido, es por ello que, se ocupó la fórmula de Martínez et al. (2023) donde fue la siguiente:

$$\text{Tiempos de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

Donde:

Tiempos de uso = Es la cantidad de horas de eficiencia energética.

Energía disponible = Es la energía obtenida del proceso de digestión anaeróbica.

Potencia del equipo = Es la cantidad de energía transferida al equipo.

11.9.2. RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES

La recuperación de los nutrientes se evaluó en base a los macronutrientes que fueron esenciales para el crecimiento y la supervivencia de las plantas, ya que las ayudan en procesos vitales como la fotosíntesis y la producción de energía. Sin ellos, las plantas no podrían desarrollarse correctamente (Navarrete, 2020). Por ello, fue crucial conocer los resultados de macronutrientes presentes en el lodo residual, por lo cual, se analizaron los siguientes:

11.9.2.1. Nitrógeno

El nitrógeno Total se realizó mediante el método de PEE/F/14, es decir, para verificar el nitrógeno total del lodo residual se usó el método de combustión, es decir:

- AOAC EDITION. OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS, 993.13 MERYLADN, USA, ÚLTIMA EDICIÓN.

Con la unidad de concentración %p/p.

11.9.2.2. Fosforo

El fosforo se realizó mediante método PEE/F/04, es decir:

- NTC 234, ABONOS O FERTILIZANTES. MÉTODO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE FÓSFORO. ÚLTIMA EDICIÓN
- AOAC EDITION. OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS, METHOD 958.02, 960.02 MERYLAN, USA, ÚLTIMA EDICIÓN.

Con la unidad de concentración %p/p.

11.9.2.3. Potasio

El potasio se realizó mediante el método PEE/F/19, es decir:

- AOAC, OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS, METHOD 965.09/ 945.04. MERYLAN, USA, ÚLTIMA EDICIÓN
- DOCE/F/40 ICONTEC, INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, NTC 1369

Con la unidad de concentración %p/p.

11.10. ANOVA

Para la realización del proyecto de investigación, se utilizó ANOVA para analizar los resultados obtenidos, que incluían varios datos numéricos. Para ello, se empleó el software R Studio, que permitió generar los gráficos de boxplot y determinar el valor p para cada uno de los parámetros. Los códigos utilizados para la implementación de los gráficos fueron desarrollados en un lenguaje de programación, los cuales se pueden consultar en el **Anexo 8**.

12. COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS Y RESPUESTAS DE INVESTIGACIÓN

Respuesta la pregunta de investigación

¿El diseño del biorreactor a escala piloto es adecuado para la recuperación de energía y nutrientes de los lodos residuales generados por la planta de tratamiento de aguas del Campus

CEASA?

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que el diseño del biorreactor permitió la recuperación de energía en forma de biogás (metano) y nutrientes en el lodo residual. Sin embargo, la producción de biogás fue limitada y no alcanzó niveles óptimos para considerarse una fuente de energía significativa en su estado actual. Por otro lado, el análisis físico-químico de los lodos residuales mostró que el 90% de los parámetros evaluados se encontraban dentro de los límites establecidos por la normativa vigente, con la excepción del arsénico, cuyo valor excedió los niveles permisibles.

Si bien el biorreactor demostró ser funcional en la recuperación de recursos, su eficiencia puede mejorar mediante la optimización de variables operacionales como el tiempo de retención hidráulica, la temperatura, la carga orgánica y el control de metales pesados en los lodos. Por lo tanto, la respuesta a la pregunta de investigación es que el diseño del biorreactor es adecuado en términos de funcionalidad, pero requiere ajustes y optimización para mejorar la eficiencia en la producción de biogás y la calidad del lodo residual, asegurando su viabilidad como recurso energético y para suelos que contienen carbonato.

Respuesta a la Hipótesis

Hipótesis Nula

¿Los resultados de los parámetros físicos y del monitoreo de digestión anaeróbica no se encuentra por debajo de 0,05 en p value?

Los resultados de los parámetros físicos del lodo residual no pueden rechazar la hipótesis nula en la conductividad eléctrica, temperatura, salinidad, sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos fijos y por parte de la digestión anaeróbica no pueden rechazar la hipótesis nula en los valores de pH y temperatura ya que, estos resultados en p value se encuentran mayor a 0,05. Porque indica una diferencia significativa mayor al 5% de probabilidad estadística, es decir, los valores no se mantuvieron dentro del rango deseado.

Hipótesis Alternativa

¿Los resultados de los parámetros físicos y del monitoreo de digestión anaeróbica se encuentra por debajo de 0,05?

Los resultados de los parámetros físicos del lodo residual pueden rechazan la hipótesis nula en el pH y por parte de la digestión anaeróbica pueden rechazar la hipótesis nula en los valores de

metano ya que, estos resultados en p value se encuentran menor a 0,05. Porque indica una relación significativa entre las variables mencionadas anteriormente, indicando que se encuentra preciso y adecuado.

13. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

13.1. Zona de estudio.

La investigación se llevó a cabo en la Universidad Técnica de Cotopaxi, en la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus CEYPSA, Facultad CAREN, por lo cual, se tomó la muestra dentro de la primera fase de tratamiento, es decir, al inicio. Se escogió el tratamiento primario, ya que, en ese lugar se acentúa gran cantidad de materia orgánica, es decir, el lodo residual. Por lo tanto, fue el punto clave para continuar con la investigación de manera eficiente. Este lugar es clave, ya que, fue de ahí de donde se tomó la muestra discreta de lodo residual, lo que le da gran relevancia al análisis. Cabe mencionar, que acá llegan todos los desperdicios orgánicos e inorgánicos de los estudiantes, docentes y trabajadores que hacen uso del agua, en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

13.2. Caracterización del lodo residual.

Una vez culminado el procedimiento de campo y laboratorio con los análisis fisicoquímicos del lixiviado del lodo residual en base al pH, Conductividad Eléctrica, Temperatura, Salinidad, Solidos Totales, Volátiles y Fijos, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Metales pesados como lo fueron Hierro, Cromo y Arsénico, se obtuvieron los siguientes resultados en comparación al Acuerdo Ministerial 097-A, TULSMA, Libro VI, Anexo 1, Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua, Tabla 9 de límites de descarga a un cuerpo de agua dulce:

Tabla 4. Resultados de parámetros fisicoquímicos del lixiviado del lodo residual.

Parámetros	Limites Permisibles	Resultados	Unidad	Criterio
pH	6-9	7.31	-	CUMPLE
Conductividad Eléctrica	4 000	1 621	μS/cm	CUMPLE
Temperatura	<40	22.28	°C	CUMPLE
Salinidad	2,0	0.86	UPS	CUMPLE
Solidos Totales	1 600	734.74	mg/L	CUMPLE

Solidos Volátiles	-	582.68	mg/L	-
Solidos Fijos	-	155.05	mg/L	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno	100	74.93	mg/L	CUMPLE
Demanda Química de Oxígeno	200	198.22	mg/L	CUMPLE
Hierro	10	<0.10	mg/L	CUMPLE
Cromo	0.5	<0.40	mg/L	CUMPLE
Arsénico	0.1	0.150	mg/L	NO CUMPLE

Nota. Esta tabla indica los resultados de los 12 parámetros fisicoquímicos estudiados en el proyecto.

Fuente. Elaborado por los autores.

En la **Tabla 4** se puede apreciar que los resultados se compararon con los límites máximos permisibles del Acuerdo Ministerial 097-A, por lo tanto, el valor final del pH fue de 7.31 siendo ligeramente alcalino y se encuentra dentro de los límites permisibles de la normativa, por otro lado, para Zurita (2021) el pH máximo idóneo para el lodo residual para que la actividad microbiológica sea eficiente es de 7.50. Además, la conductividad eléctrica dio un resultado de 1 621 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el cual se encuentra con menor cantidad de sales dentro de los límites permisibles, ya que, según Piedra (2023) el límite permisible es de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, debido a que si es mayor el valor afectaría drásticamente al monitoreo del lodo residual. Así mismo, la temperatura se encuentra en los rangos adecuados, porque los autores Calderón & Pulgar (2023) mencionan que de esa manera los microorganismos se pueden mantener previamente al ingreso del biorreactor. Sin embargo, la salinidad de igual manera, no sobre pasa los límites, manteniéndose por debajo de lo norma, estableciendo que contiene poco sodio en el lodo residual.

En cambio, en cuanto a los sólidos totales tenemos 734,74 mg/L y se encuentra dentro de los límites permisibles, ya que su rango es de 1 600 mg/L. Cabe mencionar, que los sólidos volátiles y fijos, cumplen con una función principal en cuestión del estudio, ya que, se pudo determinar cuanta cantidad de materia orgánica e inorgánica existe como lo menciona Cárdenas & Molina (2022), siendo esta fundamental para la producción de metano y nutrientes.

Por otro lado, la demanda bioquímica de oxígeno dio un resultado de 74,93 mg/L, por lo cual, si cumplió con el rango de 100 mg/L. Con la demanda química de oxígeno de 198,22 mg/L de

igual manera, cumplió con el rango de 200 mg/L, pero cabe mencionar que, está cercano al valor máximo, por lo tanto, Rosas et al. (2020) menciona que se puede deber a que existe un bajo nivel de oxígeno disuelto y mucha carga orgánica. En cuanto a los metales pesados reflejó que el hierro dio $<0,10$ mg/L, cumpliendo con el límite permisible de 10 mg/L, con el cromo dio $<0,40$ mg/L, cumple con el límite permisible de 0,5 mg/L. Por último, el arsénico con el 0,150 mg/L no cumple con el límite permisible de 0,1 mg/L, debido a que según (Piedra, 2023) es una combinación de persistencia y complejidad en cuanto a la toxicidad que tendrían los microorganismos en el proceso de tratamiento.

Por otro lado, (Franco, 2021) indica que los lodos y los biosólidos poseen un gran potencial para el aprovechamiento agrícola, dado que su uso es posible gracias a que optimizan los niveles de materia orgánica, macro y micronutrientes; no obstante, persisten algunos riesgos derivados de la posible existencia de sustancias venenosas como metales pesados (arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, selenio, zinc) los microorganismos que se encuentran en el agua residual. Además, su uso incorrecto puede provocar que su aplicación sea incorrecta. ir en perjuicio del desarrollo y producción de ciertas especies de vegetación.

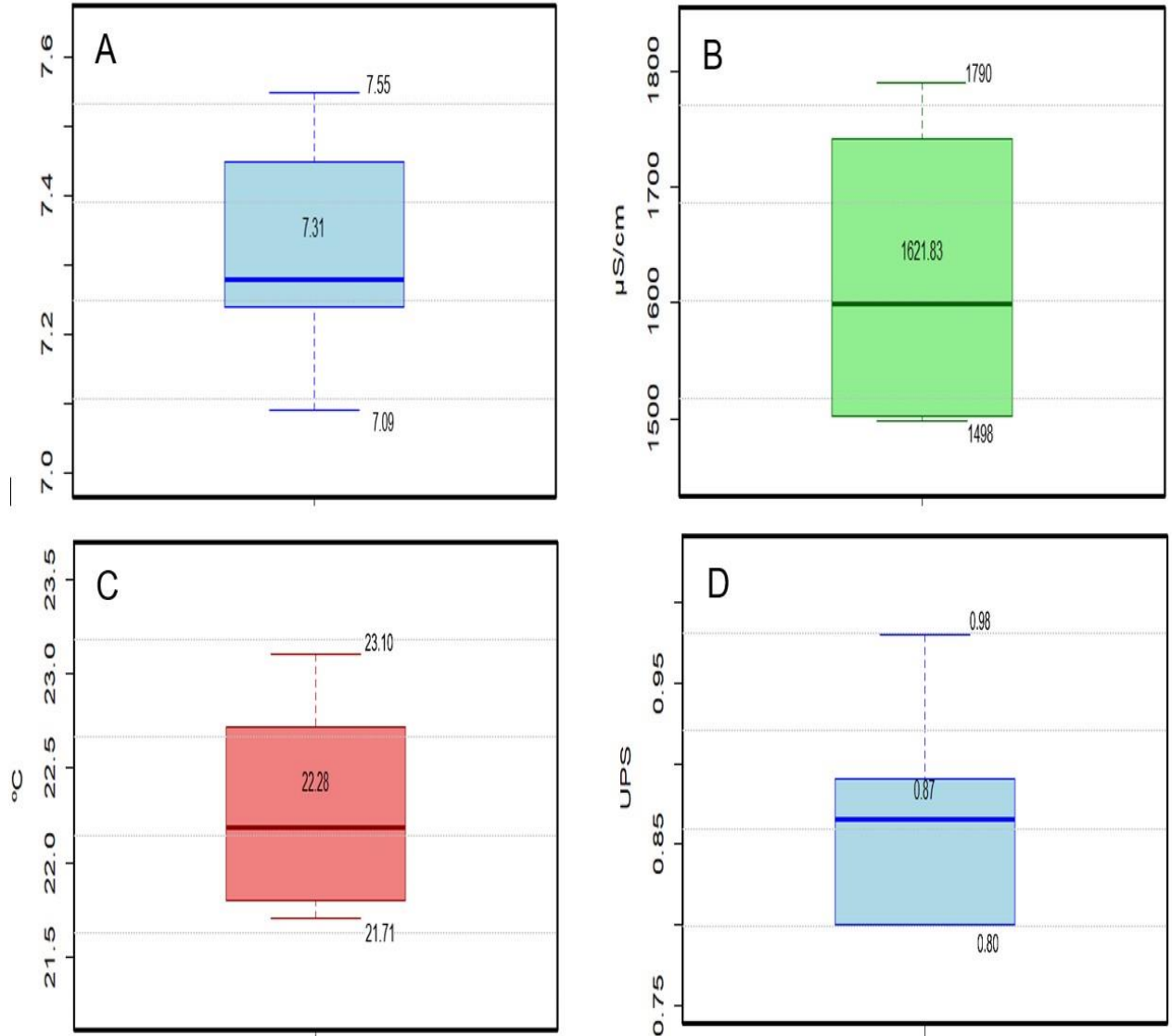
Según Guerrero et al. (2023) los resultados de DBO5 total en la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Quitumbe fueron los siguientes: mínimo 420 mg/L, máximo 520 mg/L, promedio 455 mg/L. Por lo tanto, la planta recoge gran cantidad materia orgánica, de ese modo, el biorreactor de ese lugar rescataría el completo para la producción de metano, cabe mencionar que, en el Campus Salache reflejó un resultado inferior con 74,93 mg/L, por lo tanto, con ese valor se pudo obtener gran cantidad de energía con el metano que se genere.

Por otro lado, en otro reactor a escala real que se evaluó en Colombia, indica que la eficiencia de los reactores en una planta de tratamiento fue durante un período de 9 años. Por lo tanto, los resultados fueron satisfactorios, logrando una remoción del 66% de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, 52% de la Demanda Química de Oxígeno y 60% de los Sólidos Suspendidos. Además, se obtuvo una producción de metano del 82,4%. El tiempo de retención utilizado fue de 7-8 horas, con una temperatura de 26°C (Mesías, 2021).

Así mismo, otro estudio menciona que con el tiempo de retención hidráulica aplicado fue de 2,67 horas, con una carga hidráulica de 1,49 m/h y un caudal de lixiviado de 0,58 L/seg. Además, se evaluó el rendimiento de los reactores UASB a gran escala en la India para el tratamiento de aguas residuales municipales, obteniendo una eficiencia de remoción del 51%

para la Demanda Química de Oxígeno, 56% para la demanda Bioquímica de Oxígeno y 54% para los Sólidos Suspendidos Totales. (Suquisupa et al. 2023).

Figura 2. Resultados de los análisis fisicoquímicos del lixiviado del lodo residual



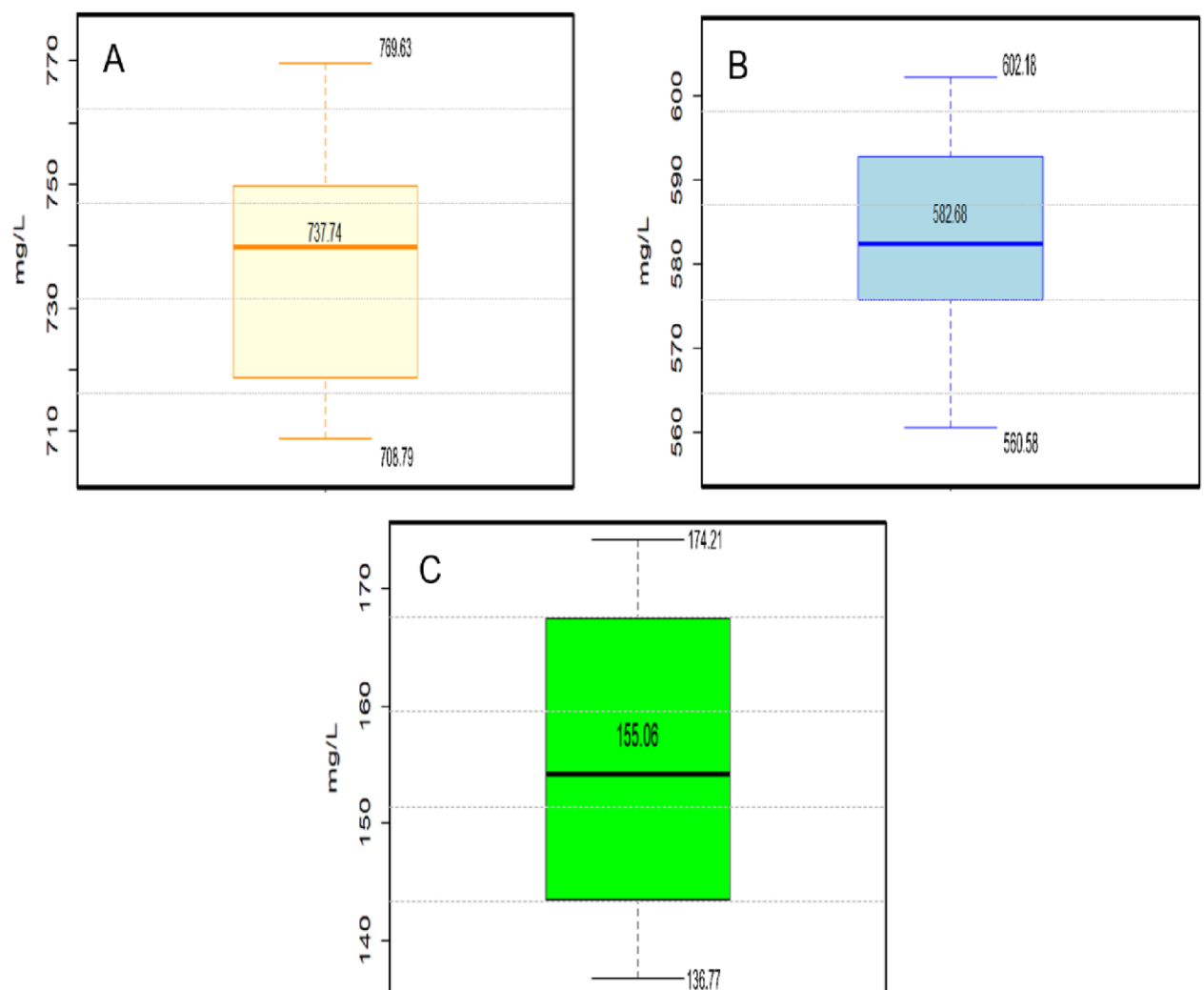
Nota. Esta figura indica que A = pH, B = conductividad eléctrica, C = temperatura y D = salinidad.

Fuente. Elaborado por los autores, con la aplicación de R Studio.

Los resultados obtenidos del análisis de varianza ANOVA de los parámetros fisicoquímicos en la **Figura 2** se indicó que en la letra A consistió en pH, este valor osciló entre un valor 7.09 – 7.55, demostrando que se encuentra ligeramente alcalina, favoreciendo a la descomposición de la materia orgánica según la comparación con Medina et al. (2020). La letra B, perteneció a la conductividad eléctrica que se encontró entre 1 498 – 1 790 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicando que se encuentra con una cantidad moderada de minerales en el lodo residual, no obstante, puede influir en la

actividad microbiana (Calderón & Pulgar, 2023). La letra C correspondió a la temperatura, ya que, se encontró entre 21.71 – 23.10 °C, manifestando que se encuentra en los rangos moderados para el proceso digestivo anaeróbico de los lodos residuales ya que según Reyes et al. (2020) indica se encuentra en temperaturas idóneas para el crecimiento de los microorganismos y conseguir eficiencia en el proceso. Por último, la letra C se refirió a la salinidad presentó valores entre 0.80 – 0.98 UPS, evidenciando que se encuentra en rangos bajos la salinidad en el lodo residual, por lo que Soto (2021) sugiere que debe tener bajos niveles de salinidad, caso contrario la degradación de la materia orgánica será lenta debido a su contenido de sodio en el lodo residual.

Figura 3. Resultados de los análisis fisicoquímicos de sólidos totales, volátiles y fijos.



Nota. Esta figura indica que A = sólidos totales, B = sólidos volátiles, C = sólidos fijos.

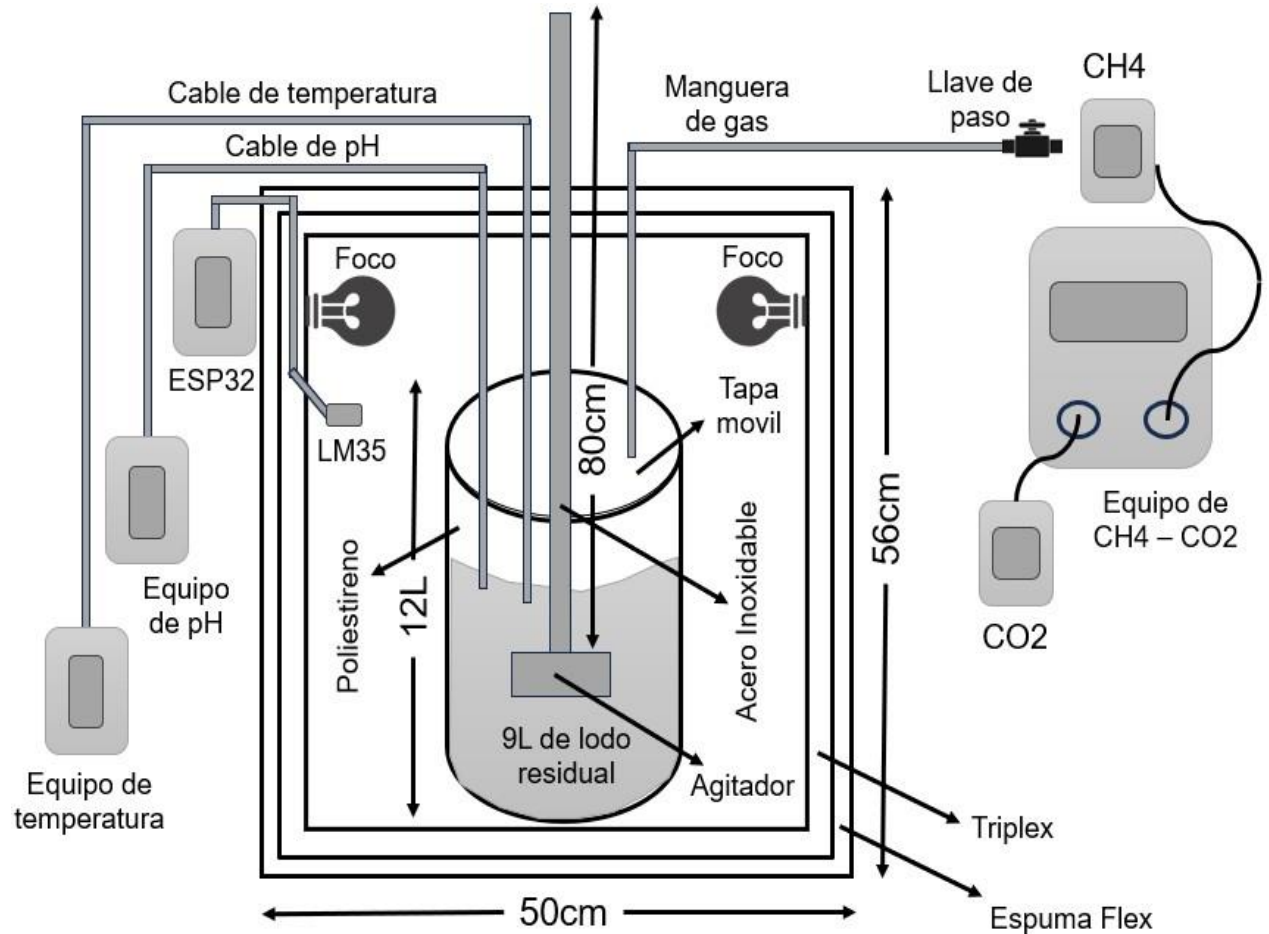
Fuente. Elaborado por los autores, con la aplicación de R Studio.

Los resultados obtenidos de los análisis de varianza ANOVA de los parámetros fisicoquímicos en la **Figura 3** indican que la letra A equivalió a los sólidos totales que estuvieron entre 708.79 - 769.63 mg/L, indicando moderada presencia de sales minerales, compuestos orgánicos y nutrientes. Sin embargo, hay que controlar el valor total de sólidos totales, ya que puede contener otros contenidos y no se podría asegurar la calidad de la digestión anaeróbica (Cárdenas & Molina, 2022). Con la letra B fueron los sólidos volátiles que estuvieron entre 560.58 – 602.18 mg/L, manifestando que tiene buena cantidad de materia orgánica, es por ello, que Salinas (2023) corrobora que mientras más materia orgánica exista, más eficiente será el proceso de digestión anaeróbica ya que contienen gran cantidad de compuestos. Por último, la letra C que se complementó con los sólidos fijos que se encontraron entre 136.77 – 174.21 mg/L, evidenciando que tiene cantidad baja de materia inorgánica, por lo tanto, Salinas (2023) manifiesta que estos no pueden ser descompuestos por los microorganismos debido a que tienen material no biodegradable.

13.3. DISEÑO DEL BIORREACTOR A ESCALA PILOTO.

El biorreactor a escala piloto no tuvo fallas en el control de temperatura, pH y metano, por lo cual, el biorreactor funcionaba dentro de la provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, dentro de la Universidad Técnica de Cotopaxi en condiciones de 2702msnm, además, para haber incrementado el porcentaje de metano no se excedió de 60°C (temperatura termofílica) para que la codigestión fluctuó adecuadamente en el proceso. Sin embargo, el costo del biorreactor fue de \$80 con todos los materiales y sistematización del mismo. El diseño se elaboró, con base a la información existente sobre la cantidad de biorreactores anaeróbicos con su proceso completo hasta completar la metanogénesis y conseguir el metano, con lodo residual, pero se puede modificarse los biorreactores de acuerdo al volumen que se necesite ser estudiado.

Figura 4. Diseño de biorreactor a escala piloto del proyecto de investigación.



Nota. Esta figura indica las dimensiones del biorreactor a escala piloto.

Fuente. Elaborado por los autores.

Como se puede observar en la **Figura 4** se obtuvo el diseño idóneo para la digestión anaeróbica, siendo crucial, para el monitoreo en base al diseño planteado, por lo tanto, Czekala et al. (2023) en su estudio de digestión anaeróbica planteó que la temperatura, el pH y la tasa de carga orgánica (OLR) son factores clave que afectan el rendimiento de los biorreactores. Dependiendo de si las condiciones son mesófilas (temperaturas moderadas) o termófilas

(temperaturas más altas) jugando un rol crucial en la actividad microbiana y a su vez de metano.

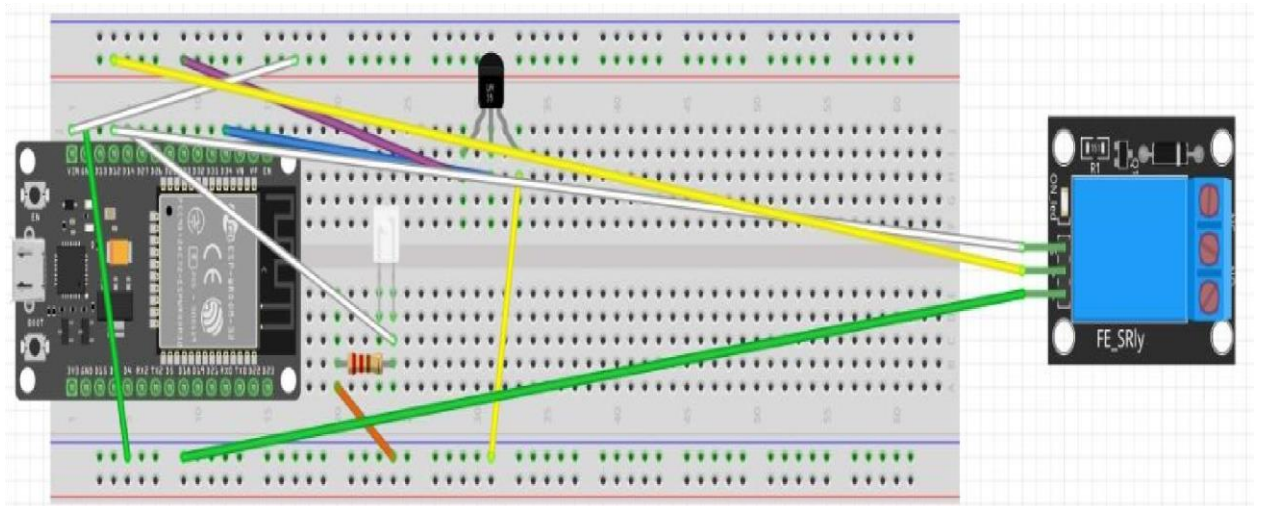
Por otro lado, según Mesías (2021) en su estudio el cuerpo del reactor es donde se lleva a cabo el tratamiento de lixiviados y la generación de gas. Además, está diseñado para mantener el lodo anaeróbico dentro del reactor, lo que permite maximizar el tiempo de retención de los sólidos y favorece una adecuada zona de sedimentación. Este diseño ayuda a reducir la turbulencia del efluente en la parte superior, lo que a su vez facilita una sedimentación estable del lodo, optimizando el proceso de tratamiento. El proceso dentro del reactor se desarrolla en cuatro fases. En la primera fase, las bacterias se encargan de hidrolizar los compuestos

orgánicos, transformándolos en formas que luego pueden ser adsorbidas por las bacterias en la siguiente fase. Durante este proceso, las bacterias producen enzimas extracelulares que facilitan la hidrólisis de los biopolímeros fuera de la pared celular, generando una reacción de hidrólisis que hace los compuestos más accesibles para su descomposición (Suquisupa et. al, 2023).

13.4. RESULTADOS DE PROGRAMACIÓN

El funcionamiento de la tarjeta ESP32 con todos sus implementos no tuvo inconvenientes en su funcionamiento y trabajo arduamente durante los 32 días, apagando y encendiendo los focos, conforme al lenguaje de programación que se colocó para su ejecución, no existió anomalías tampoco en que los focos de 40watts se quemaran o dejaran de funcionar, es decir, todo funciono correctamente hasta el final del monitoreo.

Figura 5. Tablero de circuitos de conexión en base al lenguaje de programación planteado.

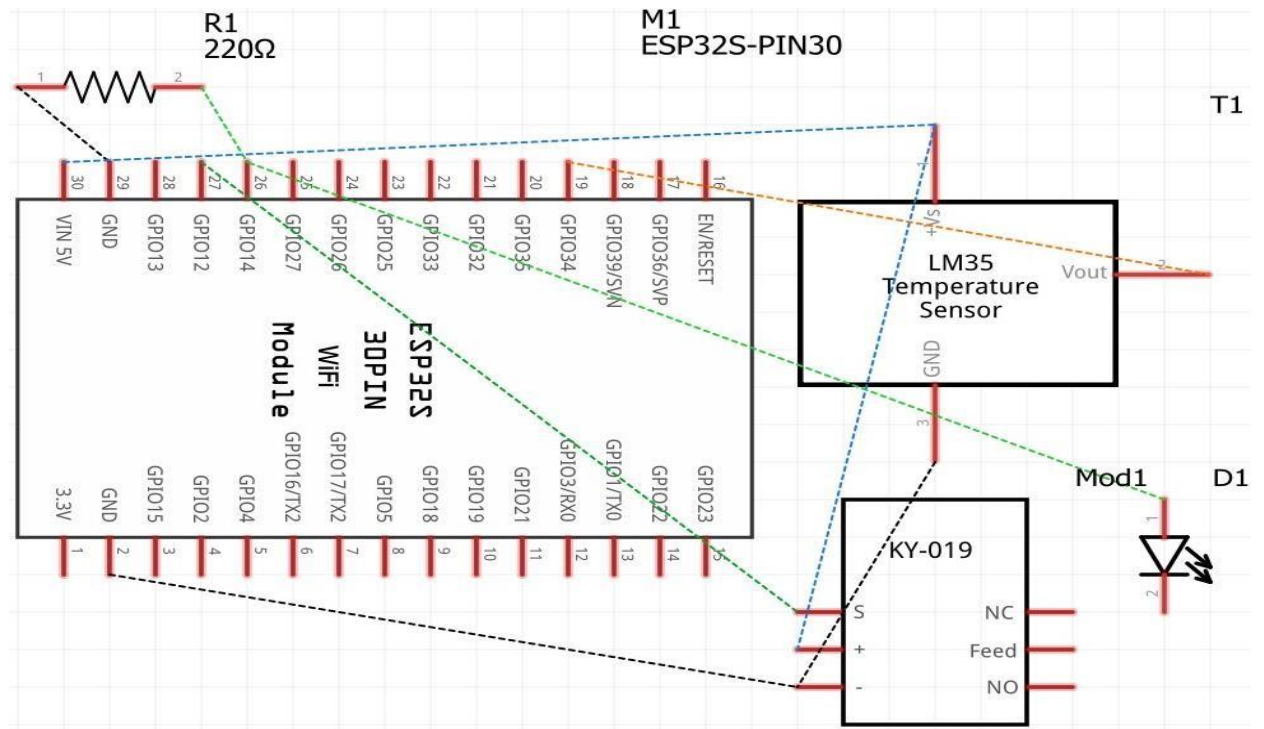


Nota. Esta figura indica la conexión de los cables e implementos para el funcionamiento.

Fuente. Elaborado por los autores, con la aplicación Fritzing 0.9.10.

Como se puede observar lo que presenta la **Figura 5** que es el tablero de circuitos ya colocado en base a los pines conectados a cada implemento y cumplan con su rendimiento.

Figura 6. Esquema de conexión en base al lenguaje de programación planteado.



Nota. Esta figura indica el esquema de funcionamiento de programación.

Fuente. Elaborado por los autores, con la aplicación Fritzing 0.9.10.

Como se puede observar en la **Figura 6** es el esquema en como los pines de la tarjeta ESP32 fueron conectadas, por lo que el GPI034 fue conectado al sensor de temperatura LM35, el GPI014 fue conectado al LED y el GPI012 fue conectado al relé, cabe mencionar que todo se programó y el relé ayudo a automatizar los focos de 40watts que estaban en el interior del biorreactor y el LED sirvió para identificar por afuera cuando los focos están encendidos o apagados adentro del biorreactor.

13.5. RESULTADOS DEL MONITOREO DEL BIORREACTOR A ESCALA PILOTO

Tabla 5. Resultados del proceso anaeróbico en el biorreactor (Metano, pH, Temperatura).

Día	Fecha	Metano		pH	Temperatura
			ppm		
1	09/12/2024	0	6,8	59,4	2
2	10/12/2024	0	6,8	59,8	
3	11/12/2024	0	6,8	60,0	4
4	12/12/2024	0	7,0	59,8	
5	13/12/2024	1	7,2	59,6	
6	14/12/2024	1	7,2	59,7	
7	15/12/2024	2	7,2	60,0	8
8	16/12/2024	2	7,2	60,0	

9	17/12/2024	3	6,9	59,7			
10	18/12/2024	3	6,9	59,8			
11	19/12/2024	3	6,8	59,7			
12	20/12/2024	4	6,8	59,8			
13	21/12/2024	5	7,3	59,8	14	22/12/2024	6 7,3
				60,0			
15	23/12/2024	6	7,3	59,5	16	24/12/2024	6 6,2
				59,5			
17	25/12/2024	7	6,3	59,8	18	26/12/2024	7 6,3
				59,9			
19	27/12/2024	7	7,3	59,8	20	28/12/2024	8 7,3
				59,7			
21	29/12/2024	8	7,3	60,0	22	30/12/2024	8 7,3
				60,0			
23	31/12/2024	9	6,8	59,5			
24	01/01/2025	11	6,8	59,7			
25	02/01/2025	12	6,8	59,7	26	03/01/2025	13 7,4
				59,9			
27	04/01/2025	13	7,5	59,9	28	05/01/2025	15 7,5
				59,8			
29	06/01/2025	16	7,5	60,0	30	07/01/2025	18 7,5
				60,0			
31	08/01/2025	20	7,5	59,9	32	09/01/2025	21 7,5
				59,9			

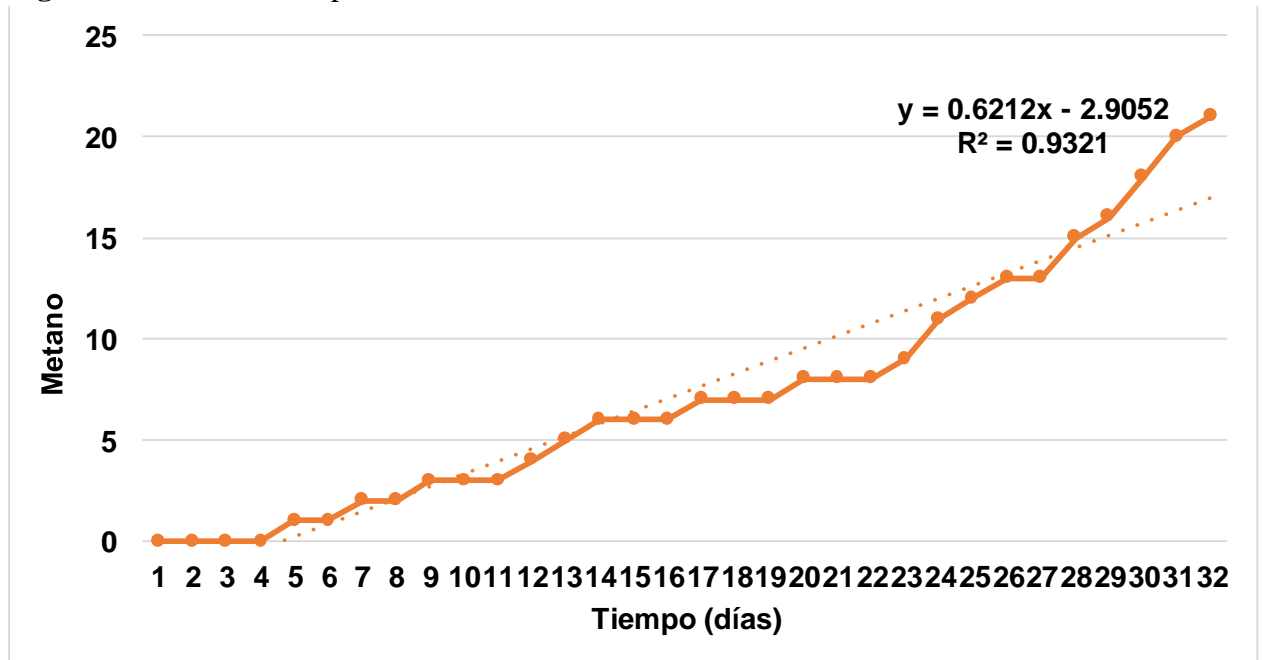
Nota. Esta tabla indica los resultados de metano, pH y temperatura dentro de 32 días.

Fuente. Elaborado por los autores.

En la **Tabla 5** podemos apreciar que en los primeros 4 días la producción de metano se mantiene en una constante de 0, mientras que el pH en los 3 primeros días es constante con un 6,8 y la temperatura tiene variaciones debido a la programación establecida en el sistema del

biorreactor. A partir del quinto día la producción de metano se encuentra en 1ppm con un pH de 7.2 y la temperatura de 59.6, desde ahí la producción de metano va subiendo significativamente, por el lado del pH se mantiene en los rangos normales para que la producción de biogás no se vea perjudicada. Tomando en cuenta que tenemos un valor mínimo de 0 ppm y máximo de 21 ppm.

Figura 7. Gráfico de dispersión de metano en función de los 32 días de monitoreo.



Nota. Esta figura indica la dispersión de los datos con su línea de tendencia.

Fuente. Elaborado por los autores.

En la **Figura 7** se puede apreciar durante los primeros 4 días no existe una producción de biogás, debido a que en los primeros días ocurre la fase de hidrólisis y acidogénesis, en la que por acción de la actividad hidrolítica se fraccionan las moléculas complejas en sus monómeros más simples (Cayo, 2024). Posteriormente, a partir del quinto día se dan los procesos de metanogénesis donde los microorganismos aprovechan todos los productos orgánicos generados y comienza la producción de biogás, además, se puede observar que cada día que pasa aumenta o se mantiene la producción, pero no decae los valores y en entre el lapso de algunos días se mantiene constantemente, es decir, se mantienen con los mismos resultados y después progresa.

Cabe mencionar, que se respetaron los parámetros de producción de metano ya que el biorreactor se adecuó de lo necesario, por lo tanto, la fórmula de producción:

$$y = 0.6212x - 2.9052$$

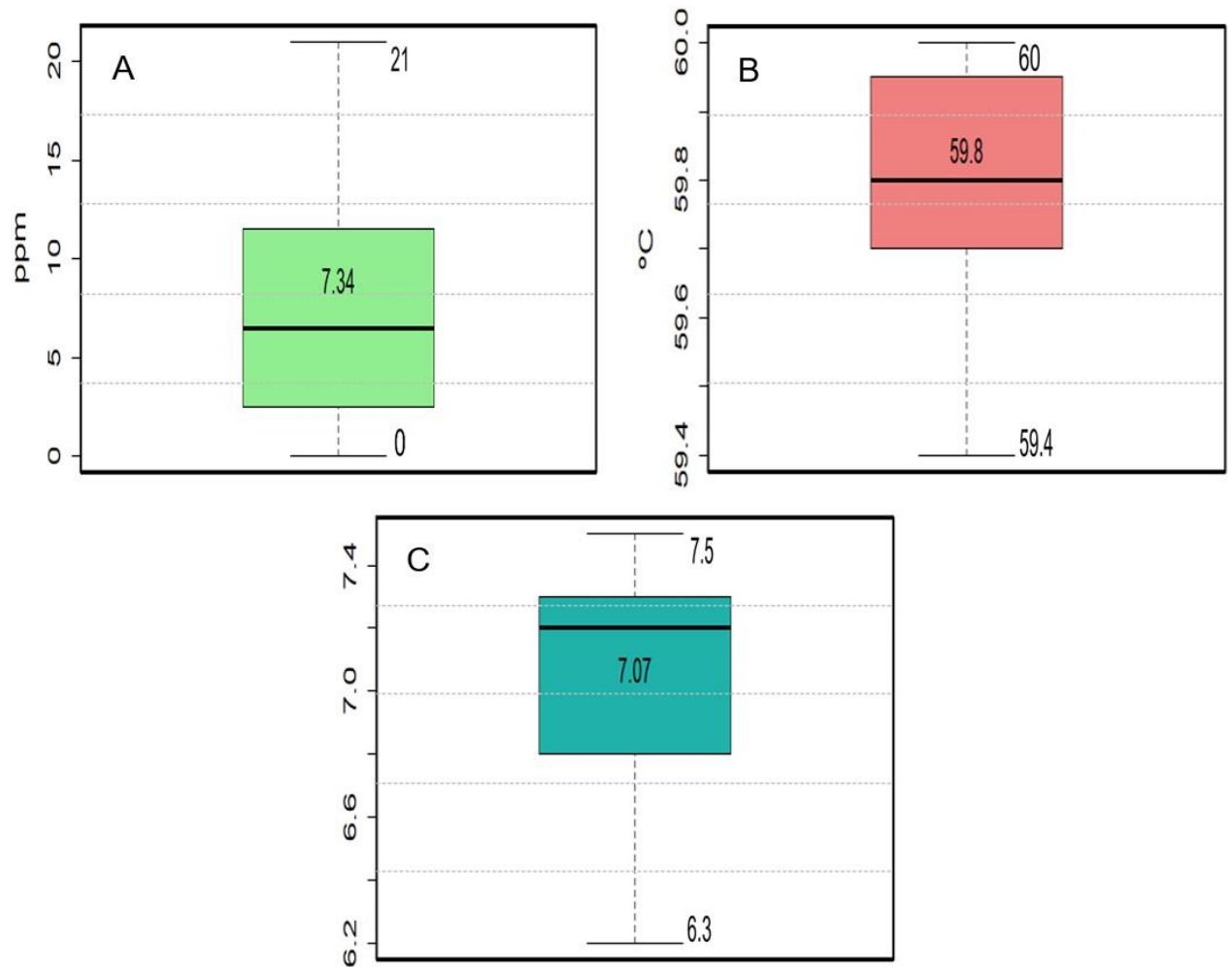
Donde: y = Es la concentración de metano.

x = Es el tiempo de producción de metano.

Con un ajuste de R^2 de 0.9321 en su línea de tendencia, representando una ecuación recta con pendiente positiva, es decir, que si el proceso del monitoreo continuaba seguía subiendo la producción de metano linealmente en función del tiempo. En cambio, a (Tovar et al. 2023) en Colombia en la Universidad Nacional, determinó una fórmula de con pendiente positiva con $y = 0.0057x + 0.1995$, reflejando una correlación de ajuste R^2 de 0.9543 en base a la concentración de metano en ppm. Por lo que comparando el resultado del autor y el del presente estudio reflejó que tienen aproximaciones en base a resultados similares usando lodo residual de las plantas de tratamiento, por lo cual, se podría seguir implementando estos biorreactores con sistematizaciones en ARDUINO con sus respectivos sensores y diseños.

Para (Pérez, 2021) los primeros días resume en 1mL / h de producción de biogás. Desde el día 53 hasta el día 102 de la operación continua, la producción se resume 3 mL/h y 34 mL/h, respectivamente. Lo cual indica un aumento en la tendencia de producción de biogás en 49 días de operación a una producción máxima de 55m L/h en el día 167.

Figura 8. Resultados del monitoreo de metano, pH y temperatura.



Nota. Esta figura indica que A = metano, B = pH y C = temperatura.

Fuente. Elaborado por los autores, con la aplicación de R Studio.

Los resultados obtenidos de los análisis de varianza ANOVA de los parámetros fisicoquímicos en la **Figura 8** indican que la letra A equivalió al metano que estuvo entre 0 ppm – 21 ppm, indicando el progreso diario, en base a la producción con la digestión anaeróbica. Con la letra B fue el pH que estuvo entre 6.3 – 7.5, manifestando que estuvo en los rangos moderados para que la carga microbiana pueda producir metano. Por último, la letra C que se complementó con la temperatura que se encontró entre 59.4 – 60 °C, evidenciando que se mantuvo una temperatura constante, simplificando que la temperatura no bajó más de 59 y se encontraba en esos valores debido a que la temperatura bajaba al momento de que el foco de 40watts se encontraba apagado, es por ello, que en la toma del dato se recopiló esa información.

13.6. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA Y COSTOS ENERGÉTICOS

Durante los 32 días de digestión anaeróbica de los lodos residuales, se evaluó la cantidad de metano recuperado como fuente de energía. A través del monitoreo constante del metano

generado por cada día. Se sumaron los resultados obtenidos, lo que permitió determinar la eficiencia energética alcanzada a partir del lodo residual.

Datos

Sumatoria de la concentración del metano = **235ppm**

Volumen del gas = **3 L**

Poder Calorífico Inferior del metano = 55,53 kJ/g **Fuente:** (Rodríguez et. al, 2021)

El poder calorífico del metano se encuentra en kJ/g, pero para el proyecto de investigación se consideró convertirlo a kWh/kg. Esto se hizo porque, en la fórmula de calor liberado, las unidades de kg se eliminan en ambos términos, dejando solo la unidad de kWh, que es la unidad deseada para el resultado.

$$55,53 \text{ kJ/g} \left| \frac{1}{\text{kWh}} * \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ kJ 1 kg}} \right| = 15,425 \text{ kWh/kg}$$

Por lo tanto, el poder calorífico en base al diseño es de = **15,425 kWh/kg**

A continuación, calculamos la masa sumando la cantidad de metano producido en el biorreactor, el cual se expresó en ppm, una unidad equivalente a mg/L. Usando esta unidad, se pudo calcular la masa de metano generada, considerando los 3 L de volumen del biorreactor, que representó el espacio disponible donde se formó el metano.

Masa del metano = cantidad de producción * volumen

$$\text{Masa del metano} = 235 \text{ mg/L} * 3 \text{ L}$$

$$\text{Masa del metano} = 975 \text{ mg}$$

Se tuvo en cuenta que el resultado de la masa del metano se encuentra en mg, por lo tanto, conforme a la formula de calor liberado la masa se debe encontrar en kg.

$$975 \text{ mg} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000000 \text{ mg}} \right| = 0,000975 \text{ kg}$$

Calculamos el calor liberado (Q)

$$Q = m * PCI$$

$$Q = 0,000975 \text{ kg} * 15,425 \text{ kWh/kg}$$

$$Q = 0,01503 \text{ kWh}$$

Por lo tanto, con 235ppm de metano se consiguió 0,01503 kWh, eso quiere decir, que la energía calculada, se puede ocupar para electrodomésticos o equipos eléctricos, pero durante cierta cantidad de tiempo ya que depende de la potencia del equipo que se quiera ocupar, por lo tanto, para determinar el tiempo de uso de cada aparato, se ocupó la siguiente formula:

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

Por lo tanto, si se estima el potencial energético de la producción de metano para dar uso a cosas o equipos de uso diario, a continuación, se detallará el tiempo en el cual se podría ocupar para los siguientes electrodomésticos:

Foco LED (12 W = 0,12 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,0150 \text{ kWh}}{0,12 \text{ kW}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,12 \text{ horas} = \mathbf{7 \text{ min } 12 \text{ seg}}$$

Televisión 32" (90 W = 0,90 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,0150 \text{ kWh}}{0,90 \text{ kW}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,016 \text{ horas} = \mathbf{58 \text{ seg}}$$

Computadora (200 W = 2kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

Potencia del equipo (kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,0150 \text{ kWh}}{2 \text{ kW}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,0075 \text{ horas} = \mathbf{27 \text{ seg}}$$

Ventilador (60 W = 0,60 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,0150 \text{ kWh}}{0,60 \text{ kW}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,025 \text{ horas} = \mathbf{1 \text{ min } 30 \text{ seg}}$$

Refrigeradora (350 W = 3,5 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,0150 \text{ kWh}}{3,5 \text{ kW}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,0042 \text{ horas} = \mathbf{15 \text{ seg}}$$

Generador de metano (1500 W = 15 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}} * \text{eficiencia del generador}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,0150 \text{ kWh}}{15 \text{ kW}} * 0.38$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,00038 \text{ horas} = \mathbf{1.36 \text{ seg}}$$

Cabe mencionar, que para que un generador de metano 1500 W funcione para 1 hora de uso se debería tener 15 kW de gas metano. Por ese motivo, el diseño del biorreactor necesitaría ser más grande para obtener un volumen más extenso y de ese modo, obtener más energía para dar

funcionamiento al generador de metano. Pero es importante que el diseño, complemento en recuperar energía, ya que la cantidad de 0,0150 kWh, puede encender los electrodomésticos, por cierta cantidad de tiempo, como se detalló anteriormente.

En la planta de tratamiento de Aguas Residuales de Quitumbe se genera 43 200 L de lodo residual diario, por lo tanto, se realizó una regla de 3 para determinar la fórmula ahorro económico y energético se podría obtener si se plantea biorreactores de gran escala para obtener energía renovable. Contemplando que en el estudio se realizó con 9 L de lodo residual para obtener 0,0150 kWh.

$$\begin{array}{cc} 9 \text{ L} & 0.0150 \text{ kWh} \\ 43\,200 \text{ L} & x \end{array}$$

El resultado estimado fue que si se utilizan los 43 200 litros diarios de lodo residual se pudiera obtener 72 kWh por día, siendo que en el Ecuador por parte del ministerio de Energía y Minas menciona que el valor del kWh de energía equivale a 9 ctvs de dólar. Por ese motivo, se podría generar un ahorro económico, es decir, por la implementación de un biorreactor se obtendría un ahorro diario de 6.48 centavos de dólar por cada 72 kWh consumido al día.

Por lo tanto, se realizó la extrapolación de los datos en Excel con la fórmula de tendencia, para obtener los valores que se obtuviera si se siguiera monitoreando el valor del metano durante un periodo de 100 días, como se puede observar en el **Anexo 40**.

El resultado de la extrapolación y de la sumatoria del periodo de los 100 días dio un valor de 3339 ppm de metano, por ende, se procedió a realizar el cálculo para verificar cuan eficiente sería para el consumo energético en electrodomésticos.

Datos

Sumatoria de la concentración del metano = **3 339 ppm**

Volumen del gas = **3 L**

Poder Calorífico Inferior del metano = **15,425 kWh**

Masa del metano = cantidad de producción * volumen

$$\text{Masa del metano} = 3\,339 \text{ mg/L} * 3 \text{ L}$$

$$\text{Masa del metano} = 10\,017 \text{ mg}$$

Se tuvo en cuenta que el resultado de la masa del metano se encuentra en mg, por lo tanto, conforme a la fórmula de calor liberado la masa se debe encontrar en kg.

$$10\,017 \text{ mg} \left| \frac{1 \text{ kg}}{1000000 \text{ mg}} \right| = 0,010017 \text{ kg}$$

Calculamos el calor liberado (Q)

$$Q = m * PCI$$

$$Q = 0,010017 \text{ kg} * 15,425 \text{ kWh/kg}$$

$$Q = 0,1545 \text{ kWh}$$

Por lo tanto, con 3 339 ppm de metano se consiguió 0,1545 kWh, eso quiere decir, que la energía calculada, se puede ocupar para electrodomésticos o equipos eléctricos, por ello, se ocupó la siguiente fórmula:

$$\text{T tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

Por lo tanto, si se estima el potencial energético de la producción de metano para dar uso a cosas o equipos de uso diario, a continuación, se detallará el tiempo de uso que daría la cantidad de energía mediante la extrapolación de los 100 días:

Foco LED (12 W = 0,12 kW)

$$\text{T tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{T tiempo de uso} = \frac{0,1545 \text{ kWh}}{0,12 \text{ kW}}$$

$$\text{T tiempo de uso} = 1,28 \text{ horas} = \mathbf{1 \text{ hora } 37 \text{ seg}}$$

Televisión 32" (90 W = 0,90 kW)

$$\text{T tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

Potencia del equipo (kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,1545 \text{ kWh}}{0,90 \text{ kW}}$$

Tiempo de uso = 0,171 horas = **10 min 12 seg**

Computadora (200 W = 2kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,1545 \text{ kWh}}{2 \text{ kW}}$$

Tiempo de uso = 0,0772 horas = **4 min 38 seg**

Ventilador (60 W = 0,60 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,1545 \text{ kWh}}{0,60 \text{ kW}}$$

Tiempo de uso = 0,2575 horas = **15 min 24 seg**

Refrigeradora (350 W = 3,5 kW)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía disponible (kWh)}}{\text{Potencia del equipo (kW)}}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,1545 \text{ kWh}}{3,5 \text{ kW}}$$

Tiempo de uso = 0,0441 horas = **2 min 38 seg**

Generador de metano (1500 W = 15 kW)

Energía disponible (kWh)

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{\text{Energía}}{\text{Potencia del equipo (kW)}} * \text{Eficiencia del generador}$$

$$\text{Tiempo de uso} = \frac{0,1545 \text{ kWh}}{\text{kW}} * 0,38 \text{ 15}$$

$$\text{Tiempo de uso} = 0,00391 \text{ horas} = \mathbf{14 \text{ seg}}$$

Cabe recalcar, que para que un generador de metano 1500 W funcione para 1 hora de uso se debería tener 15 kW de gas metano. Por ese motivo, el diseño del biorreactor por la extrapolación complementó la recuperación de energía, ya que la cantidad de 0,1545 kWh, puede encender los electrodomésticos, por más cantidad de tiempo, como se detalló anteriormente.

Por lo tanto, se podría generar un ahorro económico, es decir, por la implementación del biorreactor de 12 L y la extrapolación se obtendría un ahorro de 1.39 centavos de dólar por cada 0,0150 kWh consumido, de hecho, si el procedimiento de la digestión anaeróbica continuara se pudiera obtener más energía y por supuesto ahorro económico.

Por otra parte, el estudio de Jaramillo & Tamayo (2019) sobre la evaluación de biogás con lodo residual, obtuvo 0.0592 kWh de 15 L colocados en el biorreactor, posterior a aquello, hizo referencia al potencial energético relacionados en focos, computadoras, microondas, televisor, plancha y lavadora, obteniendo el tiempo máximo en los focos con 17 min 46 seg y un tiempo mínimo en el microondas de 28 seg de uso, eso varía dependiendo de la potencia del equipo por lo cual, los equipos grandes generan mayor potencia y es por ello, que no podrían durar mucho tiempo encendidos.

13.7. RECUPERACIÓN DE NUTRIENTES

Para la recuperación de nutrientes se detalló los resultados en base a los macronutrientes ya que el lodo residual sobrante del biorreactor se pudiera usar como recuperación de áreas y producción de especies forestales de la parte alta del Campus CEASA, a continuación, se reflejan los resultados obtenidos después de la digestión anaeróbica:

Tabla 6. Resultados de los macronutrientes del lodo residual.

Parámetros	Resultados	Unidad
Nitrógeno	0,52	%p/p
Fósforo	0,0047	%p/p

Potasio

<0.001

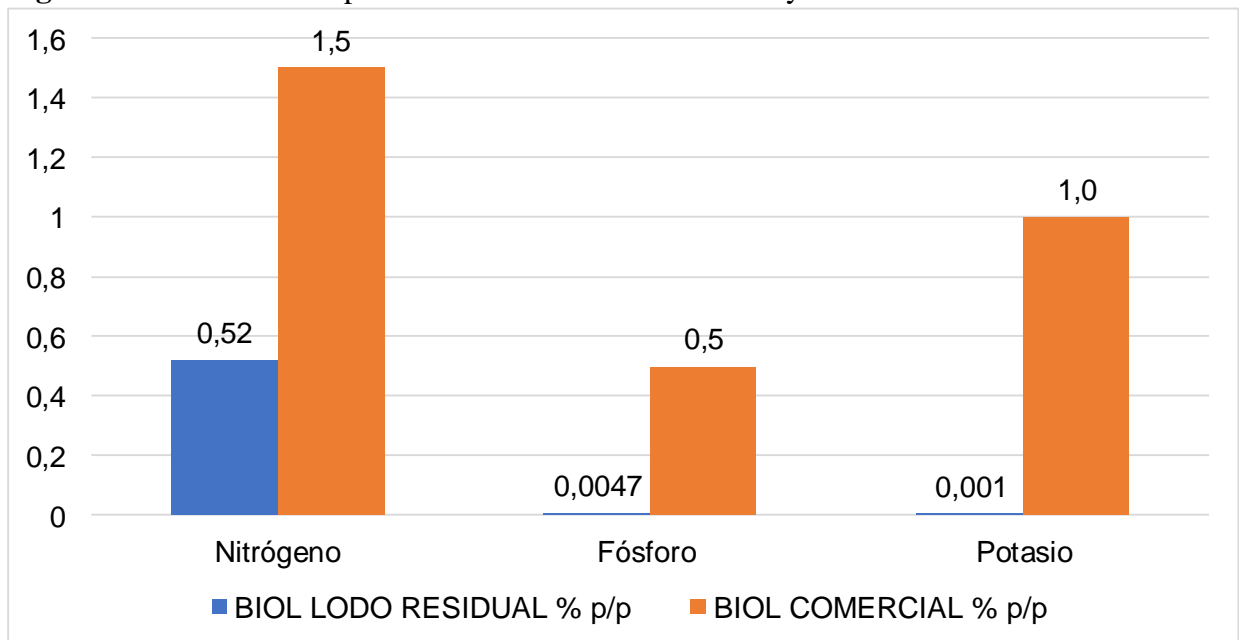
%p/p

Nota. Esta tabla indica los resultados del lodo residual después del proceso anaeróbico.

Fuente. Elaborado por los autores.

En la **Tabla 6** se observa que los resultados obtenidos para los nutrientes en el suelo son los siguientes: nitrógeno con un 0,52 % p/p, fósforo con un 0,0047 % p/p y potasio con un valor inferior a 0,001 % p/p. Por otro parte, Herrera et. al. (2022) menciona que empleo una eficiencia NPK de 50, 15, 40% en plantas y al suelo, no afecto para nada el crecimiento de las plantas e incrementaron sus brotes. A partir de estos valores de referencia, al aplicar en plantas no generaría gran controversia, pero al aplicar en suelos erosionados, pueden ayudar a que recupere de a poco los nutrientes del mismo.

Figura 9. Resultados comparativos del biol de lodo residual y biol comercial.



Nota. Este grafico indica la comparación entre el biol de lodo residual y el biol comercial.

Fuente. Elaborado por los autores.

En la **Figura 9** se puede observar que los parámetros de nitrógeno, fosforo y potasio del biol del lodo residual, están por debajo de los resultados idóneos del biol comercial para recuperación de suelos, por lo que, el nitrógeno tiene una relación de 0.98 %p/p entre ambos resultados, el fosforo tiene una relación de 0.4953 %p/p y el potasio tiene una relación de 0.999 %p/p. Por lo que, Gonzales et al. (2023) manifiesta que en varios estudios se ha descubierto que las adiciones de lodos residuales tratados como biol mejoran la actividad enzimática en un 30%, mejorando de manera general la fertilidad de suelos erosionados. Por lo tanto, los resultados

obtenidos pueden ayudar a estabilizar los suelos ya que contienen nutrientes que pueden abastecer a los microorganismos a que mejoren las propiedades biológicas, siendo una alternativa para garantizar la sostenibilidad de los suelos.

Es por ello, que este escenario resalta la importancia de la reutilización de materiales orgánicos ricos en nutrientes, como los lodos residuales. Según Franco (2021), la aplicación de estos lodos en suelos agrícolas y forestales se presenta como una alternativa relevante, dado que contienen una alta concentración de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, que son esenciales para el desarrollo inicial de las plantas y suelos infértiles.

13.8. RESULTADOS DEL ANALISIS DE VALIANZA

En la determinación de p value en los parámetros físico químicos en cuanto pH, conductividad eléctrica, temperatura, salinidad, solidos totales, volátiles y fijos, se obtuvo:

El valor p value de pH es de 0.005270241, se puede decir que el resultado es estadísticamente significativo lo que indica que está por debajo del 0,05 rechazando la hipótesis nula. Por otro lado, el valor p value de conductividad eléctrica es de 0.05843892, se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0,05 y no se puede rechazar la hipótesis nula. Además, el valor de p value de temperatura es de 0.2862865 en R Studio se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0,05 y no se puede rechazar la hipótesis nula. El valor de p value de salinidad es de 0.5713081 en R Studio se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0,05 y no se puede rechazar la hipótesis nula.

El valor de p value de sólidos totales es de 0.426288 en R Studio se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0,05 y no se puede rechazar la hipótesis nula. El valor de p value de sólidos volátiles es de 0.6653011 en R Studio se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0,05 y no se puede rechazar la hipótesis nula. El valor de p value de sólidos fijos es de 0.4339278 en R Studio se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0,05 y no se puede rechazar la hipótesis nula.

En cambio, el valor de p value en los parámetros de monitoreo del biorreactor en cuanto a metano, pH y temperatura se obtuvo:

Además, se procesaron los datos estadísticamente utilizando ANNOVA y el valor de p value de metano es de 0.01835936 en R Studio, se puede decir que el resultado es estadísticamente significativo lo que indica que está por debajo del 0.05 rechazando la hipótesis nula antes planteada. El valor de p value del pH es de 0.2803247 en R Studio se puede decir que el resultado estadísticamente tiene una diferencia significativa lo que indica que está por arriba del 0.05 y no se puede rechazar la hipótesis nula. El valor de p value de temperatura es de 0.0000002014799 en R Studio se puede decir que el resultado es estadísticamente significativo lo que indica que está por debajo del 0.05 rechazando la hipótesis nula.

14. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14.1. CONCLUSIONES

- Se puede concluir que al analizar los parámetros fisicoquímicos del lodo residual de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus CEASA ha permitido caracterizar la composición y propiedades del lodo. Estos análisis fueron fundamentales para conocer la viabilidad del lodo como materia prima para los procesos de recuperación de energía y nutrientes, los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre el pH con 7,31, conductividad eléctrica 1 621 $\mu\text{S}/\text{cm}$, temperatura 22.28 °C, salinidad 0,86 UPS, solidos totales 734,34 mg/L, volátiles 582,68 mg/L, fijos 155,05 mg/L, cromo <0,40 mg/L, hierro <0,10 mg/L y arsénico 0,150 mg/L, en donde este último parámetro mg/L no cumplió con sus límites permisibles ya que está por encima del 0,1 mg/L..
- Se evaluó, el diseño del prototipo del biorreactor a escala piloto se desarrolló teniendo en cuenta parámetros operativos clave. La temperatura se mantuvo a 60°C, lo que corresponde a un ambiente termofílico, ideal para optimizar la actividad microbiana. El pH se monitoreó dentro del rango de 6,5 a 8,0, ya que fuera de estos valores los microorganismos no actuarían de manera eficiente. Además, se estableció un tiempo de retención hidráulica de 32 días, dado que el proceso biológico de la co-digestión y la producción de metano del lodo residual requiere este tiempo para completarse adecuadamente. La producción de metano fue medida en ppm para luego evaluar la eficiencia del biorreactor en términos de energía renovable. Estos parámetros fueron fundamentales para optimizar el proceso de digestión anaeróbica, maximizando la producción de biogás y asegurando condiciones óptimas para la actividad microbiana.
- Por último, la evaluación del rendimiento del lodo residual dentro del biorreactor ha demostrado su potencial para la recuperación de energía y nutrientes. El resultado de

energía fue de 0.0150 kW/h, demostrando que esa cantidad de energía compensaría a encender electrodomésticos y generadores eléctricos convencionales de 1500W de metano, con tiempos estimables debido a que el diseño es piloto y solamente se ocupó 3L de volumen, además, si se ocupa con lodos residuales a gran escala como la de la planta de tratamiento de Quitumbe de sus 44 200 L/d se podría generar 72 kWh con la implementación de biorreactores anaeróbicos, por otro lado, la recuperación de nutrientes se estudió en base a los macronutrientes como el nitrógeno 0,52 %p/p, fosforo 0,0047 %p/p y potasio <0.001 %p/p, demostrando que los resultados serían eficientes para el uso de uso de suelos erosionados, ya que complementarían con nutrientes a los microorganismos para que progresen en su fertilización.

14.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere evaluar la planta de tratamiento en base a los parámetros físico químicos para controlar los límites máximos permisibles, debido a que se consideró en el estudio que existe Arsénico, este metal pesado, no debería existir, ya que el Campus solo debería emitir materia orgánica, por lo tanto, se debería controlar los laboratorios y reactivos que se lanzan por el drenaje.
- Se recomienda seguir adelante con el diseño del biorreactor propuesto, ya que, en los 32 días de operación, se logró generar una cantidad de energía significativa a partir del metano. Sin embargo, al extrapolar los resultados a un periodo de 100 días, se observó un aumento considerable en la producción de energía, lo que indica que un tiempo de retención más largo podría mejorar notablemente la eficiencia del sistema. Esto sugiere que, al ajustar y perfeccionar los parámetros operativos, el biorreactor podría ofrecer un rendimiento aún mayor, lo que lo hace muy prometedor para la producción de energía renovable a mayor escala.
- Por último, es importante continuar evaluando cómo se encuentran los nutrientes del lodo residual, ya que esto garantizará que, cuando se aplique a los suelos que contengan carbonato de la zona alta del Campus Salache, pueda realmente generar mejoras en la calidad del suelo y en el crecimiento de especies arbóreas.

15. BIBLIOGRAFÍA

Bruno, A. (2019). ESP32 NODE MCU. Tesis Ing. Microelectrónica. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

https://www.microelectronicash.com/downloads/ESP32_MANUAL.pdf

- Calderón, J., & Pulgar, A. (2023). Efecto de la conductividad eléctrica a partir de la salinidad y sólidos disueltos en los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación para la remoción de compuestos nitrogenados en aguas residuales domésticas. Tesis Ingeniero Ambiental. Universidad de la Costa. Barranquilla, Colombia.
<https://repositorio.cuc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ce136f98-0ab0-41b1-9928-18e8ff08dce5/content>
- Calle, S. (2023). Diseños de investigación cualitativa y cuantitativa. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. 7(4): 1865-1879.
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7016
- Canales, A., Quispe, B., Romero, R., Villafuerte, N., Ramos, J., Aguilar, J., & Canqui, B. (2021). Diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano. *Selva Andina Biosphere*. 9(1): 81-91.
<https://doi.org/10.36610/j.jsab.2021.090200081>
- Cárdenas, G., & Molina, F. (2022). Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión. *Revista Ingeniería*. (27)3. e17945.
<https://doi.org/10.14483/23448393.17945>
- Castillo, A., Criolla, E., & Oñate, P. (2020). Diseño e implementación de una PTAR por lodos activos a escala de laboratorio, Facultad de Ciencias Epoch. *Revista Ciencia Digital*. 4(1): 385-406. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i1.1119>
- Castillo, J., Balarezo, L., Vinces, M., & Zambrano, H. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista Reimat*. (5)1: 24-25. <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat/article/view/2499/2672>
- Castro, R., Solís, M., Chicatto, V., & Solís, A. (2020). Producción de biogás mediante codigestión de estiércol bovino y residuos de cosecha de tomate (*Solanum Lycopersicum* L). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. (36)3: 529-539.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v36n3/0188-4999-rica-36-03-529.pdf>
- Cayo, J. (2024). Efecto de la adición de lodos centrifugados de la PTAR – Ambato sobre el proceso de biodigestión de residuos verdes provenientes de mercados. Tesis Ing. Biotecnólogo. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.

<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d440f452-f1fa-4eec-895d-894d343e7ffc/content>

- Cedeño, J., & Lascano, M. (2023). Determinación del tiempo de retención hidráulica en sistemas plásticos compactos utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis Ing. Civil. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/21847/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-489.pdf>
- Cejas, M., Liccioni, E., Aldaz, S., Murillo, M., & Venegas, G. (2023). Enfoque cuantitativo y cualitativo: Una mirada de los métodos mixtos. Fundación Editorial de la Universidad Nacional Experimental de Los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (FEDUEZ). https://www.researchgate.net/publication/374418696_ENFOQUE_CUANTITATIVO_y_CUALITATIVO_Una_mirada_de_los_metodos_mixtos
- Codina, L. (2020). Como hacer revisiones bibliográficas tradicionales o sistemáticas utilizando bases de datos académicas. *Revista ORL*. 11(2): 139-153. <https://doi.org/10.14201/orl.22977>
- Correa, Y. (2022). Economía circular: optimización de la energía generada en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Tesis MSc. Hidrología Y Gestión de recursos hídricos. Universidad de Alcalá. Alcalá, España. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/52792/TFM_Correa%20Serrano_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Czekala, W., Nowak, M., & Bojarski, W. (2023). Anaerobic digestion and composting as methods of bio-waste management. *Sciendo*. 27(1): 173-186. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0013>
- De la Cueva, S., Veana, F., Arjona, M., Álvarez, C., & Pérez, S. (2021). Optimización de las variables del proceso de digestión anaerobia de lactosuero en la producción de biogás. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*. (37): 307-318. <https://doi.org/10.20937/RICA.53879>
- Encalada, M. (2024). Estudio de peligrosidad de lodos residuales de perforación de la industria petrolera ubicada en la provincia de Orellana. Tesis. Ing. Ambiental. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador.

<https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/4db4eb42-eedc-4849-a88d7f3c1728a294/content>

EPMAPA. (2022). Análisis en muestras de agua clara (cruda y potable). Righ Solutions, Righ Partner. Quito, Ecuador.
https://www.epmapasd.gob.ec/documentos/lotaip/2023/otros/Analisis_de_Muestras_de_Agua_Clara_Cruda_y_Potable.pdf

ESA. (2020). El ciclo del carbono. Agencia Espacial Europea iniciativa del cambio climático.
https://climate.esa.int/media/documents/ESA_CCI_paquete_de_recursos_educativos_El_Ciclo_Del_Carbonio_11_14.pdf

Fajardo, D., & Londoño, A. (2020). Desarrollo de un biorreactor de bajo costo para la disminución de los requerimientos de oxígeno externo en un consorcio alga-bacteria para la producción de polihidroxialcanoatos (PHA). Tesis Ing. Químico. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia.
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7779/1/6142409-2020-IIQ.pdf>

Flores, C., & Marca, L. (2022). Análisis de respuesta de los relés de sobrecorriente en régimen permanente. Tesis Ing. Eléctrico. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/22589/1/UPS-CT009770.pdf>

Franco, K. (2021). Caracterización fisicoquímica de lodos provenientes de una planta de tratamiento por tipo de residuo. Tesis Lcda. Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico Superior Martínez de la Torre. Veracruz, México.
<https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/4600/1/CARACTERIZACION%20FISICOQUIMICA%20DE%20LODOS%20PROVENIENTES%20DE%20UNA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20POR%20TIPO%20DE%20RESIDUO%20IA%202021.pdf>

Gil, L., & León, C. (2021). Diseño y construcción de un biorreactor batch tipo tanque agitado y aireado para la producción de proteína unicelular. *Revista Rebiol.* 41(1):16-22.
<https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/3596/4271>

- Gondi, R., Kavitha, S., Yukesh, R., Parthiba O., Kumar, G., Kumar, V., & Banu, R. (2022). Sistema basado en algas para la eliminación de contaminantes emergentes de aguas residuales: una revisión. *Tecnología de biorrecursos*. 344(B): 126245.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126245>
- González, B. (2023). Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales de la central térmica la propicia de la Provincia de Esmeraldas. Tesis Ing. Química. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador.
<http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/20308/1/96T00917.pdf>
- Guerrero, C., Arguello, L., & Pérez, M. (2023). El cumplimiento de las normas ambientales y su impacto en la comunidad local. El caso de Austrogas, Ciudad de Ventanas-Provincia de Los Ríos, Ecuador. *Revista De Investigación e Innovación*. 8(2). 45–56.
<https://doi.org/10.33262/rmc.v8i2.2869>
- Herrera, R., Vasquez, S., Granja, F., Molina, M., Capa, M., & Guamán, A. (2022). INTERACCIÓN DE N, P Y K SOBRE CARACTERÍSTICAS DEL SUELO, CRECIMIENTO Y CALIDAD DE FRUTO DE CACAO EN LA AMAZONÍA ECUATORIANA. *Bioagro*. 34(3): 277-288.
<http://www.doi.org/10.51372/bioagro343.7>
- Hessenauer, M. (2021). Clean Water Act Methods Update Rule for the Analysis of Effluent. *Revest Environmental Protection Agency*. (86)95.
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2021-05-19/pdf/2021-09596.pdf>
- ISO. (2010). *ISO 5667-10:2010 - Quality of water — Sampling — Part 10: Sampling of sediments and sludge*. International Organization for Standardization.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5667:-10:ed-2:v1:en>
- Izamara, C., & Macedo, A. (2022). Diseño de una metodología para establecer la directriz en la investigación científica relacionada con lodos residuales provenientes de PTARs de ámbito municipal. Tesis Lcda. En Ingeniería Petroquímica. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca de Lerdo, México.
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/137646/Tesis-CARMEN%20IZAMARA%20ANTONIO%20MACEDO-1.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

- Jaramillo, M., & Tamayo, D. (2019). Evaluación de la producción de biogás a partir de lodos residuales recolectados de una PTAR, en un reactor de la Pontificia Universidad Javeriana. Tesis Ing. Químico. Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/42cd0279-ba88-4d94b81a-5d6ff4ac86c3/content>
- Julio, I. (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la codigestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos. Tesis Ing. Sanitaria. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. <https://core.ac.uk/download/pdf/286649696.pdf>
- Lamas, D., & Massa, E. (2022). Hidrólisis enzimática de residuos del procesamiento de Surel (*Trachurus lathami*): caracterización de las fracciones obtenidas. *Revista Científica*. (30)2: 2-9. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/50/502701012/502701012.pdf>
- León, J., Godoy, S., & Tixi, H. (2023). Sistema de tratamiento para lodos recolectados por el vehículo hidro succionador en la empresa de agua potable y alcantarillado del municipio de Guaranda. *Revista Dominio de las Ciencias*. (9)4: 3-51. <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/3239/7437>
- Liang, H., Zhao, C., Wang, R., Fang, B., Li, M., & Mo, R. (2024). Progress in reaction mechanisms and catalyst development of carbon dioxide methanation. *Journal of CO2 Utilization*. 84: 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102845>
- López, N., Ábrego, A., & Poggi, H. (2022). Mecanismos de inhibición de la metanogénesis con lovastatina y análisis de la expresión génica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. (38): 58-67. <https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/54357>
- Martínez, M., Campos, L., Piña, B. (2023). Cálculo de la generación de biogás por el método de digestión anaerobia a partir de biomasa extraída de la central de abasto de Ecatepec, Estado de México. *Tecnología en Marcha*. 36(4): 68-75. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i4.6106>
- Medina, M., Negrete, M., Gámez, F., Álvarez, D., & Conde, E. (2020). La aplicación de lodos residuales afecta a corto plazo, la biomasa microbiana a su actividad en suelos sódicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 36(3): 577-591.

<https://doi.org/10.20937/RICA.53425>

- Mesías, D. (2021). Revisión y análisis de bibliografía actualizada sobre el tratamiento anaeróbico de lixiviados de rellenos sanitarios municipales. Tesis Ing. Alimentos y Biotecnología. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c7ef6786-7b29-4e4e-b0dcf8a24b51a651/content>
- Molina, A., & Moya, M. (2022). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales y la determinación de las propiedades físico químicas en la población de San Carlos, Cantón el Chaco, Provincia de Napo, para su dimensionamiento. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21908/1/UPS%20-%20TTS614.pdf>
- Montoya, K. (2023). Efecto de lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento sobre indicadores de producción en Maíz (*Zea mays L.*). Tesis Ing. Agrónomo. Universidad Agraria Del Ecuador. Milagro, Ecuador.
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MONTOYA%20LINO%20KEVIN%20FREDDY.pdf>
- Moreno, M., Pino, Rodríguez, Y., & Caraballo, F. (2021). La gestión integrada de calidad, ambiente, seguridad y salud en el trabajo con enfoque de liderazgo. *Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación RILCODS*. (15): 2-9.
<https://www.eumed.net/es/revistas/rilcoDS/15-enero21/calidad-trabajo-liderazgo>
- Navarrete, K. (2020). Optimización de la fertilización de macronutrientes en el cultivo de Moringa (*Moringa oleífera*) mediante SIG. Tesis Ing. Agrónomo. Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil, Ecuador.
https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/NAVARRETE%20SORIA%20KAROL%20ISABEL_compressed.pdf
- Nguyen, L., Quintana, A., Rowland., & Vegh, G. (2023). Mitigación del metano del sector energético. *Revista The Global Climate & Health Alliance*. 6(14): 8-15.
<https://climateandhealthalliance.org/wpcontent/uploads/2023/09/MethaneReport-Energy-ES.pdf>
- Osorio, M., Carrillo, W., Negrete, J., Loor, X., & Riera, E. (2021). La calidad de las aguas

- residuales domésticas. *Polo del Conocimiento*. 3(56), 228-245.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7926905>
- Pérez, H. (2021). Evaluación de lodos metanogénicos en el tratamiento de aguas residuales mediante un reactor UASB. Tesis Ing. Químico. Universidad Autónoma de México. Ciudad de México, México.
<https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000814494/3/0814494.pdf>
- Piedra, J. (2023). Propuesta límites permisibles para la identificación y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos y para lixiviados de lodos y rípios de perforación. Una propuesta para complementar el RAOH 2020. Tesis Ing. Petróleos. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24884/1/CD%2013620.pdf>
- Pincay, M., Sabando, E., & Zambrano, E. (2023). Estabilización de fangos activos en planta de tratamiento mediante la técnica de compostaje Bokash. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*. 10(2): 11-22.
<https://incyt.upse.edu.ec/ciencia/revistas/index.php/rctu/article/view/743/629>
- Possetti, G., Rietow, J., Cabral, C., Moreira, H., Colón, C., & Bressani, T. (2024). *Capítulo 8: Recuperación de energía del biogás en reactores UASB que tratan aguas residuales*. Editorial IWA. https://doi.org/10.2166/9781789064261_0201
- Pulgarín, C., Saldarriaga, J., & Correa, M. (2023). Análisis y perspectivas del tratamiento anaerobio y el aprovechamiento de lodos biológicos en América Latina. *Revista EIA*. (19)38: 1-25. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1516>
- Quintero, J. (2022). Diseño de propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales para reducir los niveles de contaminantes de un complejo agroindustrial en la ciudad de Ilo. Tesis Profesional de Ingeniero Industrial, Universidad Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/12406/2/IV_FIN_108_T_E_Quintero_2022.pdf
- Quispe, B., & Azabache, Y. (2022). Relación del proceso de sedimentación de sólidos totales del agua residual y el estado de las redes de alcantarillado pluvial, Moyobamba. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*. (1)1: 291.

<https://revistas.unsm.edu.pe/index.php/reacae/article/view/291/498>

- Raez, B., Jannacone, J., & Gomero, L. (2024). Efecto ecotoxicológico de un lodo digerido de purín de cerdo sobre la lombriz de tierra (*Eisenia fetida*) y maíz (*Zea mays*). *Revista Veterinaria*. 35(2): 43-52. <https://doi.org/10.30972/vet.3527862>
- Ramalho, R. (2021). Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. Barcelona. España. [https://www.google.com.ec/books/edition/Tratamiento_de_aguas_residuales/30etGjzPXywC?hl=es&gbpv=1&dq=Ramalho,+R.+\(2021\).+Tratamiento+de+aguas+residuales.+Editorial+Revert%C3%A9.+Barcelona.+Espa%C3%B1a.&printsec=frontcover](https://www.google.com.ec/books/edition/Tratamiento_de_aguas_residuales/30etGjzPXywC?hl=es&gbpv=1&dq=Ramalho,+R.+(2021).+Tratamiento+de+aguas+residuales.+Editorial+Revert%C3%A9.+Barcelona.+Espa%C3%B1a.&printsec=frontcover)
- Ramírez, D. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. *Revista Investigación e Innovación en Ingenierías*. (1)9: 99-100. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4305>
- Reinoso, D. (2020). Influencia de la cobertura vegetal y relieve sobre el almacenamiento de carbono en el suelo del ecosistema páramo. Tesis Mg. Agronomía Mención Cambio Climático. Universidad Técnica de Ambato. Cevallos, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/2e4dbafe-822d-4940-80fcec89c7dd645c/content>
- Reyes, D., Mora, M., Lugo, J., & Del Águila, P. (2020). Estabilización por vermicomposteo de lodos residuales aplicados en la productividad de Albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 36(2): 371-381. <https://doi.org/10.20937/RICA.53537>
- Rodríguez, Y., Sandoval, S., & Santos, D. (2021). Diseño, construcción y evaluación de un generador de hidrógeno adaptado a un motor de dos (2) tiempos en una bicicleta en la ciudad de Bogotá. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*. 9(18): 65-88. <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2022.v9.n18.a121>
- Rosas, J., & Ramon, J. (2022). Biodegradabilidad de lixiviados procedentes de un relleno sanitario utilizando un sistema de lodos activados flujo pistón. *Orinoquia*. 24(2): 99109. <https://doi.org/10.22579/20112629.633>
- Saldaña, R., & Castillo, J. (2022). Alternativas de estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales, desde un enfoque sistémico: Una revisión. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 13(1): 175-194.

<https://doi.org/10.22490/21456453.4504>

- Salinas, A. (2023). Análisis de los parámetros fisicoquímicos de los lodos de la PTAR de la Ciudad de Panamá por la influencia del proceso de hidrólisis térmica (THP). *Agua, Saneamiento & Ambiente*. 18(1): 1-11. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i1.1548>
- Salto, F. (2023). Propuesta para el aprovechamiento energético de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales del Cantón Naranjito. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Agraria del Ecuador. Milagro, Ecuador. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SALTOS%20MACIAS%20FABIAN%20GUSTAVO.pdf>
- Santamaría, A. (2022). Producción de energía a partir de aguas residuales industriales. Tesis MSc. Hidrología Y Gestión de recursos hídricos. Universidad de Alcalá. Alcalá, España. https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/44119/TFM_Santamaria_Garcia_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Santillán, S. (2021). Diseño de un tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante un sistema de laguna de estabilización para producción de biogás, en el Cantón de Echeandía. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil, Ecuador. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SANTILLAN%20CAMACHO%20SHIRLEY%20NARCISA.pdf>
- Sepúlveda, N., & García, Y. (2022). Aprendizaje basado en proyectos con Arduino. Tesis Ing. Arquitectura. Universidad Central. Quito, Ecuador. https://www.ucentral.cl/ucentral/site/docs/20220930/20220930121511/arduino_f.pdf
- Soto, F. (2021). Evaluación del efecto de la salinidad en la biodiversidad bacteriana presente en un sistema de depuración biológica de lodos activados. Tesis MSc. Orientación en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolas de los Garza, México. <http://eprints.uanl.mx/23823/1/1080328511.pdf>
- Suquisupa, A., Morales, M., Parrales, A., & Morante, M. (2023). Revisión bibliográfica de estrategias para gestión de residuos en plantas industriales. Universidad de Guayaquil, 2(1), 17-33. Guayaquil, Ecuador. <https://doi.org/10.53591/easi.v2i1.2188>

- Swapna, B., Andal, C., Manivannan, S., Jayakrishna, N., & Samba, K. (2020). IoT based light intensity and temperature monitoring system for plants. *Revista ScienceDirect*. 33(7): 3409-3412. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.269>
- Tipán, E. (2020). Evaluación de parámetros físicos y químicos de mezclas de agua residual de la industria láctea y residuos orgánicos para la obtención de materia prima óptima para la producción de biogás. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. Quito, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18610/1/UPS%20%20ST004524.pdf>
- Toapaxi, E. (2022). Alternativa sustentable para el aprovechamiento de lodos activados residuales, generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de empresas de alimentos. Tesis MSc. Producción y Operaciones Industriales. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
<https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/5d5719c8-94bc-46a0-88c6388de0fa1c56/content>
- Toro, C., Goya, D. (2023). Aislamiento de hongos filamentosos en lodos primarios procedentes del tratamiento de aguas residuales de una planta procesadora de atún. Tesis Ing. Biotecnología. Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil, Ecuador.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/26281/1/UPS-GT004729.pdf>
- Tovar, J., Arias, J., Milquez, H., Mayorga, M. (2023). Diseño técnico de un sistema de cuantificación de metano portable y de bajo costo. *Ingeniería*. 28(1): e19053.
<https://doi.org/10.14483/23448393.19053>
- Yugla, D. (2024). Algunas consideraciones sobre los modelos matemáticos y su aplicación a la digestión anaerobia. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*. (6)2: 109-118.
<https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/1030/1415>
- Zurita, S. (2021). Tratamiento de estabilización del lodo residual mediante lombricultura en la planta de tratamiento Parroquia Chongón. Tesis Ing. Ambiental. Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil, Ecuador.
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/ZURITA%20GARZON%20SHIRLEY%20JANE%20TH.pdf>

