

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE JAÉN**

**CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y AMBIENTAL**

**BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO EN UN
SISTEMA BATCH DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
C.P. UÑA DE GATO, BELLAVISTA, CAJAMARCA**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL**

Autores: Bach. Campos Guerrero, José Agustín.

Bach. Delgado Fernández, Wagner Paúl.

Asesor: Dr. Garay Román, Juan Manuel.


**Línea de investigación: Innovación tecnológica para el desempeño y competitividad
para la calidad ambiental**

JAÉN – PERÚ

2025

José Agustín Campos Guerrero Wagner Paúl Delga...

BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO EN UN SISTEMA BATCH DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS C.P. UÑA DE GAT...

-  Quick Submit
-  Quick Submit
-  Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3360445746

Fecha de entrega

3 oct 2025, 9:29 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

3 oct 2025, 9:34 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TIR_DE_ESTI_RCOL_BOVINO_EN_UN_SISTEMA_BATCH_DE_BIODIGESTORES.pdf

Tamaño del archivo

1.3 MB

44 páginas

8190 palabras

45.497 caracteres

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dr. Segundo Sánchez Tello
Responsable (e) de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería




4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 2%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN


Dr. Segundo Sánchez Tello
Responsable (e) de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Ley de Creación N° 29304
Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día jueves 30 de octubre del año 2025, siendo las 11:50, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Irma Rumela Aguirre Zaquinaula.

Secretario: Dr. Luis Arturo Gil Ramírez.

Vocal: Dra. Cinthya Yanina Santa Cruz López

Para evaluar la Sustentación de:

- () Trabajo de Investigación
(X) Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: **BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO EN UN SISTEMA BATCH DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS C.P. UÑA DE GATO, BELLAVISTA, CAJAMARCA**, presentado por los bachilleres **Campos Guerrero, José Agustín y Delgado Fernández, Wagner Paúl**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

- (X) Aprobar () Desaprobar (X) Unanimidad () Mayoría

Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|--------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | () |
| c) Bueno | 14, 15 | (14) |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 12:50 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Dra. Irma Rumela Aguirre Zaquinaula
Presidente Jurado Evaluador

Dr. Luis Arturo Gil Ramírez
Secretario Jurado Evaluador

Dra. Cinthya Yanina Santa Cruz López
Vocal Jurado Evaluador

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, **Campos Guerrero José Agustín**, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 73692024.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado: **“BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO EN UN SISTEMA BATCH DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS, C.P UÑA DE GATO, BELLAVISTA, CAJAMARCA.”**. Asesorado por el Dr. Juan Manuel Garay Román.
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental
2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 27 de enero del 2026



Campos Guerrero José Agustín

ANEXO N°06:

**DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO
DE LA TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (PREGRADO)**

Yo, **Delgado Fernández, Wagner Paúl**, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI **76866119**.

Declaro bajo juramento que:

7. Soy Autor del trabajo titulado: **“BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL BOVINO EN UN SISTEMA BATCH DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS, C.P UÑA DE GATO, BELLAVISTA, CAJAMARCA.”**. Asesorado por el Dr. Juan Manuel Garay Román.
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental
8. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
9. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
10. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
11. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
12. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 27 de enero del 2026



Delgado Fernández, Wagner Paúl

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	07
II. MATERIAL Y MÉTODOS	10
2.1 Población, muestra y muestreo	10
2.1.1 Población	10
2.1.2 Muestra	10
2.1.3 Muestreo	11
2.2 Variables de estudio	11
2.3 Metodología	13
2.4 Procedimiento	15
III. RESULTADOS	24
IV. DISCUSIÓN	32
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
AGRADECIMIENTO	39
DEDICATORIA	40
ANEXOS	41

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1 <i>Parámetros a regir en el modelo de superficie de respuesta</i>	14
Tabla 2 <i>Modelo de superficie de respuesta</i>	15
Tabla 3 <i>% carbono orgánico en estiércol de ganado vacuno y cerdos</i>	24
Tabla 4 <i>% nitrógeno total en estiércol de ganado vacuno y cerdos</i>	24
Tabla 5 <i>Comparación de los parámetros FQM de vacuno y cerdos.....</i>	26
Tabla 6 <i>Evaluación de la DBO en sustrato a descomponer y descompuesto.....</i>	26
Tabla 7 <i>Evaluación de la DQO en sustrato a descomponer y descompuesto</i>	27
Tabla 8 <i>Comparación de la evolución de la DBO y DQO</i>	27
Tabla 9 <i>Optimización del proceso</i>	28
Tabla 10 <i>% nitrógeno estadístico</i>	29
Tabla 11 <i>Valores óptimos.....</i>	29

ÍNDICE DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1 <i>Muestra de insumos orgánicos</i>	10
Figura 2 <i>Muestreo de agua de quebrada libre de hipoclorito</i>	11
Figura 3. <i>Mapa topográfico del fundo. C.P. Uña de gato, Bellavista</i>	12
Figura 4 <i>Esquema de la investigación</i>	13
Figura 5 <i>Manguera conductora y graduación de botella para medir volúmenes</i>	21
Figura 6 <i>Fórmulas preparadas por sustrato y por cada biodigestor</i>	22
Figura 7 <i>Instalación de las botellas atrapadoras de biogás</i>	22
Figura 8 <i>% de compuestos volátiles entre estiércol de ganado y cerdos</i>	25
Figura 9 <i>Diferencia de cenizas entre estiércol de ganado y cerdos</i>	25
Figura 10 <i>Diagrama de Pareto</i>	30
Figura 11 <i>Respuesta óptima</i>	31
Figura 12 <i>Piloto batch anaeróbico</i>	44

RESUMEN

La actividad agropecuaria ha resultado ser una labor observada por contribuir indirectamente con la contaminación ambiental al producir gases de efecto invernadero. **Objetivo:** Evaluar la producción de biogás a partir de estiércol doméstico en un Batch de biodigestores anaeróbicos, en Uña de Gato, Bellavista. **Metodología:** Se caracterizó el estiércol: carbono orgánico (42,5 %), nitrógeno total Kjeldahl (2,3 %), compuestos volátiles (74 %) y cenizas (27 %). Se analizó la demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno (DQO) del sustrato antes y después de su descomposición anaeróbica con bacterias liofilizadas comerciales Hansen, EUA. **Resultados:** El DBO₅ de 4570 ppm mermó a 1280 ppm. mostrando una eficiencia del 72 %. El DQO de 9660 ppm bajó a 3600 ppm. mostrando una eficiencia del 62,7 % evidenciándose la efectividad del proceso anaeróbico en la biodegradación de materia orgánica. El piloto construido con 13 biodigestores anaeróbicos arrojó una producción mínima de 250 mL biogás, un volumen máximo de biogás 440 mL y un volumen óptimo de biogás de 441,97 mL resultado del algoritmo de optimización del diseño estadístico Box-Behnken. **Conclusiones:** El proceso no optimizado generó un máximo de 440 mL; un mínimo de 250 mL. y un volumen óptimo de 441,97 mL.

Palabras claves: Biodigestor, proceso anaeróbico, biogás.

ABSTRACT

Agricultural activity has been shown to indirectly contribute to environmental pollution by producing greenhouse gases. Objective: To evaluate biogas production from domestic manure in a batch of anaerobic biodigesters in Uña de Gato, Bellavista. Methodology: The manure was characterized: organic carbon (42.5%), total Kjeldahl nitrogen (2.3%), volatile compounds (74%), and ash (27%). The biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand (COD) of the substrate were analyzed before and after anaerobic decomposition with commercial freeze-dried bacteria from Hansen, USA. Results: The BOD₅ of 4570 ppm decreased to 1280 ppm, showing an efficiency of 72%. The COD of 9660 ppm decreased to 3600 ppm, showing an efficiency of 62.7% evidencing the effectiveness of the anaerobic process in the biodegradation of organic matter. The pilot built with 13 anaerobic biodigesters yielded a minimum production of 250 mL biogas, a maximum biogas volume of 440 mL and an optimal biogas volume of 441.97 mL resulting from the Box-Behnken statistical design optimization algorithm. Conclusions: The non-optimized process generated a maximum of 440 mL; a minimum of 250 mL, and an optimal volume of 441.97 mL.

Keywords: Biodigester, anaerobic process, biogas.

I. INTRODUCCIÓN

La labor agropecuaria es señalada como una de las actividades más contaminantes del planeta, esto debido a que los residuos que se genera en los establos ganaderos tiende a producir metano (CH_4) como resultado de la biodegradación del estiércol de ganado bovino y cerdos. Sobre este concepto Greenpeace (2008) señaló la ganadería vacuna y ovina son responsables del creciente impacto sobre el cambio climático. En realidad, todos los desechos o materiales derivados de plantas, animales y seres humanos generan biomasa además de población microbiana metabólicamente activa y cultivable, al margen de células metabólicamente activas, pero no cultivables y que existen dentro de estos desechos orgánicos. De acuerdo a las características de estos residuos orgánicos se puede convertir en energía y/o combustible por combustión, gasificación, co-combustión con otros combustibles y, en última instancia, por digestión anaeróbica. Sin embargo, la realidad es que la descomposición del estiércol de ganado emite gases de efecto invernadero como el metano CH_4 y el dióxido de carbono CO_2 ; en este sentido, en el Informe sobre el impacto del actual modelo de agricultura y ganadería sobre el clima: Greenpeace (2010) se afirmó que *“El metano (CH_4), es veinte veces más efectivo que el CO_2 como gas de efecto invernadero, pero es el dióxido de carbono el más relevante de todos estos gases, ya que supone el 60 % del total de todos los gases de efecto invernadero”*.

Recebli (2015) concluyó que la ganadería coadyuva al calentamiento global. A este diagnóstico, otro informe publicado por la FAO (2006) titulado: *Livestock's long shadow*, señaló *“que el crecimiento demográfico y el aumento de los ingresos en todo el mundo, aunados a la transformación de las preferencias alimentarias, están estimulando un acelerado incremento de la demanda de carne, leche y huevos, a la vez que la globalización impulsa el comercio de insumos y productos”*. Esto significa que, más que esperar un decrecimiento de la tendencia, esta se expande conforme se incrementa la población humana. Así, el 26 % de la superficie terrestre está dedicada al pastoreo y producción de forrajes ganaderos. Ello explica, la creciente deforestación, como lo sostiene el informe de la FAO: *“Un gran porcentaje de foresta se convierte en pastizales”*. Precisamente, esta problemática ha sido abordada en la actual investigación, dada que la actividad ganadera es típica en Jaén y sus provincias como Bellavista. El estiércol acopiado en las invernadas del campo ganadero,

diariamente emana gases de metano al medio ambiente; cuando estos volúmenes de rumen bovino podrían convertirse técnica y tecnológicamente en una herramienta auto sostenible de la actividad ganadera sin contaminar el medio atmosférico. Por ello, se propone con la presente investigación demostrar una alternativa viable que sea parte de la solución de esta problemática ambiental. Como parte de la investigación se ha propuesto aplicar una técnica Batch anaeróbica que tiene la ventaja sobre otras técnicas (por ejemplo, proceso de flujo continuo), de escoger el estiércol en cualquier momento, por ende, el tratamiento se puede aplicar en el instante que el usuario lo desee. Osea, la evaluación del progreso de la reacción bioquímica será medida en tiempo real, de forma que se evidenciará el progreso de la descomposición del estiércol bobino y de cerdo a través de la formación de biogás. De esta forma, al concluir con la investigación se hará llegar un ejemplar con los resultados a la familia Delgado propietaria del fundo ganadero para poner en práctica esta técnica. Y, sobre todo, porque los residuos y desechos ganaderos evitaren contribuir con los gases invernaderos al desarrollarse un proceso de descomposición del estiércol de ganado vacuno, cuyo resultado será beneficioso para el medio ambiente.

Sobre el proceso tecnológico de producir biogás a partir de residuos orgánicos se han realizado distintos procesos bioquímicos e investigaciones como Recebli (2015) que ideó una unidad modelo de producción de biogás con un tanque de fermentación (Batch) de 0,5 m³ de capacidad de una granja en el distrito de Urla, Turquía. La cantidad de animales de granja fue de 70 bovinos y 1400 pollos. Los desechos (estiércol de aves de corral y estiércol de animales bovinos) se procesaron anaeróticamente en tanques. La fermentación óptima ocurrió a temperaturas entre 25-34 °C; por lo que no requirió calentamiento adicional para la optimización del proceso. La producción de biogás fue estudiada por separado. En primer lugar, se reunió 350 kg de mezcla de estiércol de bovino (175 kg estiércol + 175 kg de agua), en este volumen se cerró el tanque para dar lugar al proceso. En segundo lugar, llenaron 375 kg de mezcla de estiércol de aves de corral (50 kg de estiércol + 325 kg de agua) cerrando el tanque y dejando seguir el proceso anaeróbico. Luego se evaluaron las tasas de producción de biogás y compararon ambos procesos. Los resultados mostraron 6,33 m³ diarios de biogás para el estiércol de bovino y 0,83 m³ de biogás para el estiércol de aves de corral. Finalmente, concluyeron que el biogás contuvo el 62 % de metano (CH₄) y describió en 21000 KJ/m³ el poder calorífico del biogás. Otra de las importantes investigaciones fue la de Senés (2019) que tuvo como objetivo identificar a través del tiempo la comunidad microbiana productora de biogás. en un digestor anaeróbico seco de 10 toneladas (Batch) que trata el estiércol de

ganado mediante gel de gradiente desnaturalizante electroforesis (DGGE). Además, los residuos bovinos (lixiviados, estiércol, agua de la laguna de oxidación, rumen) fueron caracterizados para determinar su contribución. Caracterizaron los microorganismos de la siguiente manera: *Bacterias* (82% -88%) y una cantidad considerable de *arqueas* (8% -15%) con perfiles particulares para cada etapa de la producción de biogás. Rico *et al.* (2020) evaluaron las relaciones sustrato-microorganismo se representaron mediante la ecuación de Contois. La producción de biogás (principalmente metano CH₄ y H₂S) en el nuevo modelo se asoció principalmente con la degradación de carbohidratos. Linares *et al.* (2017) evaluaron la instalación de un biorreactor Batch. Obtuvieron el biogás y el bioetanol. El principal uso del biogás es transformarlo en energía eléctrica por medio de un generador eléctrico, o usarlo como combustible en máquinas que trabajen con él. En tanto que, Montenegro-Díaz, (2020) desarrolló un combustible obtenido de la fermentación, que fue utilizado como medio energético para el sustento diario. Inclusive, los subproductos como bio-abonos fueron utilizados como fertilizantes orgánicos en sus parcelas.

De forma que la actual investigación tiene como objetivo general: Producir biogás a partir de estiércol bovino mediante un sistema Batch de biodigestores anaeróbicos en el C.P. Uña de Gato, Bellavista, Cajamarca. En tanto que, los objetivos específicos fueron: Caracterizar el porcentaje de carbono, nitrógeno, compuestos volátiles y cenizas del estiércol de ganado y cerdos en estado seco. Determinar el máximo valor de la DBO₅ y DQO del sustrato a descomponer y descompuesto. Construir un piloto para evaluar la producción de biogás diaria de cada biodigestor y determinar la ecuación del modelo ajustado (algoritmo) que optimice el proceso para producir biogás.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Población, muestra y muestreo

2.1.1 Población:

La población fue todo estiércol emitido (una res adulta elimina en promedio hasta 50 kilogramos de purín: orina y excremento) por alrededor de 50 cabezas de bovinos perteneciente al fundo ganadero de la familia Delgado (coordenadas: P-01: E: 746201, N: 9378782; P-02: E: 746160, N: 9378668; P-03: E: 746049, N: 9378594; P-04: E: 746947, N: 9378913; P-05: E: 746280, N: 9378114; P-06: E: 746414, N: 9378913).

2.1.2 Muestra

Se recogió 12 kilogramos de estiércol de ganado bovino y seis kilogramos de estiércol de cerdos.

Criterio de inclusión: El estiércol se recogió dentro de las 24 horas en estado fresco.

Criterio de exclusión: No incluir corrales fuera de la zona de investigación.

Justificación: Ganado consume la misma dieta balanceada.

Figura 1

Muestra de insumos orgánicos



2.1.3 Muestreo

El tipo de muestreo empleado fue no probabilístico, por conveniencia, dado que las muestras fueron seleccionadas de manera deliberada en función de la disponibilidad de sustratos y la necesidad de cumplir con las condiciones experimentales del biodigestor (estado fresco, proporciones específicas de mezcla y fuente hídrica sin cloración).

Figura 2

Muestreo de agua de quebrada libre de hipoclorito



2.2 Variables de estudio

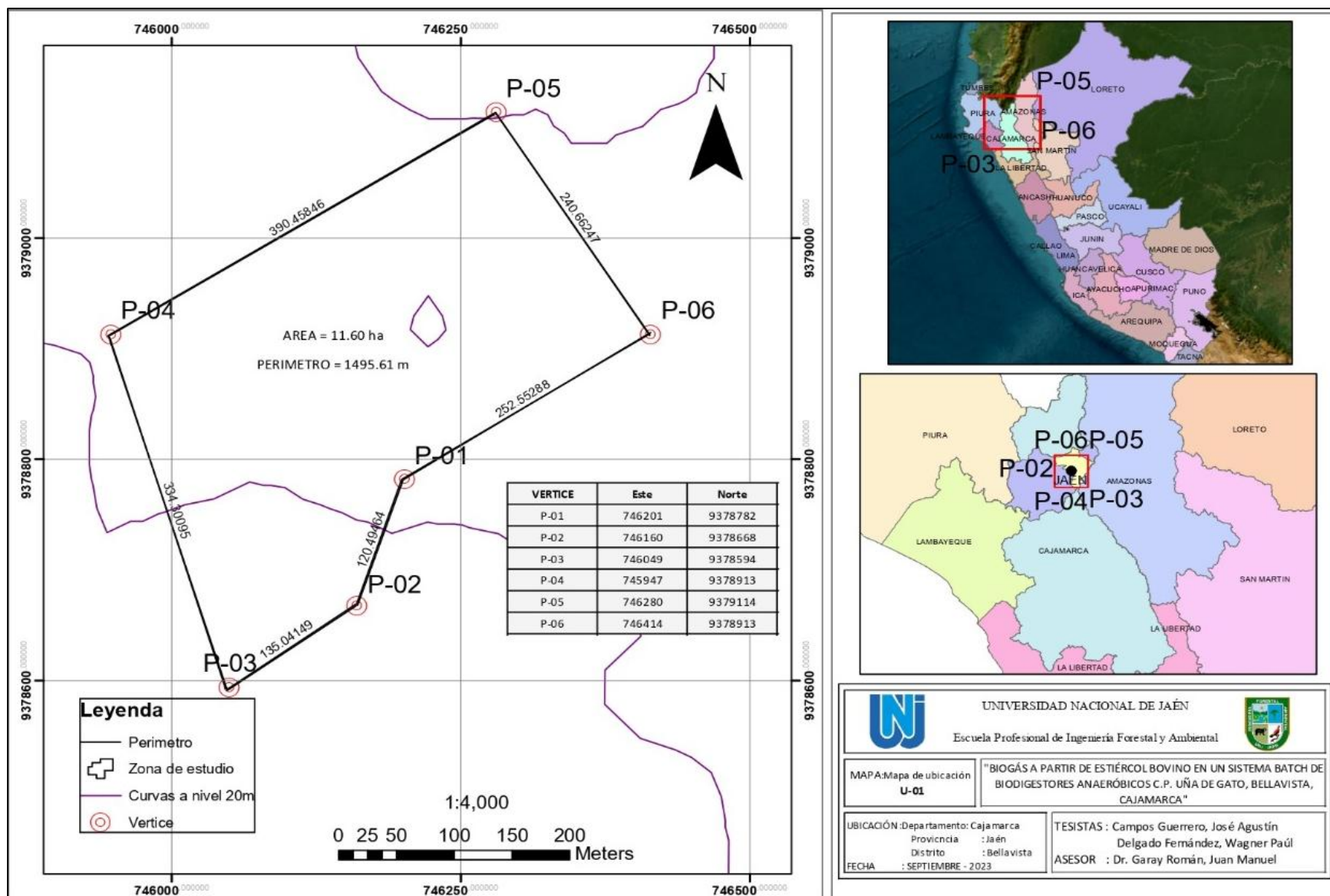
Variables independientes:

- Sales minerales nutritivas (gramos /litro).
- Unidades cultivo anaeróbico/galón
- Estiércol bovino: cerdos gr/galón

Variable dependiente:

- Volumen gaseoso CH₄

Figura 3. Mapa topográfico del fundo. C.P. Uña de gato, Bellavista.

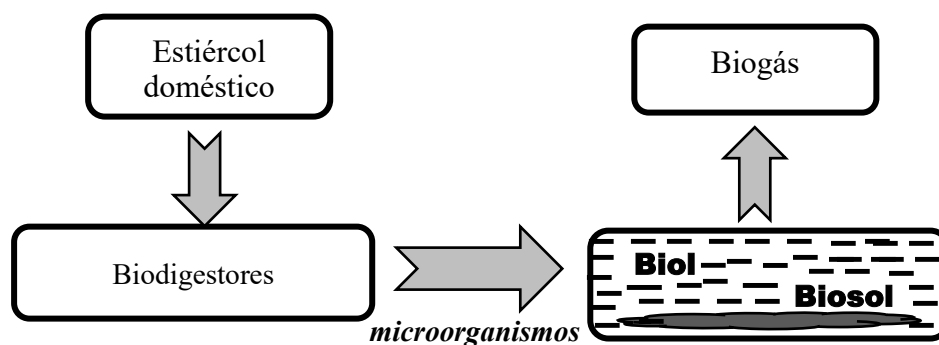


2.3 Metodología

Se evaluó estiércol de bovino de la granja Delgado, sector Uña de gato, distrito Bellavista, provincia de Jaén. De esta manera se logró una biodegradación eficiente de la materia orgánica contenida en el estiércol. El diseño tuvo el siguiente esquema.

Figura 4

Esquema de la investigación



La producción de biogás fue el elemento que indicó el grado de transformación de la materia orgánica. Los insumos y productos se incorporaron al modelo estadístico de optimización de superficie de respuesta.

Técnica:

La técnica de recolección de datos utilizada fue la observación y medición directa en campo y laboratorio. Para ello, se emplearon procedimientos estandarizados de muestreo y análisis físicoquímico, siguiendo protocolos establecidos por Manyi et al. (2013) y normas técnicas vigentes. Las muestras de estiércol y agua se recolectaron, etiquetaron y trasladaron a un laboratorio especializado para la determinación de parámetros como carbono, nitrógeno, compuestos volátiles y cenizas. Adicionalmente, durante el ensayo con biodigestores anaeróbicos, se registraron volúmenes de biogás generados y temperatura del sistema mediante instrumentos calibrados.

Materiales:

Guardapolvo para laboratorio: guantes, mandil blanco, mascarilla, GPS digital, estufa, unidad de filtración a vacío, balanza analítica, beaker o vaso de precipitación, 15 baldes

plásticos de pintura (*cada uno con su tapa*), sierra, silicona, cámara fotográfica, libreta de apuntes, Erlenmeyer de volumen 100, 250 mL, pipeta de volumen 10 mL y fiola volumen 100 mL.

Condiciones batch de biodigestores anaeróbicos:

Tabla 1

Parámetros a regir en el modelo de superficie de respuesta

Nº de biodigestor	X ₁	X ₂	X ₃	Respuesta
1	-	-	0	mL biogás
2	+	-	0	mL biogás
3	-	+	0	mL biogás
4	+	+	0	mL biogás
5	-	0	-	mL biogás
6	+	0	-	mL biogás
7	-	0	+	mL biogás
8	+	0	+	mL biogás
9	0	-	-	mL biogás
10	0	+	-	mL biogás
11	0	-	+	mL biogás
12	0	+	+	mL biogás
13	0	0	0	mL biogás

Fuente: Adaptación de Alberca (2019).

Simbología:

X₁: gr. estiércol bovino: cerdos/galón; X₂: gr. sales nutritivas pastizal/galón y X₃: Unidades cultivo anaeróbico/galón.

(+): valor más alto;

(0): valor medio y

(-): valor mínimo.

Todos los valores fueron seleccionados a discreción de los tesisistas.

Tabla 2*Modelo de superficie de respuesta*

Nivel de carga	X ₁ gr. estiércol bovino: cerdos/galón	X ₂ gr. sales nutritivas pastizal/galón	X ₃ Unidades cultivo anaeróbico/galón(*)
(+)	300:60	20 gr.	12
(0)	170:35	12 gr.	7
(-)	40:10	4 gr.	2

Fuente: Adaptación de Alberca (2019).

(*) La unidad de cultivo anaeróbico, es un sólido liofilizado comercial, en la cual cada unidad contiene 9×10^9 UFC/g de bacterias anaeróbicas como: *Lactobacillus plantarum* y *Pediococcus pentosaceus*; Hansen, EUA.

2.4 Procedimiento:

El análisis químico del estiércol doméstico se realizó sobre las muestras recogidas siguiendo las recomendaciones técnicas formuladas por Manyi *et al.* (2013), esto es, que los tesisistas tomaron las muestras con guantes de jebes y mediante una espátula que depositaran dentro de una bolsa, finalmente ambas muestras fueron selladas con cinta de embalaje. Por otra parte, para conocer la riqueza de materia orgánica (carbono, nitrógeno, compuestos volátiles y cenizas del estiércol) del estiércol, se seleccionaron por separado dos muestras: 500 gramos de estiércol de ganado bovino y 500 gr de estiércol porcino. Luego, fueron trasladados a un laboratorio especializado para su análisis y el estado de las muestras fue de una condición de estiércol fresco en ambos casos. Para la fuente hídrica se tomó agua de quebrada para no causar mortalidad de los microorganismos. el muestreo del sustrato a descomponer fue realizado a partir del valor máximo de dilución: 300 gr estiércol ganado:60 gr estiércol cerdos. Se tomó dos muestras de 250 mL y se selló para su envío al Laboratorio Rivelab SAC.

1.- Determinación del porcentaje de carbono orgánico, método Walkley-Black.**Procedimiento:**

1. Preparación de la muestra

El estiércol fue homogenizado bien. Se pesó aproximadamente 1 g (si es húmedo) o 0,5 g (si es seco) de la muestra triturada en un matraz Erlenmeyer.

2. Adición de reactivos

Se agregó 10 mL de dicromato de potasio 1 N a la muestra en el matraz. Se añadió con cuidado 20 mL de ácido sulfúrico concentrado y lentamente para evitar salpicaduras, y mezcla con movimientos suaves durante 1 minuto para garantizar la reacción.

3. Reacción de oxidación

Se dejó reposar la mezcla durante 30 minutos. Durante este tiempo, el carbono orgánico fue oxidado por el dicromato de potasio en presencia de ácido sulfúrico.

4. Titulación del exceso de dicromato

Una vez completada la oxidación, se diluyó la mezcla con 200 mL de agua destilada. Se añadió 2-3 gotas del indicador (difenilamina o ferroína) a la solución. Se titró el exceso de dicromato con la solución de sulfato de hierro amoniacal 0,5 N, mezclando constantemente hasta que la solución cambie de color (de azul-verdoso a rojizo).

5. Cálculo del carbono orgánico

Se registró el volumen de solución de sulfato de hierro consumido en la titulación (Vt). Luego, se calculó el carbono orgánico con la siguiente fórmula:

$$\text{Carbono orgánico (\%)} = \frac{(10 - Vt) \times N \times 0.003 \times 100}{\text{Peso de la muestra (g.)}}$$

Donde:

Vt: Volumen de solución de sulfato de hierro amoniacal (en mL).

N: Normalidad del dicromato de potasio (1 N).

0.003: Factor que relaciona el carbono equivalente a la oxidación.

2.- Determinación nitrógeno total, método AOAC 976.06 y APHA 4500-Norg C.

Procedimiento

Digestión:

Preparación de la muestra:

Se homogenizó la muestra de estiércol fresco. Se tomó aproximadamente 1-2 g de muestra, luego, se colocó la muestra en un matraz Kjeldahl de 250-500 mL.

Adición de reactivos:

- Se añadió 10-15 mL de ácido sulfúrico concentrado al matraz, y se agregó 0.5-1 g de

catalizador Kjeldahl.

Digestión:

- Se colocó el matraz en el sistema de digestión y calentándolo lentamente hasta que la mezcla se volvió clara (elimina la materia orgánica). Esto tomó 2-3 horas. Luego, se dejó enfriar el matraz antes de continuar.

Destilación

Preparación para destilación:

Una vez enfriado, se transfirió el contenido del matraz Kjeldahl a la unidad de destilación, se neutralizó la solución añadiendo lentamente 50 mL de hidróxido de sodio al 50 % (asegúrate de hacerlo en la campana de extracción).

Captura del amoníaco:

- Se colocó un matraz Erlenmeyer con 25-50 mL de ácido bórico al 4% y 2-3 gotas de indicador debajo del condensador de la unidad de destilación, luego, se inició la destilación, permitiendo que el amoníaco liberado sea arrastrado por el vapor y absorbido por el ácido bórico.

Titulación

Titulación del destilado:

Se titró el destilado con la solución estándar de ácido (HCl o H₂SO₄) hasta alcanzar el punto final (cambio de color del indicador: de verde a rosado).

Registro del volumen:

Se anotó el volumen de ácido estándar utilizado durante la titulación (V).

Cálculo del Nitrógeno Total Kjeldahl

La cantidad de nitrógeno total se calculó con la fórmula:

$$\text{Nitrógeno total (\%)} = \frac{(V - V_b) \times N \times 1.4}{P}$$

Donde:

- V: Volumen de ácido utilizado en la titulación (mL).
- V_b: Volumen de ácido utilizado para el blanco (mL).
- N: Normalidad del ácido estándar (N).
- 1.4: Factor que convierte el nitrógeno de miligramos a porcentaje.
- P: Peso de la muestra (g).

3.- Determinación compuestos volátiles, método cromatografía de gases

Procedimiento

Preparación de la muestra

- **Homogeneización:** Se tomó una muestra representativa del estiércol fresco y mezcla bien para garantizar la uniformidad. Se evitó la pérdida de compuestos volátiles durante la manipulación.
- **Pesado:** Se colocó aproximadamente 5-10 g de la muestra de estiércol en un vial hermético de cabeza de espacio (Headspace vial). Se selló el vial inmediatamente para evitar la pérdida de compuestos volátiles. Se incubó la muestra a una temperatura controlada durante 30 minutos a 1 hora para simular las condiciones naturales de generación de volátiles.

Análisis por cromatografía de gases

a. Preparación del cromatógrafo de gases:

Se configuró el sistema con el detector adecuado (FID para AGVs, TCD para gases generales, o MS para COVs específicos). Se ajustó la temperatura de la columna, inyector y detector según las especificaciones del compuesto objetivo. Columna para AGVs: 80-250 °C. Detector FID: 250 °C.

b. Introducción de la muestra:

Se extrajo una alícuota del gas generado en el espacio de cabeza del vial con una jeringa (1 mL) y luego se inyectó directamente en el cromatógrafo. Se configuró los parámetros de muestreo según las especificaciones del equipo.

c. Corrida cromatográfica:

Se inició la corrida para separar los compuestos volátiles.

Calibración y cuantificación:

Se realizó una curva de calibración con soluciones estándar de los compuestos volátiles de interés. Luego, se calcularon las concentraciones en la muestra basándose en las áreas de los picos cromatográficos y la curva de calibración.

Análisis de resultados:

Se expresaron los resultados en términos de concentración (por ejemplo, mg/L para AGVs o ppm para gases como metano y amoníaco).

- Se convirtieron las concentraciones de gases en emisiones totales para fines de gestión ambiental o balance de carbono.

4.- Determinación cenizas, método AOAC 942.05 y ASTM D3174

Procedimiento

Preparación de los crisoles

Se limpiaron los crisoles con agua destilada y se secaron completamente, luego, se colocaron los crisoles en la mufla a 550 °C durante 1 hora para eliminar cualquier residuo previo. Se retiraron los crisoles con pinzas. Se colocaron en un desecador para enfriarlos hasta temperatura ambiente y se pesaron en una balanza analítica. Se registró este peso como P₁.

Preparación de la muestra

Se homogenizó el estiércol fresco para obtener una muestra representativa. Se pesó una cantidad conocida de muestra (2-5 g) en el crisol previamente tarado. Se registró este peso como P₂ (peso inicial de crisol + muestra).

Calcinación de la muestra

Se colocó el crisol con la muestra en el horno mufla. Se ajustó la temperatura de la mufla a 550–600 °C. Se mantuvo en la mufla durante 4–6 horas o hasta que no haya residuos negros visibles.

Enfriamiento y pesado

Se retiró el crisol de la mufla usando pinzas resistentes al calor y se colocó en un desecador para enfriarlo hasta temperatura ambiente. Se pesó el crisol con las cenizas restantes. Se registró este peso como P₃.

Cálculo del porcentaje de cenizas

Se utilizó la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de cenizas en la muestra:

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{(P_3 - P_1)}{P_2 - P_1} \times 100$$

Donde:

- P₁: Peso del crisol vacío (g).
- P₂: Peso del crisol + muestra fresca (g).
- P₃: Peso del crisol + cenizas después de la incineración (g).

1. Determinación DBO₅: Método 8043 HACH.

Procedimiento

Preparación de la muestra

Se aseguró que la muestra esté a temperatura ambiente antes del análisis. Se filtraron sólidos para eliminar partículas que puedan interferir.

Preparación del vial de reacción

Se retiró el vial del empaque y asegúrate de que esté limpio y sin daños. Se agregó la cantidad recomendada de muestra (normalmente 3 mL para este método) utilizando una pipeta o dispensador.

Adición del reactivo

Se añadió el reactivo HACH específico para la determinación de DBO en la muestra dentro del vial. Se cerró el vial con firmeza y agítalo suavemente para mezclar.

Incubación

Se colocó el vial en una incubadora a 20 °C durante el tiempo especificado (habitualmente 5 días para análisis estándar de DBO). Durante este periodo, el vial permaneció en la oscuridad para evitar interferencias externas, como la fotosíntesis.

Lectura de resultados

Después del tiempo de incubación, se utilizó un colorímetro o espectrofotómetro HACH calibrado. Se introdujo el vial en el equipo siguiendo las instrucciones del fabricante. El instrumento mide la absorción de luz (color generado) y traduce este valor en una lectura directa de DBO en mg/L.

2. Determinación DQO, Método 8000 HACH.

Procedimiento

Preparación del vial de reacción

Selecciona el vial de DQO adecuado según el rango de concentración esperada: Baja: 0–150 mg/L.; media: 0–1500 mg/L o alta: 0–15000 mg/L. Se abrió el vial con cuidado para evitar derrames de reactivo.

Adición de la muestra

Con una pipeta automática, se midió exactamente 2 mL de la muestra y agrégala al vial de reacción.

Mezcla inicial

Se cerró el vial firmemente con su tapa y agítalo suavemente para homogeneizar la muestra con los reactivos.

Precaución: Los reactivos son altamente corrosivos (ácido sulfúrico concentrado y dicromato de potasio).

Digestión de la muestra

Se colocó el vial en el digestor de reactores previamente calentado a 150 °C. se incubó los viales durante 2 horas para garantizar la oxidación completa de la materia orgánica. Después del tiempo de digestión, se apagó el digestor y deja enfriar los viales hasta que alcancen la temperatura ambiente.

Medición de absorbancia

Se limpió cuidadosamente el exterior del vial con un paño limpio para eliminar residuos. Introducir el vial en el espectrofotómetro/colorímetro HACH, configurado para el programa específico de DQO (según las instrucciones del fabricante). El equipo brindó lectura de la absorbancia y con ese dato se calculó automáticamente la concentración de DQO en mg/L.

Cálculos y resultados

Se utilizó la curva de calibración proporcionada por HACH para convertir la absorbancia en concentración de DQO.

Se construyeron 13 biodigestores anaeróbicos empleando baldes de pintura con tapa hermética, adaptados como sistemas Batch compactos (carga discontinua) para la producción y captura de biogás. Los baldes tuvieron una capacidad aproximada de cuatro litros, a las cuales se le adaptaron salida de gases mediante la instalación de conexiones herméticas de mangueras de PVC de diámetro de 1/8 de pulgada, selladas con silicona líquida para evitar fugas de gas sobre cada tapa del biodigestor, de esta manera se obliga el paso del biogás hacia botellas para medir su volumen,

Figura 5

Manguera conductora y graduación de botella para medir volúmenes



Preparación del sustrato y carga del biodigestor

Se mezcló estiércol de ganado y porcino como fuente de materia orgánica, fáciles de ser degradadas por bacterias anaeróbicas. Las proporciones de dilución fueron de acuerdo al diseño estadístico (ver tabla 2), esto es, baldes con dosis 300 gr estiércol ganado con 60 gr estiércol cerdos; otros baldes con dosis 170 gr estiércol ganado con 35 gr estiércol cerdos y otros con baldes de dosis 40 gr estiércol ganado con 10 gr estiércol cerdos. Todos disueltos y diluidos con agua de quebrada para facilitar el proceso de fermentación. Junto a este sustrato orgánico, se agregó a cada balde un contenido de 20, 12 y 4 gramos de sales pastizales, además de 12, 7 y 2 unidades sólidas liofilizadas de cultivo (9×10^9 UFC/g de bacterias anaeróbicas: *Lactobacillus plantarum* y *Pediococcus pentosaceus*; Hansen, EUA) por cada galonera de cuatro litros. Se perforó la tapa del balde para instalar una salida de gases mediante una manguera sellada con pegamento silicona para evitar en la posible la fuga de gas. A continuación, los gases fueron conducidos a una botella de gaseosa con agua, debidamente milimetrada con una cinta para facilidad de medir el gas expulsado de cada balde con el sustrato a fermentar durante todo el tiempo que duró el proceso de 30 días a una temperatura ambiental promedio de 28 °C.

Figura 6

Fórmulas preparadas por sustrato y por cada biodigestor



Figura 7

Instalación de las botellas atrapadoras de biogás



Los datos se analizaron estadísticamente:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j$$

Donde:

Y: Variable dependiente.

β_0 : Intercepto.

β_i , β_{ii} y β_{ij} : Coeficientes lineales.

X_i y X_j : Variables independientes.

Los datos fueron analizados a través de un modelo de respuesta espacial entre los tres factores intervinientes: gr. estiércol bovino: cerdos/galón; gr. sales nutritivas pastizal/galón y Unidades cultivo anaeróbico/galón. De forma que el algoritmo permitió determinar las concentraciones de cada una de las tres variables trabajadas.

III. RESULTADOS

Resultado del porcentaje de carbono orgánico (% C)

Análisis de los resultados:

El estiércol de cerdo tuvo mayor cantidad de carbono orgánico respecto al estiércol de ganado, probablemente por la dieta rico en carbohidratos que reciben los cerdos. La tabla 3 describió el carbono orgánico hallado en el estiércol de ganado y cerdos. Resultándose que este último es mayor al estiércol de vacuno.

Tabla 3

% carbono orgánico en estiércol de ganado vacuno y cerdos

Parámetro	Unidad de medida	Estiércol ganado	Estiércol cerdos
Carbono orgánico	Porcentaje (%)	42,5 %	47,2 %

Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

Resultado del Nitrógeno Kjeldahl

Análisis de los resultados:

La tabla 4 muestra que el estiércol doméstico sea de ganado vacuno o cerdos generalmente no logra superar el 5 % en peso.

Tabla 4

% nitrógeno total en estiércol de ganado vacuno y cerdos

Parámetro	Unidad de medida	Estiércol ganado vacuno	Estiércol cerdos
Nitrógeno total Kjeldahl	Porcentaje (%)	2,3 %	3,5 %

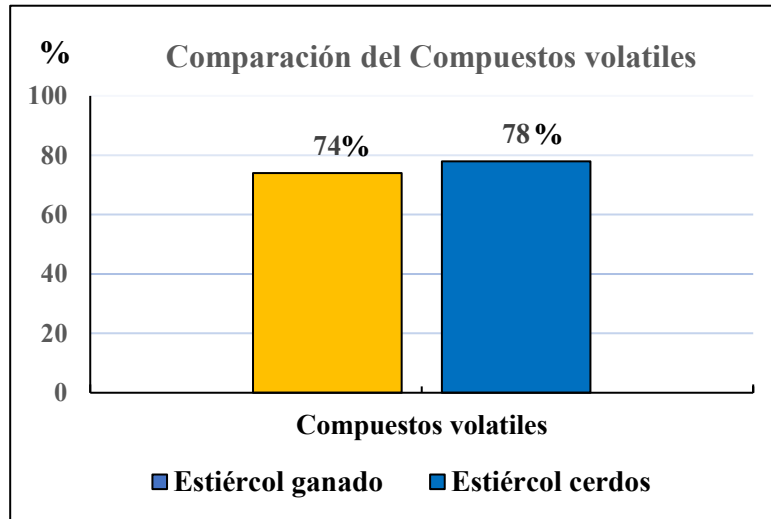
Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

Resultado de los compuestos volátiles

La figura 8 muestra que el estiércol de cerdo presentó mayor concentración de compuestos volátiles respecto al estiércol de ganado vacuno.

Figura 8

% Compuestos volátiles en estiércol de ganado vacuno y cerdos



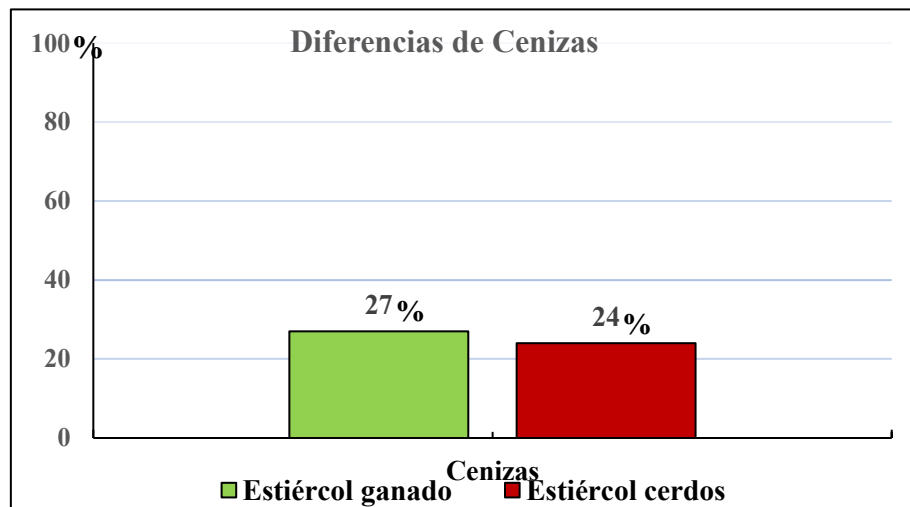
Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

Resultado de las cenizas

La figura 9 demostró que el estiércol de ganado vacuno presentó mayor concentración de cenizas respecto al estiércol de cerdos.

Figura 9

Diferencia de cenizas entre estiércol de ganado y cerdos



Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

La tabla 5 mostró que el estiércol doméstico de los cerdos por estar basada en alimento balanceado, tiene componentes de fibra, proteínas, grasa y carbohidratos. nutritivamente es ligeramente superior, pues el ganado basa su alimentación en simple forraje.

Tabla 5

Comparación de los parámetros FQM de vacuno y cerdos

Parámetros	Unidad de medida	Estiércol ganado	Estiércol cerdos
Carbono orgánico	Porcentaje (%)	42,5 %	47,2 %
Nitrógeno total Kjeldahl	Porcentaje (%)	2,3 %	3,5 %
Compuestos volátiles	Porcentaje (%)	74 %	78 %
Cenizas	Porcentaje (%)	27 %	24 %

Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

Resultado de DBO del sustrato a descomponer y descompuesto

La tabla 6 muestra que el DBO del sustrato descompuesto bajó a 1280 ppm respecto al DBO del sustrato sin descomponer que llegó a 4570 ppm., resultado del tratamiento de descomposición anaeróbica.

Tabla 6

Evaluación de la DBO en sustrato a descomponer y descompuesto

Parámetro	Unidad de medida	Sustrato a descomponer (*)	Sustrato descompuesto
DBO	ppm	4570	1280

Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

(*) Se utilizó la mayor concentración de estiércol preparado para descomponer. La relación de mezcla fue la siguiente: 300 gr estiércol ganado y 60 gr estiércol cerdos, disueltos en cuatro litros de agua, al interior de una galonera.

Análisis de los resultados:

El alto valor de DBO se debió a la alta carga orgánica contenida en el estiércol de ganado y cerdos. En tal sentido, Alberca (2019) afirmó que el estiércol de cerdo contribuye con más materia orgánica biodegradable (carbohidratos y proteínas fácilmente accesibles) que el estiércol de ganado con su carga orgánica no biodegradablemente fácilmente (carbono estructural de la celulosa y lignina). Su descomposición es muy rápida.

Resultado de la DQO del sustrato a descomponer y descompuesto

La tabla 7 muestra que el DQO del sustrato descompuesto bajó a 3600 ppm respecto al DQO del sustrato sin descomponer que llegó a 9660 ppm., resultado del tratamiento de descomposición anaeróbica.

Tabla 7

Evaluación de la DQO en sustrato a descomponer y descompuesto

Parámetro	Unidad de medida	Sustrato a descomponer	Sustrato descompuesto
DQO	ppm	9660	3600

Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

Comparación de la DBO versus DQO

La tabla 8 indicó que el índice DBO/DQO fue: $4570/9660 = 0,47$; lo que según Recebli *et al.* (2015) correspondió a un sustrato con alto contenido de materia orgánica. Basó su definición en el criterio: índice DBO/DQO $\approx 0,45-0,7$: Agua residual con buena biodegradabilidad, adecuada para tratamientos biológicos.

Como referencia Recebli *et al.* (2015) se dice que: Un índice DBO/DQO $< 0,3$: Agua residual con baja biodegradabilidad, posiblemente requiere tratamiento físico-químico o una etapa de pretratamiento antes del biológico. Y, un índice DBO/DQO $> 0,7$: Indica una carga orgánica predominantemente biodegradable (común en aguas residuales domésticas).

Tabla 8

Comparación de la evolución de la DBO y DQO

Parámetros	Unidad de medida	Sustrato a descomponer	Sustrato descompuesto
DBO	ppm	4570	1280
DQO	ppm	9660	3600

Fuente: Laboratorio Rivelab SAC.

La tabla 9 mostraron los resultados obtenidos en cada digestor que contuvo una dilución orgánica preparado con una fórmula diferente. Así, el biodigestor 11 mezcló en agua 170 gr de estiércol de ganado con 35 gr de estiércol de cerdos, junto a cuatro gr de pastizal y 12 unidades liofilizados de cultivo Hansen, EUA., el cual al cabo de 30 días y a una T° promedio de 28 °C arrojó un volumen de biogás de 298 mL. De otro modo, el biodigestor 4 mezcló en agua 170 gr de estiércol de ganado con 35 gr de estiércol de cerdos, junto a cuatro gr de sales de pastizal y 12 unidades sólidas liofilizado de cultivo comercial Hansen, EUA., Tiempo: 30 días T: 28 °C V gas: 298 mL

Tabla 9

Optimización del proceso

N° de biodigestor	X₁ gr. estiércol bovino: cerdos/galón	X₂ gr. sales nutritivas pastizal/galón	X₃ Unidades cultivo anaeróbico/galón	Respuesta mL. biogás
1	40:10	4	7	399
2	300:60	4	7	440
3	40:10	20	7	330
4	300:60	20	7	370
5	40:10	12	2	280
6	300:60	12	2	310
7	40:10	12	12	344
8	300:60	12	12	250
9	170:35	4	2	360
10	170:35	20	2	301
11	170:35	4	12	298
12	170:35	20	12	284
13	170:35	12	7	390

Fuente: Adaptación de Alberca (2019).

Análisis estadístico:

La tabla 10 mostró que la concentración estiércol doméstico tuvo mayor significancia que el pastizal, que el cultivo liofilizado. Es decir, tuvo un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%, mucho menor que el obtenido Valor P de las otras variables.

Tabla 10

% nitrógeno estadístico

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:GR ESTIÉRCOL	14280,5	1	14280,5	22,18	0,0053
B:GR PASTIZAL	4851,13	1	4851,13	7,53	0,0406
C:CULTIVO	1540,13	1	1540,13	2,39	0,1826
AA (estiércol)	2354,08	1	2354,08	3,66	0,1141
AB (estiércol-pastizal)	6,25	1	6,25	0,01	0,9253
AC (estiércol-cultivo)	7310,25	1	7310,25	11,35	0,0199
BB	6359,08	1	6359,08	9,88	0,0256
BC	784,0	1	784,0	1,22	0,3201
CC	1869,23	1	1869,23	2,90	0,1491
Error total	3219.25	5	643.85		
Total (corr.)	41331.6	14			

Fuente: Statgraphics Centurion 18.

R-cuadrada = 92,2112 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 78,1913 %

La tabla 11 arrojó los valores óptimos del proceso de fermentación anaeróbica, esto fue: 360 gr de estiércol doméstico, 13,13 gr de pastizal y 2 unidades de cultivo liofilizado.

Tabla 11

Valores óptimos

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
GR ESTIÉRCOL	50,0	360,0	360,0
GR PASTIZAL	4,0	20,0	13,1363
CULTIVO	2,0	12,0	2,0

Optimización de la respuesta

Valor óptimo = 441,974 mL. gas

Algoritmo del modelo ajustado (algoritmo):

$$\begin{aligned} \text{Volumen de biogás} = & 87,6891 + 1,07752 * \text{gr ESTIÉRCOL} + 15,984 * \text{gr PASTIZAL} + \\ & 16,9331 * \text{CULTIVO} - 0,00105099 * \text{gr ESTIÉRCOL}^2 + 0,00100806 * \text{gr} \\ & \text{ESTIÉRCOL} * \text{gr PASTIZAL} - 0,0551613 * \text{gr ESTIÉRCOL} * \text{CULTIVO} - \\ & 0,648437 * \text{gr PASTIZAL}^2 + 0,35 * \text{gr PASTIZAL} * \text{CULTIVO} - \\ & 0,9 * \text{CULTIVO}^2 \end{aligned}$$

Reemplazando datos:

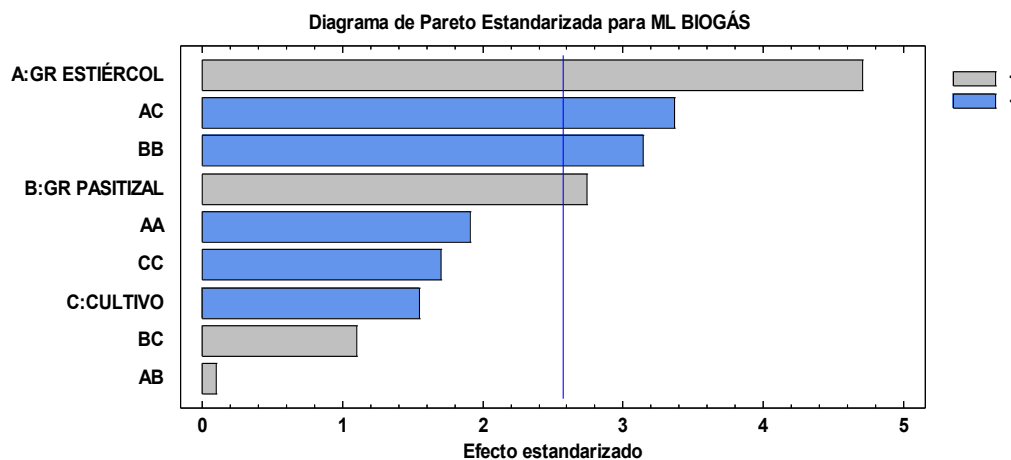
$$\begin{aligned} \text{Volumen de biogás} = & 87,6891 + 1,07752 * (360,0) + 15,984 * (13,1363) + 16,9331 * (2,0) - \\ & 0,00105099 * (360,0)^2 + 0,00100806 * (360,0) * (13,1363) - 0,0551613 * (360,0) * \\ & (2,0) - 0,648437 * (13,1363)^2 + 0,35 * (13,1363) * (2,0) - 0,9 * (2,0)^2. \end{aligned}$$

Volumen de biogás = 441,974 mL. biogás.

La figura 10 del diagrama de Pareto se observa que la variable con mayor significancia lo tiene la concentración y mayor significancia el estiércol doméstico respecto al cuadrado de estiércol-cultivo (AC) y sobre el cuadrado del pastizal (BB).

Figura 10

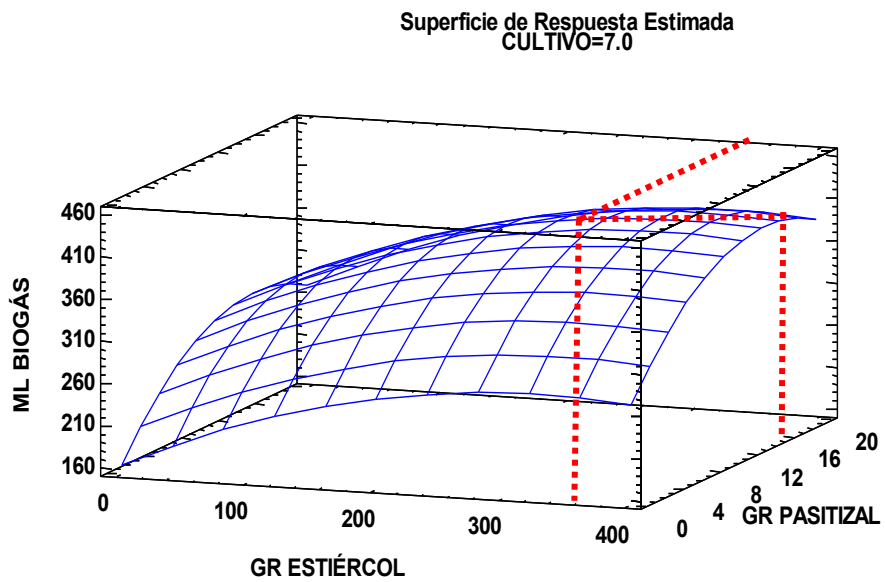
Diagrama de Pareto



La figura 11 muestra la superficie de respuesta de la fermentación anaeróbica con sus valores óptimos que se describieron en la tabla 11.

Figura 11

Superficie de respuesta estimada



IV. DISCUSIÓN

Se realizó la producción de biogás a partir de un sustrato orgánico preparado a partir de estiércol doméstico; a través de un sistema batch de biodigestores anaeróbicos en el C.P. Uña de Gato, Bellavista, Cajamarca. Respecto al primer objetivo se tuvo que el estiércol de ganado y cerdos presentó el 42,5 % y 47,2 % de carbono orgánico respectivamente, e igualmente, 2,3 % y 3,5 % de Nitrógeno Total Kjeldahl respectivamente, similarmente el 74 % y 78 % de Compuestos volátiles respectivamente y el 27 % y 24 % de Cenizas respectivamente; estas mermas fueron resultado de la descomposición anaeróbica del sustrato doméstico. Así, Rico *et al.* (2020) destacaron que la proporción óptima de sustratos (vegetales y estiércol bovino) para la co-digestión anaerobia fue de 1:1. En contraste, esta investigación utilizó estiércol doméstico, alcanzando producciones aceptables de biogás, aunque podría beneficiarse de la co-digestión con otros materiales ricos en carbohidratos. Para el caso de esta investigación los resultados se guardaron relación con la baja de DBO y DQO similar a Verástegui-Hernández (2020). Esto es que el sustrato antes de la descomposición anaeróbica presentó un DBO = 4570 ppm y DQO = 9660 ppm; mientras que después de los 30 días de fermentación, presentó un DBO = 1280 ppm y un DQO = 3600 ppm. así, estos resultados obtenidos fueron consistentes con los reportados por Recebli *et al.* (2015), quienes igualmente utilizaron biodigestores batch para estiércol bovino. Este estudio indicó una producción diaria de 6,33 m³ de biogás con un contenido de metano del 62 %. De manera similar, el presente trabajo alcanzó niveles significativos de producción de biogás, aunque las condiciones climáticas locales y el tipo de sustrato influyeron en la eficiencia final. En el mismo sentido, Senés *et al.* (2019) sostuvieron que la composición microbiana en biodigestores como bacterias (82-88 %) y arqueas (8-15 %), influyeron en la etapa de producción de biogás. En esta investigación, los resultados coincidieron en que los microorganismos acetogénicos y metanogénicos junto al estiércol desempeñaron un papel muy significativo en la generación de metano.

Linares *et al.* (2017) enfatizaron la importancia de controlar parámetros como el pH, la temperatura y la humedad en biodigestores batch. Para la actual investigación, la temperatura promedio de 28 °C estuvo dentro del rango reportado como óptimo (20-35 °C), asegurando un entorno adecuado para la actividad microbiana. En cuanto, al pre-tratamiento del sustrato, Condor-López (2019) demostró que el pre-tratamiento mejora

significativamente la calidad del biogás y del biol producido. Aunque para este trabajo no se implementó un pre-tratamiento similar, se plantea como una recomendación para futuras investigaciones. En cuanto al diseño y control de biodigestores batch, Linares *et al.* (2017) evaluaron la implementación de elementos para el diseño de biorreactores batch, destacándose el control de variables como el pH, la humedad y la temperatura. Además, enfatizaron la obtención de biogás y bioetanol como productos principales del proceso de fermentación anaeróbica. En comparación a la actual experiencia, los biodigestores no fueron monitoreados respecto a la temperatura, por cuanto el distrito de Bellavista se caracteriza por poseer un clima cálido (temperatura promedio 28 °C), lo que favorece de forma automática el proceso batch. Montenegro-Díaz (2020) utilizó un biodigestor tubular de 12 m³ con una mezcla estiércol-agua en proporción 1:5, logrando un tiempo de retención hidráulica de 20 días y un rendimiento promedio de 4.30 h/día de biogás para uso doméstico. Este rendimiento se tradujo también en beneficios agrícolas al emplear los bio-abonos en parcelas experimentales, incrementando la producción de alfalfa hasta en un 50 %. Aunque este estudio se enfocó en aplicaciones rurales y domésticas, los hallazgos resaltan la relevancia de la relación sustrato-agua y del uso de subproductos como los bio-abonos, lo cual coincide con el enfoque de sostenibilidad planteado en este trabajo. Verástegui-Hernández (2020) evaluó la producción de biogás empleando mezclas de estiércol bovino, lactosuero (*bacterias ácido lácticas que integran el cultivo anaeróbico utilizado, como el utilizado en esta investigación: sólido liofilizado comercial, que contiene 9×10^9 UFC/g de bacterias: *Lactobacillus plantarum* y *Pediococcus pentosaceus*; Hansen, EUA) y cáscara de papaya en biodigestores batch pequeños. El mayor rendimiento de biogás (2285 mL) se logró con proporciones de 1000 mL de estiércol bovino, 120 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya, demostrando la importancia de la co-digestión para maximizar la eficiencia del proceso. Los resultados sugieren que incorporar sustratos adicionales podría mejorar la calidad y cantidad de biogás producido. De forma que, no solamente, se pueda generar un producto energético como el biogás, sino también que simultáneamente, se puede lograr un producto orgánico que puede ser empleado como abono orgánico como el Biosol. Limitaciones de la ejecución fueron fluctuaciones climáticas que no garantizaron una temperatura estable. La disponibilidad de instrumentos de medición en el laboratorio fue limitada, esto condicionó la precisión de algunos análisis. fisicoquímicos.*

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- El análisis químico determinó que el estiércol de cerdos más altas concentraciones en ciertos parámetros orgánicos: Mayor cantidad de carbono orgánico. Mayor contenido de nitrógeno total Kjeldahl (3,5 %). Mayor contenido de compuestos volátiles (78 %). Y, menor contenido de cenizas (24 % de cenizas).
- El análisis químico determinó para el sustrato a descomponer anaeróbicamente en un sistema batch arrojó una eficiencia de remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del 72 %. Mientras que el proceso anaeróbico tuvo una eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO) del 62,7 %.
- La ecuación del modelo ajustado (algoritmo) que optimizó el proceso fue el siguiente:
$$87,6891 + 1,07752 * \text{gr estiércol} + 15,984 * \text{gr pastizal} + 16,9331 * \text{cultivo} - 0,00105099 * \text{gr estiércol}^2 + 0,00100806 * \text{gr estiércol} * \text{gr pastizal} - 0,0551613 * \text{gr estiércol} * \text{cultivo} - 0,648437 * \text{gr pastizal}^2 + 0,35 * \text{gr pastizal} * \text{cultivo} - 0,9 * \text{cultivo}^2$$

Para obtener un volumen óptimo de 441.974 mL. biogás. El proceso no optimizado generó un máximo de 440 mL; un mínimo de 250 mL. y un volumen óptimo de 441,97 mL.

Recomendaciones:

- Para las nuevas investigaciones se recomienda realizar un análisis de costos-beneficios del biodigestor propuesto. Esto incluiría estimar el costo de construcción, mantenimiento y operación frente al ahorro en combustibles tradicionales y los beneficios de subproductos como bio-abonos. Este análisis sería útil para determinar la accesibilidad y sostenibilidad económica del modelo.
- Para futuras investigaciones se debe incluir el impacto positivo de los bio-abonos en suelos agrícolas locales podría ser un aporte valioso, aprovechando que se genera no solo biogás, sino también Biosol, que es un residuo sólido descompuesto. Igualmente, se debe incorporar al diseño estadístico otros factores ambientales (como humedad, calidad del agua utilizada, o aditivos microbianos) podría permitir optimizar aún más el rendimiento del biogás y generar hallazgos aplicables en condiciones climáticas distintas.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberca, N. E. (2019). *Biometanización de la materia orgánica de descargas residuales porcinas en el C.P. Ambato Tamborapa, distrito de Bellavista*. [Tesis en Ingeniería. Universidad Nacional de Jaén].
<https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/150>
- Cóndor-López, D. A. (2019). *Producción de biogás y biol en biodigestores batch a partir de residuos agropecuarios pre-tratados con la técnica de bokashi*. [Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional Agraria La Molina].
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/4131>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2013). Informe: Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería. Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación
<https://www.fao.org/3/i3437s/i3437s.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) (2006). Informe: Livestock's long shadow (La larga sombra del ganado).
<https://www.fao.org/3/a0701e/a0701e.pdf>
- Garzón, E. Y. y Cotrino, C. E. (2014). Aplicación al control de procesos batch. *Tecnura*. 18(1), 189-204. [fecha de Consulta 2 de Abril de 2022]. ISSN: 0123-921X.
<https://www.redalyc.org/pdf/2570/257059812015.pdf>
- Greenpeace. (2008). Informe sobre el impacto del actual modelo de agricultura y ganadería sobre el clima.
- Greenpeace. (2010). Reporte sobre gases invernadero.
<http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Trabajamos-en/Frenar-el-cambio-climatico/Ciencia/Efecto-invernadero/#:~:text=El%20efecto%20invernadero%20es%20un,al%20observado%20en%20un%20invernadero.>

- Jaramillo, A. C., Echavarría, A. M., & Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18), 75–91.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83529050005>
- Linares, A., López, M. A. y Caballero, P. (2017). Diseño y control de un biorreactor tipo batch para la generación de biogás. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 4(13), 11-18.
- Manyi-Loh, C. E., Mamphweli, S. N., Meyer, E. L., Okoh, A. I., Makaka, G., & Simon, M. (2013). Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(9), 4390–4417.
<https://doi.org/10.3390/ijerph10094390>
- Montenegro-Díaz, R. (2020). *Producción de biogás y bioabonos a partir de estiércol de bovino en biodigestor tubular en Naranjos, Bagua, Amazonas*. [Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza. Amazonas].
<http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/2072/Montenegro%20D%c3%adaz%20Raquel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Recebli, Z., Selimli, S., Ozkaymak, M. y Gonc, O. (2015). Biogas production from animal manure. *Journal of Engineering Science and Technology*. 10(6). 722 – 729.
- Rico, R., Rivas, P., Botello, E. y Cano, J. J. (2020). New model of hydrolysis in the anaerobic co-digestion of bovine manure with vegetablewaste: modification of anaerobic digestion model N° 1. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 19(1), 109-122.
- Senés, C., Colón, F. A., Reynoso, J. F., Tinoco, B., Siller, J. H. & Pacheco, A. (2019). Biogas-producing microbial composition of an anaerobic digester and associated bovine residues. *MicrobiologyOpen*. 8(4), e854.

- Sunarso, Sumardiono, S. & Budiyo (2010). Biogas production using anaerobic biodigester from cassava starch effluent. *International Journal of Science and Engineering*, 1(2), 33–37.
- Obiukwu, O.O. & Nwafor, M.O. (2016). Comparative evaluation of batch and continuous process biogas production from animal wastes. *International Journal of Ambient Energy*, 37(1), 29-35.
- Verástegui-Hernández, C. Y. (2020). *Producción de biogás por co-digestión de estiércol de ganado bovino, lactosuero y cáscara de papaya*. [Tesis de ingeniería. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza. Amazonas].
<http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1924/Verastegui%20Hernandez%20Claudia%20Yuliza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

AGRADECIMIENTO

A Dios por la vida, la salud y la paz.

A mi familia por guiarme y acompañarme en mi carrera.

A la Universidad por darme formación profesional.

Wagner

Agradezco a Dios por la vida, la salud y por permitirme culminar mis estudios exitosamente.

A la Universidad por darme la oportunidad de graduarme en mi profesión.

José Agustín

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos.

Wagner

Le dedico mi tesis a mis padres, hermanos y abuelitos.

José Agustín

ANEXOS

ANEXO 1

Resultados de Laboratorio Rivelab SAC



INFORME DE ENSAYO N°1356-2024-RIVELAB/FQ

Emitido en Trujillo, el 23 de octubre de 2024

Página 1 de 1

Orden de Servicio : 018.071024CO
Nombre de Solicitante : Wagner Delgado Fernández
Servicio solicitado : Ensayo Físico Químico
Cantidad de muestras : 03
Tipo de muestra : 01 abono orgánico (Estiercol de ganado)
: 01 abono orgánico (Estiercol de Cerdo)
Tipo de envase : 02 bolsas selladas de 500 g c/u
: 01 frasco de plástico de 500 ml
Código de muestra : EST-GAN-001
: EST-CER-001
: LIX-001
Lugar de Muestreo : Muestra proporcionada por el solicitante - Jaén
Fecha de inicios de Ensayos : 07-10-2024
Fecha de término de Ensayos : 23-10-2024

ENSAYOS FISICO QUIMICOS - ABONOS


ENSAYOS	UNIDADES	RESULTADOS	
		EST-GAN-001	EST-CER-001
Carbono orgánico	%	42.5	47.2
Nitrógeno total Kjeldhal	%	2.3	3.5
Compuestos volátiles	%	74	78
Cenizas	%	27	24

ENSAYOS FISICO QUIMICOS - SUSTRATO LIQUIDO

ENSAYOS	UNIDADES	RESULTADOS LIX-001
DBO	mg/l	4570
DQO	mg/l	9660

NORMAS o METODOS DE REFERENCIA

ENSAYO	NORMA O REFERENCIA
Carbono orgánico	Standard Method 5310B - TOC Measurement by High-Temperature Combustion
Nitrógeno total Kjeldhal	Métodos estándar: 4500-N(Org) C: Nitrógeno orgánico/Semi-Micro-Kjeldahl
Compuestos volátiles	APHA 2540 G (Sólidos volátiles a 550°C)
Cenizas	APHA 2540 E (Sólidos fijos a 550°C)
DBO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023 Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test
DQO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5220 D, 24th Ed. 2023 Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method


Dr. JOSE RIVERO CORCUERA
Ingeniero Químico
R. C.I.F. 1305



ANEXO 2

Resultados de Laboratorio Rivelab SAC



INFORME DE ENSAYO N°1358-2024-RIVELAB/FQ

Emitido en Trujillo, el 25 de noviembre de 2024

Página 1 de 1

Orden de Servicio : 026.071124AR
Nombre de Solicitante : Wagner Delgado Fernández
Servicio solicitado : Ensayo Físico Químico
Cantidad de muestras : 01
Tipo de muestra : 01 sustrato líquido
Tipo de envase : 01 frasco de plástico de 500 ml
Código de muestra : LIX-002
Lugar de Muestreo : Muestra proporcionada por el solicitante - Jeén
Fecha de inicio de Ensayos : 07-11-2024
Fecha de término de Ensayos : 25-11-2024

ENSAYOS FÍSICO QUÍMICOS

ENSAYOS	UNIDADES	RESULTADOS LIX-002
DBO	mg/l	1280
DOO	mg/l	3600

NORMAS o METODOS DE REFERENCIA

ENSAYO	NORMA O REFERENCIA
DBO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed.2023 Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5-Day BOD Test
DOO	SMEWW-APHA-AWWA-WEF 5220 D, 24th Ed.2023 Chemical Oxygen Demand (COD), Closed Reflux, Colorimetric Method


Dr. JOSE RIVERO CORCUERA
Ingeniero Químico
R. CIP. 1305



ANEXO 3

Figura 12

Piloto batch anaeróbico



(a)



(b)

(a): Ajuste final de los biodigestores con las botellas recolectoras de biogás.

(b): Inicio de puesta en marcha de la fermentación anaeróbica