



Religación
Press

Haniel Solís Muñoz, Antonio Manuel Otoy Zelada,
Eliás Fernando Haro Aro, Laura Isabel Gutierrez Escarcena

Optimización del proceso de fermentación anaerobia

del guano de isla mediante
un biorreactor anaerobio

Análisis de parámetros clave



| Colección Ingeniería |

Optimización del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla mediante un biorreactor anaerobio

Análisis de parámetros clave

Haniel Solís Muñoz, Antonio Manuel Otoyá Zelada,
Eliás Fernando Haro Aro, Laura Isabel Gutiérrez Escarcena

RELIGACION PRESS
QUITO · 2023



Equipo Editorial

Eduardo Díaz R. Editor Jefe
Roberto Simbaña Q. Director Editorial
Felipe Carrión. Director de Comunicación
Ana Benalcázar. Coordinadora Editorial
Ana Wagner. Asistente Editorial

Consejo Editorial

Jean-Arsène Yao | Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova | Fabiana Parra |
Mateus Gamba Torres | Siti Mistima Maat | Nikoleta Zampaki | Silvina
Sosa



Religación Press, es una iniciativa del Centro de Investigaciones CICSHAL-
RELIGACIÓN.

Diseño, diagramación y portada: Religación Press.
CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.
Correo electrónico: press@religacion.com
www.religacion.com

Optimización del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla mediante un biorreactor anaerobio. Análisis de parámetros clave

Optimization of the anaerobic fermentation process of island guano using an anaerobic bioreactor. Analysis of key parameters

Otimização do processo de fermentação anaeróbica de guano de ilha usando um biorreator anaeróbico. Análise dos principais parâmetros

Primera Edición: 2023 Haniel Solís Muñoz©, Antonio Manuel Otoya Zelada©, Elias Fernando Haro Aro©, Laura Isabel Gutierrez Escarcena©, Religación Press©

Editorial: Religación Press
Materia Dewey: 660 - Ingeniería Química
Clasificación Thema: PNC - Química medioambiental
PNN - Química orgánica
BISAC: TEC009010 TECHNOLOGY & ENGINEERING / Chemical & Biochemical
Público objetivo: Profesional/Académico
Colección: Ingeniería
Serie: Estudios Ambientales
Soporte: Digital
Formato: Epub (.epub)/PDF (.pdf)
Publicado: 2023-12-20
ISBN: 978-9942-642-66-0

Disponible para su descarga gratuita en <https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)



Citar como (APA 7)

Solís Muñoz, H., Otoya Zelada, A. M., Haro Aro, L. F., y Gutierrez Escarcena, L. I. (2023). *Optimización del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla mediante un biorreactor anaerobio. Análisis de parámetros clave*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.105>

ISBN: 978-9942-642-66-0



Nota: el libro retoma y amplía, por un grupo de investigadores, lo mostrado en la tesis "Producción de biofertilizante en biorreactor con cúpula flotante a partir de guano de la isla Guañape" presentada ante la Universidad Nacional de Trujillo, por Haniel Solís Muñoz.

Revisión por pares / Peer Review

Este libro fue sometido a un proceso de dictaminación por académicos externos. Por lo tanto, la investigación contenida en este libro cuenta con el aval de expertos en el tema, quienes han emitido un juicio objetivo del mismo, siguiendo criterios de índole científica para valorar la solidez académica del trabajo.

This book was reviewed by an independent external reviewers. Therefore, the research contained in this book has the endorsement of experts on the subject, who have issued an objective judgment of it, following scientific criteria to assess the academic soundness of the work.

Sobre los autores

Haniel Solís Muñoz

<https://orcid.org/0000-0002-9482-9818>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú.

hsolism@unitru.edu.pe

Hanielsolis1979@gmail.com

Ingeniero Químico con títulos de pregrado, maestría y doctorado de la Universidad Nacional de Trujillo. Experto en Ingeniería Química Ambiental, asesor y jurado de tesis. Docente en Química, Cultura Ambiental, Termodinámica, Diseño de Plantas de Tratamiento y más. Apasionado por música andina y natación.

Antonio Manuel Otoya Zelada

<https://orcid.org/0000-0001-6460-969X>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú.

amotoyaz@unitru.edu.pe

antonio_otoya@hotmail.com

Doctor en Ingeniería Química Ambiental, Maestro en Ciencias y Título profesional de Ingeniero Químico, experiencia docente, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), facultad de ciencias básicas y en la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), facultad de Ingeniería Química.

Elias Fernando Haro Aro

<https://orcid.org/0000-0002-7989-6668>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú.

eharoa@unitru.edu.pe

Eliasha2017@gmail.com

Doctor en Ingeniería Química Ambiental, Título profesional de Ingeniero Químico, experiencia docente en la Universidad Cesar Vallejo (UCV), ciencias básicas y en la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), Ingeniería Ambiental.

Laura Isabel Gutierrez Escarcena

<https://orcid.org/0000-0001-7705-2106>

Universidad Nacional De Trujillo | Trujillo | Perú.

lgutierreze@unitru.edu.pe

lauraisage@gmail.com

Doctor en Ingeniería Química Ambiental, Título profesional de Ingeniero Químico, experiencia docente en la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), Ingeniería Ambiental.

Resumen

El estudio se enfocó en la fermentación anaerobia del guano de isla usando un biorreactor anaerobio. Se evaluaron diversos parámetros para comprender el proceso, incluyendo nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo, potasio, conductividad eléctrica y coliformes totales. Estos son indicadores cruciales de la calidad del biofertilizante resultante, su idoneidad para la aplicación agrícola y su seguridad microbiológica. El estudio proporciona información valiosa sobre la eficacia y la calidad del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla en un biorreactor anaerobio.

Palabras clave: agricultura, biofertilizante; anaerobia, macronutrientes; guano de isla.

Abstract

The study focused on the anaerobic fermentation of island guano using an anaerobic bioreactor. Several parameters were evaluated to understand the process, including total nitrogen, ammonia nitrogen, phosphorus, potassium, electrical conductivity and total coliforms. These are crucial indicators of the quality of the resulting biofertilizer, its suitability for agricultural application and its microbiological safety. The study provides valuable information on the efficiency and quality of the anaerobic fermentation process of island guano in an anaerobic bioreactor.

Keywords: agriculture; biofertilizer; anaerobic; macronutrients; island guano.

Resumo

O estudo concentrou-se na fermentação anaeróbica de guano de ilha usando um biorreator anaeróbico. Vários parâmetros foram avaliados para entender o processo, incluindo nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, fósforo, potássio, condutividade elétrica e coliformes totais. Esses são indicadores cruciais da qualidade do biofertilizante resultante, sua adequação para aplicação agrícola e sua segurança microbiológica. O estudo fornece informações valiosas sobre a eficiência e a qualidade do processo de fermentação anaeróbica do guano de ilha em um biorreator anaeróbico.

Palavras-chave: agricultura; biofertilizante; anaeróbico; macronutrientes; guano de ilha.

Contenido

Revisión por pares / Peer Review	7
Sobre los autores	8
Resumen	10
Abstract	11
Introducción	19
Capítulo 1	22
La fertilización del suelo: desde las antiguas prácticas agrícolas hasta la innovación sostenible	22
La Transición a la Vida Sedentaria y la Relación con la Tierra	24
El Guano de Aves Marinas: Un Fertilizante con Desafíos	24
Los Riesgos Asociados al Uso del Guano de Aves Marinas	25
Alternativas sostenibles para la producción de fertilizantes	26
Los Macronutrientes en la Agricultura	28
Características clave del guano de isla	30
Capítulo 2	37
Producción de biogás a partir del guano de la Isla Guañape utilizando un biorreactor anaerobio	37
Recolección del guano de la isla Guañape	38
Preparación del biorreactor	38
Caracterización de las muestras	40
Características del guano y obtención del biofertilizante	41
Temperatura de alimentación y salida del biorreactor con cúpula flotante	43
pH de la alimentación y salida del biorreactor	43
DQO, DBO ₅ , relación DBO ₅ / DQO de guano de isla diluido (alimentación)	44
DQO, DBO ₅ , relación DBO ₅ / DQO de guano de isla salida (biofertilizante)	45
DQO, DBO ₅ , y porcentajes de remoción del DQO y del DBO ₅ del proceso	45
Sólidos Totales (ST) y volátiles (SV) en guano de isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)	46
Nitrógeno, Fósforo (P ₂ O ₅) y Potasio (K ₂ O) en guano de isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)	47
Nitrógeno Orgánico en guano de isla diluido (afluente) y el biofertilizante (efluente) en relación al TRH.	48

Transformación del Nitrógeno debido al proceso de digestión anaeróbica en el biorreactor	49
Conductividad Eléctrica (CE) de afluente y efluente	50
Coliformes Totales (CT) de afluente y efluente	50

Capítulo 3 **53**

Eficiencia en un biorreactor con cúpula flotante a partir del guano de la isla Guañape.	53
Conductividad Eléctrica:	54
Reducción de Sólidos Totales:	55
Incremento de Macronutrientes:	56
Reducción del Nitrógeno Total y Orgánico:	58
Condiciones Ambientales:	60
Fermentación Aerobia como Etapa Preliminar:	63
Mejora en la Biodigestión:	64
Importancia de la Relación DBO5/DQO:	65
Variación de Temperatura en el Biofertilizante:	68
Efecto de la Temperatura en la Velocidad de Digestión Anaerobia:	69
Reducción de Coliformes Totales:	73
Importancia del Nitrógeno para el Crecimiento de las Plantas:	75
Aplicabilidad Práctica en Agricultura Sostenible:	76
Sostenibilidad en la Agricultura Orgánica:	80
Conclusiones	83
Propuesta y/o recomendaciones	85

Referencias **88**

Anexo **96**

Tablas

Tabla 1. Análisis de Varianza del estudio.	41
Tabla 2. Temperatura de alimentación y salida del biorreactor con cúpula flotante	43
Tabla 3. pH de la alimentación y salida del biorreactor	43
Tabla 4. Alcalinidad del guano de isla diluido(alimentación) y el biofertilizante (salida)	44
Tabla 5. DQO, DBO5, relación DBO5/ DQO de guano de isla diluido (alimentación)	44
Tabla 6. DQO, DBO5, relación DBO5/ DQO de guano de isla salida (biofertilizante)	45
Tabla 7. DQO, DBO5, y porcentajes de remoción del DQO y del DBO5 del proceso	45
Tabla 8. Sólidos Totales (ST) y volátiles (SV) en guano de isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)	46
Tabla 9. Nitrógeno, Fósforo (P2O5) y Potasio (K2O) en guano de isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)	47
Tabla 11. Transformación del Nitrógeno debido al proceso de digestión anaeróbica en el biorreactor	49
Tabla 12. Conductividad Eléctrica (CE) de afluente y efluente	50
Tabla 13. Coliformes Totales (CT) de afluente y efluente	50
Anexo 1. Métodos para el análisis físico, químico y biológico de las muestras estudiadas	97

Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de biodigestión

40

| Colección Ingeniería |

Optimización del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla mediante un biorreactor anaerobio.

Análisis de parámetros clave

Introducción

El propósito fundamental de este estudio radicó en explorar y desarrollar la fermentación anaerobia del guano de isla utilizando un biorreactor anaerobio. Dentro del marco de la investigación, se focalizaron en diversos parámetros para evaluar y comprender el proceso, centrándose especialmente en el análisis de nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo, potasio, conductividad eléctrica y coliformes totales, tanto en el guano de isla inicial como en el biofertilizante resultante.

El nitrógeno total y el nitrógeno amoniacal son indicadores cruciales de la calidad del fertilizante, ya que el nitrógeno es esencial para el crecimiento de las plantas. El fósforo y el potasio, también evaluados en este estudio, son nutrientes esenciales que desempeñan un papel crucial en el desarrollo de las plantas. La conductividad eléctrica, por otro lado, puede proporcionar información sobre la concentración de sales en el biofertilizante, lo cual es relevante para evaluar su idoneidad para la aplicación agrícola.

Además, la medición de coliformes totales es fundamental para evaluar la seguridad microbiológica del biofertilizante. La presencia de coliformes totales podría indicar la existencia de bacterias patógenas que podrían representar un riesgo para la salud humana y ambiental.

Este estudio se enfocó en un análisis integral de parámetros clave para evaluar la eficacia y la calidad del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla en un biorreactor anaerobio. La atención detallada a estos indicadores proporciona información valiosa sobre la idoneidad del biofertilizante resultante para su uso agrícola, al tiempo que aborda preocupaciones relacionadas con la seguridad microbiológica y la eficiencia nutricional del producto final.

Capítulo 1

La fertilización del suelo: desde las antiguas prácticas agrícolas hasta la innovación sostenible

Desde el momento en que los seres humanos dejaron de ser nómadas y optaron por la sedentarización, su relación con la tierra y la agricultura cambió significativamente (Agabo et al., 2020). Este cambio marcó el comienzo de prácticas agrícolas más avanzadas, como la utilización de fertilizantes para aumentar la productividad de los cultivos. Según Agabo et al. (2020), este proceso de enriquecimiento del suelo se volvió fundamental para la evolución agrícola.

La Cultura Muchik, que prosperó en la costa norte del Perú, es un ejemplo fascinante de esta práctica. Según los registros de Arriaga (1621), los habitantes de esta región utilizaron diversas fuentes de fertilización, entre las que se destacan los peces, especialmente la anchoveta, el estiércol de murciélago e incluso las heces humanas. Este enfoque holístico de la fertilización demuestra la astucia de estas antiguas comunidades para aprovechar recursos diversos y maximizar la eficiencia de sus cultivos.

Un método particularmente interesante utilizado por la Cultura Muchik involucraba las excreciones de aves marinas, conocidas en lengua muchik como “jedeñet ni” (Serrepe, 2017). Esta práctica ha perdurado en el tiempo y se reconoce en la actualidad como el famoso “guano de las islas”. La conexión entre el conocimiento ancestral y las prácticas agrícolas contemporáneas destaca la sabiduría acumulada a lo largo de

los siglos y cómo las antiguas civilizaciones encontraron soluciones ingeniosas para mejorar la fertilidad del suelo.

La Transición a la Vida Sedentaria y la Relación con la Tierra

El cambio a una vida sedentaria marcó un hito en el estilo de vida humano, y con ello se inició una conexión más profunda y consciente con el medio ambiente. La fertilización del suelo se convirtió en una herramienta vital para el desarrollo agrícola, y la Cultura Muchik en la costa norte del Perú brinda un ejemplo valioso de cómo se incorporaron diversos recursos, desde peces hasta guano de aves marinas, para optimizar la producción agrícola.

El Guano de Aves Marinas: Un Fertilizante con Desafíos

El estiércol, aunque es una valiosa fuente de materia orgánica para mejorar la fertilidad del suelo, presenta características particulares en cuanto a su degradación y mineralización. Según Apolo (2015), el estiércol es una materia orgánica que se descompone y mineraliza con relativa facilidad, liberando nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas en el proceso. Sin embargo, en el caso específico del “guano de isla”, obtenido a partir de las deyecciones de aves marinas, surgen ciertos desafíos.

Por un lado, el “guano de isla” es reconocido por sus cualidades fertilizadoras, pero también contiene bacterias patógenas, como señalan Sánchez (2016), Rashvanlou et al. (2020) y Miyashiro (2014). Esta doble naturaleza plantea un dilema en cuanto a su uso, ya que, a pesar de sus beneficios como fertilizante, la presencia de agentes patógenos puede convertirse en una fuente potencial de contaminación.

Los Riesgos Asociados al Uso del Guano de Aves Marinas

De acuerdo con Alfa et al. (2014), el uso del “guano de isla” puede generar focos de contaminación, lo que indica la necesidad de abordar este problema con precaución. Además, el tratamiento del guano para desinfectarlo es un tema que aún se encuentra en fase de estudio, como indican Owamah et al. (2014). La búsqueda de métodos efectivos para eliminar las bacterias patógenas sin comprometer las propiedades fertilizadoras del guano representa un desafío continuo para la investigación en este campo.

Mientras que el estiércol, en general, es una valiosa herramienta para mejorar la calidad del suelo, el caso específico del “guano de isla” ilustra la complejidad de equilibrar sus beneficios y riesgos. La presencia de bacterias patógenas plantea preocupaciones sobre la contaminación, y la necesidad de de-

sarrollar métodos efectivos de desinfección destaca la importancia de abordar este problema de manera integral y sostenible.

Alternativas sostenibles para la producción de fertilizantes

La producción a gran escala de fertilizantes químicos ha sido esencial para mejorar la productividad agrícola, pero su uso extensivo ha generado problemas ambientales y degradación del suelo, según evidencian distintos estudios. La utilización masiva de fertilizantes químicos ha sido identificada como un factor clave en la pérdida de fertilidad del suelo y su capacidad productiva, lo que contribuye a la acumulación de residuos químicos en el suelo y genera consecuencias negativas tanto para la salud del suelo como para la salud ambiental en general.

Ante este panorama, la utilización de residuos orgánicos, como el estiércol y otros materiales orgánicos, surge como una opción prometedora y sostenible. Estudios respaldan la idea de que la aplicación de residuos orgánicos puede no solo aportar nutrientes esenciales al suelo, sino también estimular el crecimiento de las plantas.

La reintroducción de residuos orgánicos, como el estiércol, en la gestión agrícola puede representar un paso significa-

tivo hacia la restauración de la salud del suelo y la mitigación de los impactos ambientales negativos asociados con la agricultura intensiva. La digestión anaeróbica emerge como una solución innovadora y sostenible al aprovechar estiércoles y/o desechos para generar diversos beneficios. En este proceso, que se desarrolla en un entorno sin oxígeno y con la participación de microorganismos mesófilos, se produce biogás, una forma de energía renovable, así como fertilizantes líquidos y sólidos, contribuyendo así a un enfoque más circular y eficiente en la gestión de residuos.

Los esfuerzos continuos en investigación buscan maximizar la eficiencia del proceso y garantizar su viabilidad a escala práctica, lo que representa un avance significativo hacia la implementación generalizada de esta tecnología. En cuanto al biofertilizante resultante de la digestión anaeróbica, se destaca que presenta características mejoradas en comparación con los fertilizantes convencionales, lo que sugiere que no solo provee nutrientes esenciales para las plantas, sino que también puede tener beneficios adicionales para la salud del suelo y la prevención de contaminantes.

La digestión anaeróbica se presenta como una tecnología prometedora para la generación de energía renovable y la producción de fertilizantes a partir de residuos orgánicos, proporcionando una alternativa sostenible y eficaz para el manejo de desechos y la mejora de la calidad del suelo.

Un biofertilizante es un producto biológico utilizado en la agricultura para mejorar la fertilidad del suelo y promover el crecimiento de las plantas. A diferencia de los fertilizantes químicos convencionales, los biofertilizantes contienen microorganismos beneficiosos, como bacterias, hongos o algas, que establecen simbiosis con las raíces de las plantas o liberan sustancias que favorecen el desarrollo vegetal. Estos microorganismos desempeñan funciones clave, como la fijación de nitrógeno atmosférico, la solubilización de nutrientes en el suelo, la producción de compuestos que estimulan el crecimiento de las plantas y la protección contra patógenos. Al utilizar biofertilizantes, se fomenta una agricultura más sostenible y amigable con el medio ambiente, ya que reducen la dependencia de productos químicos sintéticos y promueven la salud del suelo a largo plazo. Un biofertilizante es una alternativa biológica y sostenible a los fertilizantes químicos, diseñada para mejorar la calidad del suelo y aumentar la productividad agrícola mediante la introducción de microorganismos beneficiosos.

Los Macronutrientes en la Agricultura

Los macronutrientes son elementos químicos esenciales que las plantas requieren en cantidades relativamente grandes para su crecimiento, desarrollo y reproducción. Estos nutrientes desempeñan funciones vitales en diversos procesos fisio-

lógicos y son fundamentales para mantener la salud y la productividad de las plantas. Los principales macronutrientes son:

Nitrógeno (N): Es esencial para la formación de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila. Contribuye al crecimiento vegetal, la fotosíntesis y la síntesis de compuestos nitrogenados.

Fósforo (P): Juega un papel crucial en la transferencia de energía (ATP), la formación de ácidos nucleicos y la síntesis de compuestos bioquímicos esenciales. También es esencial para el desarrollo de raíces y flores.

Potasio (K): Contribuye a la regulación osmótica, mejora la resistencia de las plantas al estrés, participa en la apertura y cierre de los estomas, y es esencial para la síntesis de proteínas y la activación de enzimas.

Calcio (Ca): Es un componente estructural de las paredes celulares, contribuye a la división celular, y participa en la activación de enzimas. Además, juega un papel vital en el transporte de nutrientes y en la permeabilidad de las membranas celulares.

Magnesio (Mg): Forma parte de la clorofila, es esencial para la fotosíntesis y actúa como cofactor en numerosas reacciones enzimáticas. Contribuye al transporte de energía en la planta.

Azufre (S): Es un componente esencial de aminoácidos, vitaminas y coenzimas. Contribuye a la síntesis de proteínas y al metabolismo de compuestos sulfurados.

Estos macronutrientes son esenciales para el desarrollo saludable de las plantas, y su disponibilidad en el suelo influye directamente en la productividad de los cultivos. La fertilización equilibrada, que proporciona a las plantas las cantidades adecuadas de estos nutrientes, es crucial para garantizar un crecimiento óptimo y la producción de alimentos de alta calidad.

El guano de isla es un tipo especial de fertilizante orgánico natural que se obtiene a partir de las deyecciones acumuladas de aves marinas y murciélagos en islas o zonas costeras. Este excremento, altamente enriquecido con nutrientes esenciales, ha sido utilizado históricamente como una valiosa fuente de fertilización en la agricultura.

Características clave del guano de isla

Nutrientes Ricos: El guano de isla es conocido por ser excepcionalmente rico en nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y otros oligoelementos. Esta composición nutricional variada lo convierte en un fertilizante completo.

Historia de Uso: A lo largo de la historia, diversas culturas han aprovechado el guano de isla como una fuente valiosa de nutrientes para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la productividad agrícola. La Cultura Muchik en la costa norte del Perú es un ejemplo destacado de una civilización que utilizó el guano de isla de manera ingeniosa en sus prácticas agrícolas.

Fertilización Sostenible: Aunque el guano de isla ha sido históricamente valorado por su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo, su uso plantea desafíos en términos de sostenibilidad y conservación, ya que la explotación excesiva puede afectar negativamente a las poblaciones de aves marinas que lo producen.

Problemas Potenciales: A pesar de sus beneficios, el guano de isla también puede contener bacterias patógenas y su uso inadecuado puede resultar en problemas de contaminación. Por ello, su manejo y aplicación requieren cuidado y consideración.

El guano de isla es un recurso natural valioso que ha desempeñado un papel significativo en la historia agrícola. Aunque su uso tradicional ha sido destacado, es crucial equilibrar su explotación con prácticas sostenibles para preservar tanto la calidad del suelo como los ecosistemas que lo producen.

Un medio anaerobio se refiere a un entorno o condiciones en las cuales la presencia de oxígeno es mínima o está completamente ausente. Este tipo de ambiente es crucial para el desarrollo de procesos biológicos o químicos que requieren la ausencia de oxígeno molecular (O_2). La ausencia de oxígeno en un medio anaerobio puede influir en diversos aspectos, desde la microbiología hasta la producción de energía.

Algunas características y aplicaciones del medio anaerobio incluyen:

Microbiología: Muchos microorganismos, como bacterias anaerobias, prosperan en medios sin oxígeno. Algunas de estas bacterias desempeñan roles esenciales en la descomposición de materia orgánica en entornos anaerobios, como los sedimentos en el fondo de cuerpos de agua.

Fermentación Anaerobia: La fermentación anaerobia es un proceso biológico en el cual los microorganismos descomponen compuestos orgánicos sin la presencia de oxígeno. Este proceso puede ocurrir en medios anaerobios y es utilizado, por ejemplo, en la producción de biogás a partir de residuos orgánicos.

Biorreactores Anaerobios: Los biorreactores anaerobios son dispositivos diseñados para mantener condiciones anaero-

bias controladas. Se utilizan en aplicaciones como la digestión anaerobia, donde microorganismos descomponen materia orgánica para producir biogás y biofertilizantes.

Investigación Científica: En la investigación científica, la creación de medios anaerobios permite estudiar procesos biológicos específicos que ocurren en ausencia de oxígeno. Esto puede incluir investigaciones sobre la microbiología del suelo, la producción de compuestos químicos en condiciones anaerobias, entre otros.

Es importante destacar que la ausencia de oxígeno en un medio anaerobio no solo afecta los procesos biológicos, sino que también puede influir en las reacciones químicas y en la disponibilidad de nutrientes en dicho entorno. La creación y mantenimiento de medios anaerobios son fundamentales en diversos campos, desde la investigación científica hasta la producción sostenible de energía y fertilizantes.

En el entramado conceptual que abarca desde las prácticas ancestrales de fertilización hasta las innovadoras tecnologías de fermentación anaerobia, se revela un viaje fascinante que conecta la historia agrícola con las demandas contemporáneas de sostenibilidad y eficiencia. La transición del ser humano de una vida nómada a una sedentaria marcó un hito crucial en la relación con la tierra, desencadenando la necesidad de

mejorar la productividad del suelo mediante la aplicación de fertilizantes.

En este contexto, la Cultura Muchik en la costa norte del Perú se erige como un ejemplo notable de ingenio ancestral al utilizar diversos recursos, desde peces hasta deyecciones de aves marinas, para fertilizar la tierra. Este enfoque holístico y adaptativo revela la profunda conexión entre la sabiduría tradicional y la gestión inteligente de recursos naturales.

No obstante, la historia evoluciona, y con la revolución agrícola y la intensificación de la producción, surge la era de los fertilizantes químicos. Aunque estos lograron aumentar la productividad agrícola, su uso masivo generó consecuencias ambientales perjudiciales, desde la degradación del suelo hasta la emisión de gases de efecto invernadero. Este panorama desafiante y la búsqueda de alternativas más sostenibles conducen al surgimiento de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia, como proceso innovador, aprovecha residuos orgánicos como el estiércol y desechos para generar no solo biogás, una forma de energía renovable, sino también valiosos biofertilizantes. Este enfoque circular no solo aborda la gestión de residuos, sino que también ofrece una solución integral para la mejora de la fertilidad del suelo. Investigaciones recientes se centran en optimizar este proceso, con-

siderando diversas condiciones de carga y ambientales para maximizar su eficiencia y viabilidad.

El estudio específico del guano de isla en un biorreactor anaerobio representa un paso significativo hacia la aplicación práctica de la fermentación anaerobia. La atención a parámetros clave como nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, fósforo, potasio, conductividad eléctrica y coliformes totales proporciona una comprensión profunda de la transformación del guano en biofertilizante. Este análisis no solo evalúa la calidad nutricional del producto final, sino que también aborda preocupaciones microbiológicas, garantizando la seguridad y la idoneidad del biofertilizante para su aplicación en la agricultura.

Desde las antiguas prácticas agrícolas hasta las tecnologías modernas de fermentación anaerobia, este marco conceptual traza una narrativa que destaca la mejora y la adaptación continua en la búsqueda de prácticas agrícolas sostenibles. La integración de conocimientos tradicionales con investigaciones científicas contemporáneas refleja un enfoque holístico hacia la gestión de recursos naturales y la construcción de un futuro agrícola más resiliente y equitativo.

Capítulo 2

Producción de biogás a partir del guano de la Isla Guañape
utilizando un biorreactor anaerobio

Recolección del guano de la isla Guañape

El guano de la isla Guañape corresponde a un grupo de islas que pertenecen al Perú y se encuentran ubicadas en el océano Pacífico a $8^{\circ}31'54''\text{S}$ y $78^{\circ}57'50''\text{W}$, frente a la provincia de Trujillo. Aquí se encuentran importantes grupos de aves guaneras como el pelícano peruano (*Pelecanus thagus*), piquero peruano (*Sula variegata*) y el pato de mar (*Phalacrocorax bougainvillii*), siendo su alimento principal, los peces marinos como la anchoveta, la sardina, el pejerrey, la caballa, el jurel, la lisa y el bonito (Carrasco, 2017).

El guano de la isla Guañape fue proporcionado por Agrorural (entidad estatal oficial peruana), se seleccionó del almacén sin volver a elegir el sitio ya extraído, muestreo aleatorio simple sin reposición (muestreo probabilístico).

Preparación del biorreactor

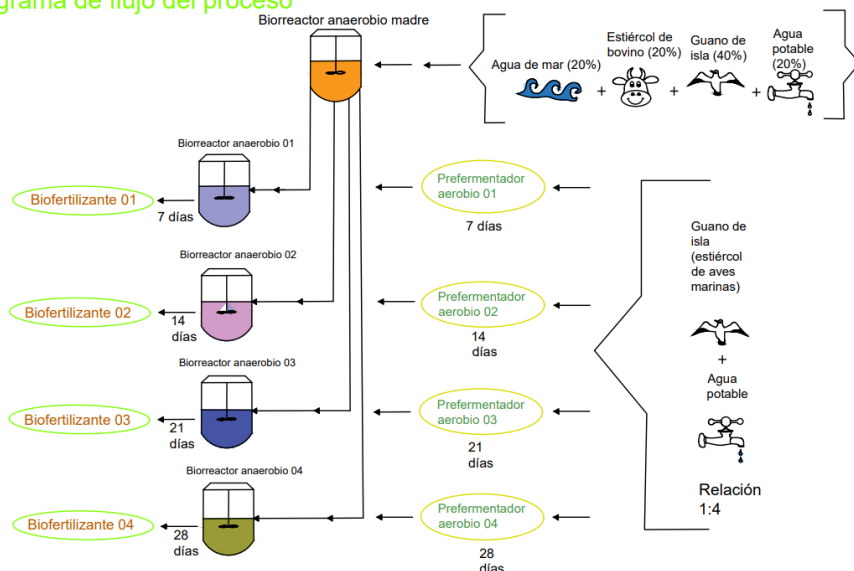
Se utilizó un biorreactor anaerobio (biorreactor semicontinuo, “modelo hindú-modificado con cúpula flotante”, (FAO, 2011). El volumen del biorreactor fue de 400 litros de capacidad de concreto armado), se preparó un inóculo fermentativo (consorcio bacteriano) de 72 litros, a partir de guano de isla (40%), estiércol bovino (20%), agua de mar (20%) y agua pota-

ble (20%), esta mezcla genera coenzimas (vitaminas hidrosolubles) (Paes et al., 2020), cofactores (componentes no proteicos termoestables) y que se añadió al biodigestor para mejorar la biodigestión (Agabo et al., 2020). Se dejó fermentar anaeróbicamente por un periodo de 28 días, como periodo inicial (pretratamiento).

Posterior a este periodo de adecuación se utilizó 100 litros de guano de isla diluido prefermentado (1 volumen de guano de isla por 4 volúmenes de agua), en diferentes TRH (tiempos de retención hidráulica de 7, 14, 21 y 28 días), para su biodigestión anaerobia.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de biodigestión

Diagrama de flujo del proceso



Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Caracterización de las muestras

Se consideraron para el presente estudio los siguientes parámetros, (Hernández, 2017), (Sihuas, 2016): DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Bioquímica de oxígeno), SV (sólidos volátiles), ST (sólidos totales), CE (conductividad eléctrica), CT (coliformes totales), Alcalinidad, Nitrógeno total, Nitrógeno amoniacal, Fósforo y Potasio, (Ver Anexo 1).

Características del guano y obtención del biofertilizante

En la tabla 2 se explican los promedios de la temperatura del guano de isla diluido y el biofertilizante de salida. Se analizó el biofertilizante en diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH) dentro del biorreactor a 7, 14, 21 y 28 días a una temperatura de 21,7 °C promedio y una humedad de 82% del ambiente en promedio. (Los datos obtenidos son valores promedios de repeticiones realizadas y analizadas en cada una de las muestras)

Tabla 1. Análisis de Varianza del estudio.

Variable	p-valor*	Promedios (Grupos homogéneos)**			
		Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Temperatura de alimentación (guano de isla) (°C)	0,000 ¹	(20,05) b	(19,60) b	(20,10) b	(22,30) a
Temperatura de salida (°C)	0,810 ²	(22,80) a	(23,20) a	(23,60) a	(22,30) a
pH de alimentación (guano de isla)	0,009 ¹	(7,02) a	(6,88) a	(6,25) b	(6,78) a
pH de salida (biofertilizante)	0,373 ¹	(7,28) a	(7,35) a	(7,84) a	(7,85) a
Alcalinidad (mg/L) del guano de isla diluido	0,000 ¹	(950) c	(4800) a	(4900) a	(2700) b
Alcalinidad (mg/L) de biofertilizante	0,002 ²	(4870) b	(5050) b	(5200) b	(7302) a
Relación DBO5/ DQO de guano de isla diluido (alimentación)	0,001 ¹	(0,52) a	(0,37) b	(0,50) a	(0,35) b
Relación DBO5/ DQO de guano de isla salida (biofertilizante)	0,020 ²	(0,12) a	(0,08) b	(0,12) a	(0,09) b

Variable	p-valor*	Promedios (Grupos homogéneos)**			
		Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Remoción DQO (%)	0,004 ²	(76,02) b	(61,12) d	(70,53) c	(82,06) a
Remoción DBO ₅ (%)	0,008 ²	(94,65) b	(91,39) d	(92,75) c	(95,39) a
SV en afluente (mg/L)	0,005 ²	(7821) a	(1447) c	(4111) b	(4009) b
SV en efluente (mg/L)	0,000 ¹	(651) a	(366) b	(229) c	(93.50) d
Nitrógeno afluente (mg/L)	0,000 ¹	(437,87) b	(553,83) a	(350,83) c	(415,09) b
Nitrógeno efluente (mg/L)	0,006	(311,15) b	(449,07) a	(317,61) b	(273,84) c
P ₂ O ₅ afluente (mg/L)	0,006 ²	(115,92) a	(62,94) c	(82,53) b	(80,46) b
P ₂ O ₅ efluente (mg/L)	0,002 ²	(132,45) a	(42,16) c	(82,28) b	(87,59) b
K ₂ O afluente (mg/L)	0,010 ¹	(236,65) a	(171,94) b	(183,70) b	(176,15) b
K ₂ O efluente (mg/L)	0,007 ¹	(168,16) b	(167,84) b	(224,82) a	(230,11) a
Nitrógeno orgánico afluente (mg/L)	0,001 ¹	(216,40) b	(362,03) a	(223,24) b	(251,74) b
Nitrógeno orgánico efluente (mg/L)	0,001 ¹	(37,60) c	(62,86) a	(63,92) a	(46,77) b
N (afluente-efluente) (%)	0,008 ²	(-28,13) b	(-19,40) a	(-36,70) c	(-34,50) c
N-NH ₄ ⁺ (afluente-efluente) (%)	0,001 ¹	(22,33) b	(14,92) c	(23,50) b	(42,42) a
C. E.- (dS/m)-afluente	0,009 ¹	(6,24) c	(7,56) bc	(8,9) b	(10,78) a
C. E.- (dS/m)-efluente	0,002 ¹	(12,47) a	(12,24) a	(8,43) c	(10,56) b
CT+E03-afluente	0,000 ¹	(3450) a	(1450) b	(1475) b	(1600) b
CT+E03-efluente	0,002 ²	(37,50) a	(24,50) b	(3,50) c	(1,75) c

¹ se hizo uso del Análisis de Varianza Unifactorial y la identificación de grupos homogéneos con post hoc de Duncan.

² se hizo uso del Análisis de Varianza de Welch y la identificación de grupos homogéneos con Games-Howell.

* El p-valor es significativo al 5% (p<0,05).

** Las medias con letras diferentes son significativamente diferentes.

Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Temperatura de alimentación y salida del biorreactor con cúpula flotante

Tabla 2. Temperatura de alimentación y salida del biorreactor con cúpula flotante

TRH (días)	Temperatura de alimentación (guano de isla) (°C)*	Temperatura de salida (°C)*
7	20,05 (19,41;20,69)	22,80 (6,28;39,32)
14	19,60 (18,33;20,87)	23,20 (9,22;37,18)
21	20,10 (18,83;21,37)	23,60 (7,08;40,12)
28	22,30 (19,76;24,84)	22,30 (21,03;23,57)

Nota: *Corresponde a la estimación intervállica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

pH de la alimentación y salida del biorreactor

Tabla 3. pH de la alimentación y salida del biorreactor

TRH (días)	pH de alimentación (guano de isla)	pH de salida (biofertilizante)
7	7,02 (5,50;8,54)	7,28 (2,58;11,98)
14	6,88 (6,50;7,26)	7,35 (5,50;9,19)
21	6,25 (4,98;7,52)	7,84 (4,92;10,76)
28	6,78 (6,40;7,16)	7,85 (4,55;11,15)

Nota: *Corresponde a la estimación intervállica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Alcalinidad del guano de isla diluido(alimentación) y el biofertilizante (salida)

Tabla 4. Alcalinidad del guano de isla diluido(alimentación) y el biofertilizante (salida)

TRH (días)	Alcalinidad (mg/L) del guano de isla diluido	Alcalinidad (mg/L) de biofertilizante
7	950,00 (594,23;1305,77)	4870,00 (4349,05;5390,95)
14	4800,00 (3186,31;6413,69)	5050,00 (1416,03;8683,97)
21	4900,00 (2625,59;7174,41)	5200,00 (4742,58;5657,42)
28	2700,00 (2433,17;2966,83)	7302,00 (7187,64;7416,36)

Nota: *Corresponde a la estimación intervállica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

DQO, DBO₅, relación DBO₅/ DQO de guano de isla diluido (alimentación)

Tabla 5. DQO, DBO5, relación DBO5/ DQO de guano de isla diluido (alimentación)

TRH (días)	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DBO5/ DQO
7	17636 (12871,17;22400,83)	9214 (3839,28;14588,72)	0,52 (0,36;0,69)
14	12950 (6444,42;19455,58)	4741 (3216,26;6265,74)	0,37 (0,30;0,44)
21	17234 (15988,79;18479,21)	8679 (6086,93;11271,07)	0,50 (0,32;0,69)
28	21450 (15567,03;27332,97)	7578 (6358,20;8797,80)	0,35 (0,31;0,40)

Nota: *Corresponde a la estimación intervállica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

DQO, DBO5, relación DBO5/ DQO de guano de isla salida
(biofertilizante)

Tabla 6. DQO, DBO5, relación DBO5/ DQO de guano de isla
salida (biofertilizante)

TRH (días)	DQO (mg/L)	DBO5 (mg/L)	DBO5/ DQO
7	4227 (3655,22;4798,78)	492 (219,32;765,68)	0,12 (0,03;0,20)
14	5024 (4096,45;5951,55)	408 (331,76;484,24)	0,08 (0,05;0,11)
21	5079 (4214,98;5943,02)	629,50 (140,31;1118,69)	0,12 (0,01;0,24)
28	3848 (3454,11;4241,89)	349.50 (190,67;508,33)	0,09 (0,04;0,14)

Nota: *Corresponde a la estimación interválica al 95,0% de con-
fianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

DQO, DBO₅, y porcentajes de remoción del DQO y del DBO₅
del proceso

Tabla 7. DQO, DBO5, y porcentajes de remoción del DQO y del
DBO5 del proceso

TRH (días)	DQO	DQO	DBO ₅	DBO ₅	Remoción	Remoción
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	DQO	DBO ₅
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	(%)	(%)
7	17636 (12871,17; 22400,83)	4227 (3655,22; 4798,78)	9214 (3839,28; 14588,72)	492 (219,32; 765,68)	76,02 (66,30; 85,74)	94,65 (94,50; 94,81)
14	12950 (6444,42; 19455,58)	5024 (4096,45; 5651,55)	4741 (3216,26; 6265,74)	408 (331,76; 484,24)	61,12 (34,43; 87,81)	91,39 (90,24; 92,55)

TRH (días)	DQO	DQO	DBO ₅	DBO ₅	Remoción	Remoción
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	DQO	DBO ₅
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	(%)	(%)
21	17234 (15988,79; 18479,21)	5079 (4214,98; 5943,02)	8679 (6086,93; 11271,07)	629,50 (140,31; 1118,69)	70,53 (67,65; 73,41)	92,75 (89,28; 96,23)
28	21450 (15567,03; 27332,97)	3848 (3454,11; 4241,89)	7578 (6358,20; 8797,80)	349,50 (190,67; 508,33)	82,06 (78,97; 85,14)	95,39 (92,55; 98,23)

Nota: *Corresponde a la estimación interválica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Sólidos Totales (ST) y volátiles (SV) en guano de isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)

Tabla 8. Sólidos Totales (ST) y volátiles (SV) en guano de isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)

TRH	ST en afluente	ST en efluente	SV en afluente	SV en efluente
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
7	7976 (924,06;15027,94)	1637 (201,20;3072,80)	7821 (4275,97;11366,03)	651 (193,58;1108,42)
14	3732 (2982,33;4481,67)	762,50 (616,38;908,62)	1447 (1116,64;1777,36)	366 (175,41;556,59)
21	4127 (3440,86;4813,14)	933 (691,58;1174,42)	4111 (2586,26;5635,74)	229 (63,82;394,18)
28	5564 (951,65;10176,35)	791 (549,58;1032,42)	4009 (2827,32;5190,68)	93,50 (49,03;137,97)

Nota: *Corresponde a la estimación interválica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

**Nitrógeno, Fósforo (P₂O₅) y Potasio (K₂O) en guano de isla
diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)**

Tabla 9. Nitrógeno, Fósforo (P₂O₅) y Potasio (K₂O) en guano de
isla diluido(afluente) y biofertilizante(efluente)

TRH (días)	Nitrógeno afluente (mg/L)	Nitrógeno efluente (mg/L)	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	K ₂ O afluente (mg/L)	K ₂ O
			afluente (mg/L)	efluente (mg/L)		efluente (mg/L)
7	437,87 (343,84;531,90)	311,15 (125,89;496,41)	115,92 (59,76;172,08)	132,45 (55,83;209,07)	236,65 (156,86;316,45)	168,16 (125,21;211,11)
14	553,83 (427,28;680,38)	449,07 (375,31;522,82)	62,94 (57,86;68,02)	42,16 (35,68;48,64)	171,94 (112,60;231,28)	167,84 (88,93;246,75)
21	350,83 (285,39;416,27)	317,61 (285,72;349,50)	82,53 (60,80;104,26)	82,28 (74,78;89,78)	183,70 (41,64;325,76)	224,82 (91,28;358,36)
28	415,09 (352,83;477,35)	273,84 (233,43;314,25)	80,46 (79,95;80,97)	87,59 (86,51;88,67)	176,15 (105,76;246,54)	230,11 (122,49;337,73)

Nota: *Corresponde a la estimación interválica al 95.0% de con-
fianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Nitrógeno Orgánico en guano de isla diluido (afluente) y el biofertilizante (efluente) en relación al TRH.

Tabla 10. *Nitrógeno Orgánico en guano de isla diluido (afluente) y el biofertilizante (efluente) en relación al TRH.*

TRH (días)	Nitrógeno orgánico	Nitrógeno orgánico
	afluente (mg/L)	efluente (mg/L)
7	216,40 (196,07;236,73)	37,60 (35,69;39,51)
14	362,03 (175,63;548,43)	62,86 (30,21;95,51)
21	223,24 (160,09;286,39)	63,92 (59,02;68,81)
28	251,74 (108,47;395,0)	46,77 (41,18;52,36)

Nota: *Corresponde a la estimación interválica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Transformación del Nitrógeno debido al proceso de diges-
tión anaeróbica en el biorreactor

Tabla 11. Transformación del Nitrógeno debido al proceso de
digestión anaeróbica en el biorreactor

TRH (días)	N afluente	N-NH4	N efluente	N-NH4 efluente	N (afluente- efluente)	N-NH4
	(mg/L)	afluente (mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(%)	(afluente- efluente)
						(%)
7	446,87 (426,54;467,20)	201,97 (187,36;216,58)	321,15 (262,96;379,34)	247,05 (235,23;258,87)	-28,13 (-44,42;- 11,84)	22,33 (7,63;37,03)
14	566,05 (537,33;594,77)	264,01 (234,72;293,29)	456,24 (438,83;473,65)	303,38 (284,19;322,57)	-19,40 (-20,42;- 18,38)	14,92 (9,44;20,40)
21	354,83 (340,22;369,44)	155,59 (144,92;166,26)	224,61 (167,56;281,66)	192,15 (180,59;203,71)	-36,70 (-50,18;- 23,23)	23,50 (7,60;39,41)
28	418,09 (393,88;442,29)	137,03 (131,19;142,87)	273,84 (233,43;314,25)	195,17 (142,57;247,77)	-34,50 (-40,38;- 28,63)	42,42 (10,11;74,73)

Nota: *Corresponde a la estimación interválica al 95,0% de con-
fianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Conductividad Eléctrica (CE) de afluente y efluente

Tabla 12. Conductividad Eléctrica (CE) de afluente y efluente

TRH (días)	C. E.- (dS/m)-afluente	C. E.- (dS/m)-efluente
7	6,24 (1,28;11,20)	12,47 (8,40;16,54)
14	7,56 (6,98;8,13)	12,24 (7,54;16,94)
21	8,92 (1,80;16,04)	8,43 (6,02;10,84)
28	10,78 (2,65;18,91)	10,56 (6,75;14,37)

Nota: *Corresponde a la estimación intervállica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

Coliformes Totales (CT) de afluente y efluente

Tabla 13. Coliformes Totales (CT) de afluente y efluente

TRH (días)	CT+E03-afluente	CT+E03-efluente
7	3450 (2814,69;4085,31)	37,50 (5,73;69,27)
14	1450 (814,69;2085,31)	24,50 (18,15;30,85)
21	1475 (1157,34;1792,66)	3,50 (2,81;4,09)
28	1600 (329,38;2870,62)	1,75 (1,11;2,39)

Nota: *Corresponde a la estimación intervállica al 95,0% de confianza, promedio muestral (Límite Inferior; Límite Superior)
Fuente: Solís Muñoz, 2022.

La tabla 1, presenta los resultados del Análisis de Varianza para los parámetros analizados en el estudio obtenidos de las muestras (biofertilizante) y de las muestras antes de la biodigestión (guano de isla), encontrando que el p-valor de significancia asociado a la prueba de igualdad de medias es menor que 0,05 ($p < 0,05$) para la mayoría de parámetros, permitiendo rechazar la hipótesis nula ($H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$) e indicando la existencia de diferencia significativa en las medias obtenidas de los parámetros según los días de evaluación, cabe precisar, que sólo en los parámetros Temperatura de salida ($^{\circ}\text{C}$) y pH de salida (biofertilizante) presentaron un p-valor de significancia mayor que 0,05, por lo que no se evidenció la existencia de una diferencia significativa entre los valores medios de los días evaluados en dicho parámetros, así mismo, se puede visualizar en la tabla que existe la conformación de grupos homogéneos (medias con letras diferentes son significativamente diferentes), permitiendo identificar la media o medias que presentan un valor significativamente mayor en comparación con las demás, en aquellos casos de parámetros evaluados en el estudio, donde el p-valor asociado a la prueba de comparación de medias resultó ser menor que 0,05 ($p < 0,05$).

Capítulo 3

Eficiencia en un biorreactor con cúpula flotante a partir del guano de la isla Guañape.

A partir de los hallazgos encontrados se acepta la hipótesis alternativa general que señala que el biofertilizante mineralizado se produce en un biorreactor con cúpula flotante a partir de guano de la isla Guañape, ya que se observa mayor conductividad eléctrica (Tabla 12), pH más alto (Tabla 3), se redujo los sólidos totales, (Rashvanlou et al., 2020). (Tabla 8) muestra un incremento en la alcalinidad, debido a la fermentación del guano de isla (Tabla 4), asimismo se observa una reducción de la carga orgánica (nitrógeno total) y un incremento significativo de los macronutrientes, nitrógeno amoniacal (NH_4^+), fósforo y potasio (Tabla 9), (Tabla 10), (Tabla 11). Este comportamiento en la reducción de los sólidos totales, se observa en otros tipos de estiércoles biodigestados.

Los resultados obtenidos respaldan la hipótesis alternativa que sugiere que el biofertilizante mineralizado se produce de manera eficiente en un biorreactor con cúpula flotante a partir del guano de la isla Guañape. La evidencia recopilada revela una serie de mejoras notables en varias propiedades del biofertilizante, indicando un proceso de mineralización efectivo.

Conductividad Eléctrica:

La mayor conductividad eléctrica observada en el biofertilizante mineralizado señala una mayor concentración de

sales y nutrientes solubles. Este aumento puede estar asociado con la descomposición y mineralización de los componentes orgánicos del guano, liberando nutrientes esenciales en formas fácilmente asimilables por las plantas.

pH Más Alto: El incremento en el pH del biofertilizante sugiere una reducción en la acidez, lo cual es beneficioso para el desarrollo de las plantas. Este cambio puede estar relacionado con la actividad de microorganismos durante la fermentación del guano, generando productos finales que elevan el pH.

Reducción de Sólidos Totales:

La disminución de los sólidos totales en el biofertilizante mineralizado indica una mayor solubilización de los componentes orgánicos presentes en el guano. Este proceso de mineralización contribuye a la transformación de materia orgánica en formas más simples y disponibles para las plantas.

Incremento en la Alcalinidad:

La observación de un aumento en la alcalinidad del biofertilizante es coherente con la actividad fermentativa durante el proceso. La fermentación del guano genera productos que pueden aumentar la alcalinidad, influenciando positivamente las condiciones del suelo.

Reducción de la Carga Orgánica (Nitrógeno Total):

La disminución en la carga orgánica, especialmente en forma de nitrógeno total, indica una eficiente descomposición de la materia orgánica compleja presente en el guano. Este resultado sugiere una transformación exitosa de componentes orgánicos en formas más simples, facilitando su absorción por las plantas.

Incremento de Macronutrientes:

Se destaca un incremento significativo en los macronutrientes esenciales como nitrógeno amoniacal (NH_4^+), fósforo y potasio en el biofertilizante mineralizado. Este enriquecimiento nutricional es crucial para promover el crecimiento y desarrollo saludable de las plantas, convirtiendo el biofertilizante en una valiosa fuente de nutrientes.

La consistencia de estos resultados con observaciones similares en otros tipos de estiércoles biodigestados subraya la viabilidad y eficacia de la fermentación anaerobia del guano de isla como método para producir biofertilizantes mineralizados de alta calidad. Estos hallazgos no solo respaldan la utilidad práctica del proceso, sino que también abren la puerta a prácticas agrícolas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente.

En la tabla 11 se observa la variación porcentual del nitrógeno total y el NH_4^+ , también se observa la variación del fósforo y potasio en el biorreactor (Tabla 9). Se puede observar el incremento del nitrógeno amoniacal y la reducción del nitrógeno total y orgánico, mejorando la calidad del biofertilizante debido a la mineralización del nitrógeno. El biofertilizante presenta un aumento de nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) respecto al estiércol sin tratar, el nitrógeno total disminuye en un 34,5 % y el N-NH_4^+ aumenta en 42,42 %. Este resultado en el incremento de macronutrientes, es consistente con otros estudios realizados donde se usaron diferentes alimentaciones al medio anaerobio, estiércol de animal, residuos orgánicos y lodos activados, (Rashvanlou et al, 2020), donde obtuvieron un residuo semisólido rico en nitrógeno llamado biofertilizante (Matter et al., 2017) y un gas combustible rico en metano, llamado “biogás”.

La interpretación detallada de la Tabla 11 revela un panorama significativo en la evolución de los componentes clave del biofertilizante, ofreciendo valiosa información sobre la eficacia del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla en el biorreactor. Aquí se presentan los aspectos destacados de dicha variación porcentual:

Variación del Nitrógeno Amoniacal (NH_4^+):

Se observa un incremento sustancial del nitrógeno amoniacal (NH_4^+), indicando una eficiente conversión de nitrógeno orgánico a formas más asimilables para las plantas. Este aumento, en particular, sugiere una mayor disponibilidad de nitrógeno en una forma que puede ser fácilmente aprovechada por los cultivos.

Reducción del Nitrógeno Total y Orgánico:

La disminución del nitrógeno total y orgánico, con reducciones del 34,5 % y 42,42 % respectivamente, subraya la efectividad del proceso de mineralización del nitrógeno. Este fenómeno implica la descomposición y transformación exitosa de compuestos orgánicos complejos en formas más simples y solubles.

Mejora en la Calidad del Biofertilizante:

La variación observada implica una mejora notable en la calidad del biofertilizante. La reducción del nitrógeno total indica una disminución de compuestos orgánicos complejos, mientras que el aumento del nitrógeno amoniacal señala una mayor concentración de una forma de nitrógeno más disponible para las plantas.

Consistencia con Otros Estudios:

La consistencia de estos resultados con estudios previos, como los realizados por Rashvanlou et al. (2020), refuerza la validez de los hallazgos. La variación en macronutrientes, incluyendo el aumento de nitrógeno amoniacal, es coherente con otras investigaciones que emplearon diferentes fuentes de alimentación en medios anaerobios.

Estos resultados corroboran la eficacia del proceso de fermentación anaerobia del guano de isla en la producción de un biofertilizante enriquecido en nutrientes. La reducción del nitrógeno total y la consecuente mineralización del nitrógeno contribuyen significativamente a mejorar la calidad del biofertilizante, respaldando la idea de que este enfoque puede ser una estrategia prometedora para la gestión sostenible de recursos y la producción agrícola.

Sin embargo el incremento de los macronutrientes en el biofertilizante puede variar (Tabla 9), por el proceso sintrófico, (interdependencia nutritiva entre los organismos que los componen), de las bacterias oxidantes que pueden verse afectadas por distintos factores que van más allá del presente estudio, la humedad, temperatura, radiación solar, material del medio anaerobio, pH, potencial de reducción de la fuente de alimentación, etc., (Rashvanlou et al., 2020)

La observación de la variabilidad en el incremento de macronutrientes en el biofertilizante, como se presenta en la Tabla 9, destaca la complejidad del proceso sintrófico en el biorreactor. Este proceso, caracterizado por la interdependencia nutritiva entre los organismos que lo componen, puede estar sujeto a diversas influencias y factores externos que van más allá del alcance del presente estudio. Algunos de estos factores pueden incluir:

Condiciones Ambientales:

La humedad, temperatura y radiación solar son factores ambientales cruciales que influyen en las comunidades microbianas en el biorreactor. Cambios en estas condiciones pueden afectar la actividad metabólica de las bacterias oxidantes y, por ende, la eficacia del proceso sintrófico.

Características del Medio Anaerobio:

La composición y características del medio anaerobio, como el tipo de sustrato, la presencia de cofactores y la concentración de nutrientes, desempeñan un papel fundamental en la dinámica microbiana. Variaciones en estas condiciones pueden impactar la eficiencia de las interacciones sintróficas.

Parámetros del Proceso:

El pH y el potencial de reducción son parámetros críticos que afectan la actividad microbiana en el medio anaerobio. Cambios en estos factores pueden modular las interacciones sintróficas y, por lo tanto, influir en la disponibilidad de macronutrientes en el biofertilizante.

Diversidad Microbiana:

La diversidad y la composición de la comunidad microbiana en el biorreactor son clave para el éxito del proceso sintrófico. Cualquier variación en la composición microbiana debido a factores externos puede afectar las interacciones y, por lo tanto, la producción de nutrientes en el biofertilizante.

Factores Externos No Considerados:

El estudio reconoce que existen factores más allá de su alcance, como las características del material del medio anaerobio, que podrían influir en el proceso sintrófico. Estos factores no explorados directamente en el presente estudio podrían tener impactos significativos.

En consecuencia, la variabilidad observada en el incremento de macronutrientes puede atribuirse a la interacción compleja entre estos factores externos y el proceso sintrófico

en el biorreactor. La comprensión de estos elementos adicionales es crucial para contextualizar y refinar los resultados, así como para mejorar la eficiencia y predecir el rendimiento del biofertilizante en diferentes condiciones operativas.

La innovación en la obtención del biofertilizante, consistente en la etapa de pretratamiento (fermentado aerobio), se pre-fermenta en diversos rangos (7, 14, 21 y 28 días), para luego añadirlo al medio anaerobio que tiene 28 días con el inóculo y dejarlo reposar nuevamente en diversos rangos de 7, 14, 21 y 28 días respectivamente. (Paes et al., 2020), estabiliza significativamente al medio anaerobio mejorando la biodigestión (Agabo et al., 2020).

La metodología innovadora adoptada en la obtención del biofertilizante, específicamente a través de la etapa de pretratamiento mediante fermentación aerobia, presenta una aproximación única que potencia la eficiencia y estabilidad del proceso global. Este enfoque, basado en la prefermentación durante diversos intervalos de tiempo, seguido por la introducción del fermentado al medio anaerobio con un periodo adicional de reposo, implica varias consideraciones clave.

Fermentación Aerobia como Etapa Preliminar:

La elección de realizar una fermentación aerobia como etapa preliminar revela un enfoque estratégico para preparar el sustrato antes de la digestión anaerobia. La fermentación aerobia puede desempeñar un papel en la descomposición inicial de la materia orgánica compleja, facilitando así su posterior tratamiento en el medio anaerobio.

Duración Variable de la Prefermentación:

La variación en la duración de la prefermentación, con rangos de 7, 14, 21 y 28 días, sugiere una exploración detallada de cómo el tiempo puede afectar la calidad y composición del fermentado aerobio. Esta variabilidad puede permitir ajustes precisos para optimizar el rendimiento del proceso.

Integración con el Medio Anaerobio:

La introducción del fermentado aerobio al medio anaerobio marca una transición crucial en el proceso. Este paso estratégico busca capitalizar la actividad microbiana resultante de la prefermentación, aportando así microorganismos beneficiosos y compuestos solubles al medio anaerobio.

Periodos de Reposo Adicionales:

La inclusión de periodos de reposo adicionales en el medio anaerobio, también variando entre 7, 14, 21 y 28 días, indica un reconocimiento de la importancia del tiempo en la estabilización del proceso. Estos periodos pueden permitir una mayor interacción sintrófica y la mejora de las condiciones para la biodigestión.

Mejora en la Biodigestión:

La estabilización significativa del medio anaerobio y la mejora en la biodigestión señalan el éxito de esta estrategia innovadora. La combinación de la fermentación aerobia como etapa preparatoria y la gestión cuidadosa del tiempo en la etapa anaerobia contribuye a maximizar la eficiencia del proceso global.

La referencia a estudios previos, como los mencionados (Paes et al., 2020; Agabo et al., 2020), respalda la fundamentación científica y la eficacia práctica de esta metodología innovadora. Este enfoque integrado no solo representa un paso adelante en la obtención de biofertilizantes, sino que también destaca la importancia de considerar y controlar múltiples variables temporales para optimizar resultados en la producción de insumos agrícolas sostenibles.

La relación DBO5/ DQO señala que el día 21, el guano de la isla en el contenedor tuvo un índice de biodegradación mayor de 0,49 en promedio (Tabla 5) se estima en la literatura que este valor es relativamente bajo.

La relación DBO5/DQO, que indica la proporción entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), es un parámetro importante para evaluar la biodegradabilidad de un sustrato. En el caso específico del guano de la isla en el contenedor, la observación de un índice de biodegradación promedio de 0,49 en el día 21, según la Tabla 5, plantea algunas consideraciones.

Relativamente Bajo según la Literatura:

La mención de que este valor se considera relativamente bajo según la literatura sugiere que la comunidad científica o las normativas establecen ciertos estándares o rangos ideales para la relación DBO5/DQO. Un índice bajo podría indicar que una proporción significativa de la demanda de oxígeno está asociada con componentes no biodegradables.

Importancia de la Relación DBO5/DQO:

La relación DBO5/DQO es crucial para entender la proporción de oxígeno requerido para la descomposición biológi-

ca en comparación con la demanda química total de oxígeno. Un valor más bajo podría sugerir que una parte importante de la demanda de oxígeno está vinculada a componentes químicos más resistentes a la biodegradación.

Dinámica Temporal:

La elección específica del día 21 para evaluar esta relación puede indicar una dinámica temporal significativa en la biodegradación del guano de la isla en el contenedor. Es posible que el sistema esté experimentando cambios o ajustes en sus procesos metabólicos en este punto específico del tiempo.

Consideración del Contexto:

Es esencial contextualizar este resultado en relación con el objetivo y el contexto específico del estudio. Valores bajos de DBO5/DQO no necesariamente indican un rendimiento deficiente, ya que la biodegradación puede ser un proceso complejo influenciado por diversos factores.

Exploración de Factores Influyentes:

Sería beneficioso explorar en el estudio los posibles factores que podrían estar contribuyendo a este índice de biodegradación aparentemente bajo. Esto podría incluir la composición

específica del guano de la isla, las condiciones del contenedor, la presencia de inhibidores de biodegradación, entre otros.

La observación de un índice de biodegradación relativamente bajo en el día 21 destaca la importancia de interpretar estos resultados en el contexto del estudio y considerar posibles ajustes o mejoras en el proceso para optimizar la biodegradación del guano de la isla en el contenedor.

En la tabla 2 se muestra la temperatura de alimentación al biorreactor del guano de isla diluido y la variación de la temperatura del biofertilizante en la salida, aumentando en promedio 3 °C. La temperatura promedio en el biorreactor fue de 22 °C, lo que indica según la literatura, a una fase microbiológica mesofílica (Popov et al., 2020), la temperatura de operación fue un parámetro de gran influencia en el proceso anaeróbico, se denota que cuando fue menor, ralentizó la digestión anaerobia, por esto las cargas de partida en el biorreactor se realizaron al mediodía, donde la temperatura ambiente era la más adecuada (22 °C en promedio).

La información proporcionada en la Tabla 2 sobre la temperatura en el proceso anaeróbico del guano de isla diluido destaca la importancia crucial de la temperatura en la eficiencia de la digestión anaerobia. Aquí se resaltan algunos puntos clave relacionados con la temperatura en el biorreactor:

Variación de Temperatura en el Biofertilizante:

La observación de un aumento promedio de 3 °C en la temperatura del biofertilizante en comparación con la temperatura de alimentación al biorreactor del guano de isla diluido indica un cambio térmico significativo durante el proceso. Este aumento podría estar relacionado con la actividad metabólica microbiana y la liberación de calor asociada con la digestión anaerobia.

Temperatura Promedio en el Biorreactor:

La temperatura promedio de 22 °C en el biorreactor es un indicativo de una fase microbiológica mesofílica. La mesofilia se refiere a condiciones de temperatura moderada, que son óptimas para muchas bacterias y microorganismos anaerobios responsables de la digestión anaerobia eficiente.

Fase Microbiológica Mesofílica:

La referencia a una fase microbiológica mesofílica, respaldada por la literatura (Popov et al., 2020), sugiere que las condiciones térmicas en el biorreactor son propicias para el crecimiento y la actividad de microorganismos mesófilos. Estos microorganismos suelen tener un rendimiento óptimo en rangos de temperatura moderada.

Influencia de la Temperatura en el Proceso Anaeróbico:

La temperatura es un parámetro de gran influencia en el proceso anaeróbico. Las condiciones mesofílicas son conocidas por favorecer la actividad microbiana y acelerar la descomposición de la materia orgánica. Por otro lado, temperaturas más bajas podrían ralentizar la digestión anaerobia.

Cargas de Partida Ajustadas a la Temperatura Ambiente:

La consideración de la temperatura ambiente al mediodía como la más adecuada (22 °C en promedio) para realizar las cargas de partida en el biorreactor muestra una planificación estratégica. Aprovechar las condiciones térmicas óptimas puede maximizar la eficiencia del proceso anaeróbico.

Efecto de la Temperatura en la Velocidad de Digestión Anaerobia:

La observación de que temperaturas más bajas ralentizan la digestión anaerobia destaca la importancia de ajustar las condiciones operativas para optimizar la velocidad del proceso. La temperatura puede influir en la cinética de las reacciones biológicas y, por lo tanto, en la velocidad de descomposición de la materia orgánica.

La gestión cuidadosa de la temperatura en el biorreactor durante el proceso anaeróbico del guano de isla diluido es un aspecto esencial para garantizar una digestión eficiente y una producción exitosa de biofertilizante. La consideración de factores como la fase microbiológica mesofílica y la planificación de cargas de partida según las condiciones ambientales resalta la importancia de optimizar las condiciones operativas para maximizar los beneficios del proceso anaeróbico.

En la tabla 5 y 7, se observa el rendimiento promedio de la biodigestión en relación al DQO en 72,42% y una disminución del DQO y DBO en la alimentación, esta descomposición conduce a un aumento gradual del valor de pH. (Meegoda et al., 2018)

La observación del rendimiento promedio de la biodigestión en relación con la Demanda Química de Oxígeno (DQO) del 72,42%, así como la disminución del DQO y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en la alimentación, indica un proceso de biodigestión eficiente y la descomposición exitosa de la materia orgánica presente en el guano de isla diluido. Aquí se destacan algunos puntos clave relacionados con estos resultados:

Rendimiento de Biodigestión (72,42%):

El rendimiento del 72,42% en la biodigestión en relación con la DQO sugiere que una proporción significativa de la carga orgánica presente en el guano de isla diluido ha sido convertida en productos gaseosos, líquidos y sólidos durante el proceso anaeróbico. Este rendimiento indica una eficiencia notable en la descomposición de la materia orgánica compleja.

Disminución del DQO y DBO en la Alimentación:

La observación de una disminución del DQO y la DBO en la alimentación al biorreactor indica que la materia orgánica compleja y contaminante presente en el guano de isla diluido está siendo descompuesta durante la biodigestión. Esta reducción es un indicativo positivo de la eficiencia del proceso anaeróbico en la degradación de compuestos orgánicos.

Aumento Gradual del Valor de pH:

La asociación entre la descomposición de la materia orgánica y el aumento gradual del valor de pH es un fenómeno relevante. La liberación de productos de degradación y la generación de compuestos básicos durante la biodigestión pueden contribuir a este cambio en la acidez del medio.

Referencia a Estudios Anteriores (Meegoda et al., 2018):

La mención de un estudio previo (Meegoda et al., 2018) respalda la consistencia de los resultados observados en la investigación actual. Esta referencia sugiere que la relación entre la descomposición de la materia orgánica, el rendimiento de la biodigestión y la variación del pH puede ser un fenómeno general en procesos anaeróbicos similares.

Los resultados presentados en las Tablas 5 y 7 indican un proceso anaeróbico exitoso en la biodigestión del guano de isla diluido. La disminución del DQO y la DBO, junto con el aumento del pH, refleja la transformación positiva de la carga orgánica compleja en productos finales más simples y menos contaminantes. Estos hallazgos respaldan la eficacia del enfoque de biodigestión en la gestión sostenible de residuos orgánicos y la producción de biofertilizantes.

En la tabla 13 se aprecia la variación de los coliformes totales en el guano de isla enriquecido con estiércol bovino y el biofertilizante obtenido, ello debido a la biodigestión del sustrato, cambio de temperatura y pH; en concordancia con resultados de la literatura científica, (Owamah et al., 2014).

La observación de la variación de los coliformes totales en el guano de isla enriquecido con estiércol bovino y en el biofertilizante obtenido, como se presenta en la Tabla 13, des-

taca la influencia significativa de la biodigestión del sustrato, los cambios de temperatura y pH en la reducción de la carga de coliformes totales. Aquí se resaltan algunos puntos clave relacionados con estos resultados:

Reducción de Coliformes Totales:

La disminución de los coliformes totales en el guano de isla enriquecido con estiércol bovino y en el biofertilizante obtenido indica un impacto positivo del proceso de biodigestión en la reducción de microorganismos indicadores de contaminación fecal. Este resultado es valioso en términos de la seguridad y calidad del producto final.

Factores Contribuyentes:

La atribución de la variación de los coliformes totales a la biodigestión del sustrato, cambios de temperatura y pH resalta la interacción compleja de varios factores en la reducción de la carga microbiana. La acción combinada de la actividad microbiana, los cambios en las condiciones ambientales y la transformación de compuestos orgánicos puede contribuir a la disminución de coliformes.

Concordancia con la Literatura Científica (Owamah et al., 2014):

La referencia a resultados de la literatura científica, específicamente a Owamah et al. (2014), respalda la consistencia de los hallazgos observados en el estudio actual. Esta concordancia sugiere que la reducción de coliformes totales como resultado de la biodigestión y los cambios en las condiciones ambientales es un fenómeno reconocido y documentado en investigaciones previas.

Importancia para la Seguridad y Calidad del Producto:

La disminución de los coliformes totales es significativa en términos de la seguridad microbiológica y la calidad del biofertilizante obtenido. La presencia de coliformes totales se utiliza comúnmente como indicador de la posible contaminación fecal y patógenos asociados, por lo que su reducción es esencial para garantizar un producto final seguro y apto para su uso en la agricultura.

La variación observada en los coliformes totales en concordancia con la biodigestión, cambios de temperatura y pH refleja el impacto positivo de estos factores en la mejora de la calidad microbiológica del biofertilizante obtenido. La consistencia con la literatura científica fortalece la validez de estos resultados y subraya la relevancia de considerar estos aspectos en la producción de biofertilizantes seguros y efectivos.

Para el crecimiento de las plantas el nitrógeno es fundamental, especialmente en sus formas inorgánicas como el ión amonio (NH_4^+) (College of Agriculture, 2019), se obtuvo un incremento máximo hasta del 42,42 % (a los 28 días) de nitrógeno amoniacal.

La observación de un incremento máximo de hasta el 42,42% de nitrógeno amoniacal (NH_4^+) a los 28 días es un hallazgo significativo en términos de la disponibilidad de nitrógeno para el crecimiento de las plantas. Aquí se destacan algunos puntos clave relacionados con este resultado:

Importancia del Nitrógeno para el Crecimiento de las Plantas:

El nitrógeno es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, y su forma inorgánica, especialmente en forma de ión amonio (NH_4^+), es crucial para su absorción y utilización eficientes. Este hallazgo respalda la importancia de proporcionar a las plantas una forma de nitrógeno fácilmente asimilable.

Incremento Significativo de Nitrógeno Amoniacal:

El aumento máximo del 42,42% en el nitrógeno amoniacal indica el éxito del proceso anaeróbico en la conversión de

nitrógeno orgánico a una forma más asimilable para las plantas. Este incremento sugiere que la biodigestión del guano de isla enriquecido con estiércol bovino ha generado un biofertilizante enriquecido en nitrógeno amoniacal.

Relevancia para el Desarrollo de las Plantas:

La disponibilidad de nitrógeno amoniacal es especialmente relevante para el desarrollo de las plantas, ya que este compuesto puede ser absorbido más rápidamente por las raíces y utilizado directamente en procesos metabólicos esenciales. Este aspecto es fundamental para el rendimiento y la salud de los cultivos.

Efecto Positivo en la Fertilidad del Suelo:

El incremento en el contenido de nitrógeno amoniacal también puede tener un efecto positivo en la fertilidad del suelo, ya que el nitrógeno es un componente clave de los nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. Mejorar la disponibilidad de nitrógeno puede contribuir a un suelo más fértil y productivo.

Aplicabilidad Práctica en Agricultura Sostenible:

Este hallazgo tiene implicaciones prácticas importantes

en términos de agricultura sostenible. La capacidad de generar un biofertilizante enriquecido en nitrógeno amoniacal a través de la biodigestión demuestra un enfoque innovador y eficaz para mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de los cultivos de manera sostenible.

El incremento significativo de nitrógeno amoniacal obtenido a través de la biodigestión resalta la capacidad de este proceso para generar un biofertilizante enriquecido, especialmente en una forma de nitrógeno fundamental para el desarrollo saludable de las plantas. Este resultado tiene implicaciones prácticas importantes para la mejora de la fertilidad del suelo y la promoción de la sostenibilidad en la agricultura.

La ventaja del biofertilizante obtenido, (Rea, 2018), es que se requiere una menor cantidad del mismo para cubrir una hectárea de terreno (2 – 4 Toneladas), en relación con otros tipos de abonos. En el caso de manejar sólo estiércol es necesario 15 – 30 Toneladas/ha y si se maneja compost es necesario de 10 – 20 Toneladas/ha. Siendo el biofertilizante una alternativa de fertilización orgánica de bajo costo, de fácil aplicación y libre de patógenos (Pinedo et al., 2018).

Esta ventaja se manifiesta en varios aspectos clave:

Eficiencia de Uso:

La necesidad de una menor cantidad de biofertilizante (2-4 Toneladas/ha) para cubrir una hectárea de terreno sugiere una eficiencia notable en la aplicación. Esto puede ser atribuido a la mayor concentración de nutrientes fácilmente asimilables en el biofertilizante, optimizando su impacto en el suelo y las plantas.

Comparación con Otros Abonos:

La comparación con otros tipos de abonos, como el estiércol (15-30 Toneladas/ha) y el compost (10-20 Toneladas/ha), destaca la diferencia significativa en la cantidad necesaria para lograr resultados similares. Esta disparidad resalta la eficacia del biofertilizante como una opción más concentrada y, por ende, más económica.

Bajo Costo:

La caracterización del biofertilizante como una alternativa de fertilización orgánica de bajo costo sugiere que su producción y aplicación son económicamente más viables en comparación con otras formas de abonos. Esto puede tener implicaciones positivas para los agricultores en términos de reducción de costos de insumos.

Facilidad de Aplicación:

La facilidad de aplicación del biofertilizante agrega un beneficio práctico. La necesidad de aplicar una menor cantidad simplifica el proceso de manejo y distribución en comparación con abonos que requieren volúmenes más grandes.

Libre de Patógenos:

La afirmación de que el biofertilizante es libre de patógenos (Pinedo et al., 2018) es crucial para garantizar la seguridad y salud de las plantas. La eliminación de patógenos reduce los riesgos de enfermedades en los cultivos y puede contribuir a prácticas agrícolas más sostenibles.

La ventaja del biofertilizante obtenido se manifiesta en su eficiencia, bajo costo, facilidad de aplicación y seguridad al ser libre de patógenos. Estos atributos lo posicionan como una opción atractiva y sostenible para la fertilización orgánica, brindando beneficios tanto económicos como ambientales a los agricultores que buscan optimizar el rendimiento de sus cultivos.

La creciente demanda de los alimentos orgánicos, se necesitan abonar con biofertilizantes, evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por fertilizantes agroquímicos fosfatados del sector agropecuario, demanda bus-

car nuevos procesos tecnológicos para lograr el tratamiento óptimo del guano de la isla y así darle un valor agregado a esta materia prima que tenemos en Perú, siendo beneficiada la industria agropecuaria y siendo un hub regional en la materia logrando cumplir la normativa ambiental internacional, Organización de las Naciones Unidas (ONU), ODS 03 (salud y bienestar), ODS 06 (agua limpia y saneamiento), ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), así como la agenda ambiental nacional para el 2030, (Ministerio del Ambiente, 2016).

La creciente demanda de alimentos orgánicos ha generado la necesidad de adoptar prácticas agrícolas sostenibles, como el uso de biofertilizantes, para abordar no solo las demandas del mercado, sino también para mitigar los impactos negativos del sector agropecuario en el medio ambiente. Aquí se resaltan algunos puntos clave relacionados con esta necesidad y su impacto positivo:

Sostenibilidad en la Agricultura Orgánica:

La demanda creciente de alimentos orgánicos ha llevado a un mayor interés en prácticas agrícolas sostenibles. Los biofertilizantes, al ser productos orgánicos y ricos en nutrientes, se alinean con esta tendencia y ofrecen una alternativa respetuosa con el medio ambiente.

Prevención de Contaminación del Agua:

La necesidad de evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por fertilizantes agroquímicos fosfados destaca la importancia de adoptar enfoques más limpios y sostenibles en la fertilización. Los biofertilizantes, al ser productos naturales, reducen el riesgo de contaminación química.

Valor Agregado al Guano de la Isla:

La búsqueda de nuevos procesos tecnológicos para el tratamiento óptimo del guano de la isla es esencial para aprovechar al máximo esta materia prima disponible en Perú. Al darle un valor agregado a través de la producción de biofertilizantes, se crea una oportunidad para impulsar la industria agropecuaria y generar ingresos adicionales.

Posicionamiento como Hub Regional:

Convertirse en un hub regional en la producción y aplicación de biofertilizantes puede fortalecer la posición de Perú en el sector agrícola. Esto no solo beneficia la economía local, sino que también contribuye al intercambio de conocimientos y prácticas sostenibles a nivel regional.

Cumplimiento de Normativas Ambientales Internacionales y ODS:

Al adoptar prácticas que buscan cumplir con normativas ambientales internacionales, como las establecidas por la ONU, y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) específicos, Perú demuestra su compromiso con la sostenibilidad y la protección del medio ambiente.

Contribución a la Agenda Ambiental Nacional para el 2030:

La alineación de estas iniciativas con la agenda ambiental nacional para el 2030, establecida por el Ministerio del Ambiente, refuerza el compromiso del país hacia el desarrollo sostenible y la gestión responsable de los recursos naturales.

La adopción de procesos tecnológicos para el tratamiento del guano de la isla y la producción de biofertilizantes no solo responde a la demanda de alimentos orgánicos, sino que también aborda preocupaciones ambientales y contribuye a metas internacionales y nacionales de desarrollo sostenible. Este enfoque integral beneficia a la industria agropecuaria, fortalece la posición de Perú en el ámbito regional y promueve prácticas agrícolas respetuosas con el medio ambiente. En conclusión, la obtención de biofertilizante mineralizado a partir del guano de la isla Guañape mediante un biorreactor con cúpula flotante se muestra como una alternativa de bajo costo y eficiente para la fertilización orgánica de cultivos. La mineralización del ni-

trógeno resulta en un incremento significativo de los macronutrientes, especialmente del nitrógeno amoniacal, lo que mejora la calidad del biofertilizante. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la variación de los macronutrientes puede depender de factores externos como la humedad, temperatura, radiación solar, material del medio anaerobio, pH, entre otros. La innovación en la obtención del biofertilizante mediante la etapa de pretratamiento y la estabilización del medio anaerobio mejora la biodigestión y conduce a un aumento gradual del valor de pH. Además, el biofertilizante obtenido requiere una menor cantidad en comparación con otros tipos de abonos, lo que lo convierte en una alternativa atractiva para la industria agropecuaria. Finalmente, la obtención de biofertilizante a partir del guano de la isla Guañape contribuye a la sostenibilidad y al cuidado del medio ambiente, cumpliendo con las normativas ambientales internacionales y nacionales.

Conclusiones

En el biofertilizante obtenido se incrementa significativamente los macronutrientes (macroelementos), NH_4^+ , P_2O_5 y K_2O , a razón de 42,42%–8,9 %–30,5% respectivamente.

El medio anaerobio, biorreactor semicontinuo “modelo hindú modificado con cúpula flotante”, mineralizó el guano

de isla, convirtiéndolo por sus características, en un biofertilizante de óptima calidad.

La temperatura promedio en el biorreactor fue de 22 °C.

Hubo una eficiencia de remoción de 82,1 % para la DQO y 95,4% para la DBO_5 en el biorreactor.

El pH promedio de entrada y salida en el biorreactor tuvo un rango de 6,78 y 7,85 respectivamente.

Se logró una remoción del 99,9% de coliformes totales en el biofertilizante.

Comparando el insumo se observó que el guano de la isla tiene un valor de S/ 1,0 / kg, y el estiércol bovino es considerado desecho, ambos biodigestados producen un coproducto denominado biofertilizante, (Ministerio de agricultura, 2016), el cual es inocuo y tiene un incremento significativo de macronutrientes, lo cual genera una economía circular dentro de sistemas agropecuarios a implementar, teniendo un impacto en el PBI y promoviendo el desarrollo sostenible.

El proceso de obtención de biofertilizante a través del biorreactor semicontinuo “modelo hindú modificado con cúpula flotante” es altamente eficiente y sostenible. La mineralización

del guano de isla utilizando este biorreactor permite obtener un producto final de óptima calidad, con un alto contenido de macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Además, el proceso de producción es inocuo y altamente eficiente en la remoción de contaminantes, lo que lo convierte en una alternativa altamente recomendable para la producción agrícola sostenible. Al comparar el valor del guano de isla y el estiércol bovino, se puede observar que ambos pueden ser utilizados como insumo para la producción de biofertilizante, lo que genera una economía circular y contribuye al desarrollo sostenible de los sistemas agropecuarios. En resumen, el uso de biofertilizante obtenido a través del biorreactor semicontinuo es una alternativa rentable, sostenible y altamente eficiente para la producción agrícola.

Propuesta y/o recomendaciones

La propuesta o recomendaciones para mejorar el biofertilizante incluyen llevar a cabo un estudio de la carga microbiana benéfica presente en él. Además, es importante investigar la forma disponible de los iones nitrógeno presentes en el biofertilizante obtenido, que incluyen NH_4^+ y NO_3^- . También es necesario determinar la variación en la cantidad de micronutrientes en el biofertilizante, elementos secundarios como CaO , MgO , S y microelementos como Fe, Zn, Cu, Mn, B.

Otra recomendación es investigar el uso de electrodos para biofermentar el guano de isla y/o estudiar los valores del potencial de reducción en las etapas fermentativas en el biorreactor. Es importante considerar un pretratamiento como el termoquímico, ultrasonido y/o prefermentado, ya que se ha demostrado que producen una mejora significativa en el proceso de producción de biofertilizantes (Gunes et al., 2021).

Referencias

- Alfa, M. I., Adie, D.B., Igboro, S.B., Oranusi, U.S., Dahunsi, S.O., & Akali, D.M. (2014). Assessment of biofertilizer quality and health implications of anaerobic digestion effluent of cow dung and chicken droppings. *Renewable Energy*, 63, 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.049>
- Agabo-García, C., Pérez, M., & Solera, R. (2020). Adaptation of thermophilic sludge-inoculum to co-digestion with Sherry-wine distillery wastewater. *Biomass and Bioenergy*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105628>
- AGRORURAL. (2018). *Manual de Abonamiento con Guano de las Islas*. <https://acortar.link/3LfovU>
- Apolo, A. (2015). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio prototipo de bajo costo* [Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito]. Ecuador. <https://acortar.link/N3oLfR>
- Aydin, I., & Bayrak, O. (2019). Gonen example of biofertilizer production activities which are indispensable for environmentally friendly agricultural applications. *The Journal of Kesit Academy*, 5(20), 11-25. <http://dx.doi.org/10.29228/kesit.25868>
- Cabos Sánchez, J., Bardales Vásquez, C.B., León Torres, C.A., & Gil Ramírez, L.A. (2019). Evaluación de las concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. *Arnaldoa*, 26(3), 1165-1176. <https://dx.doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26321>

- Carrasco, L., & Meza, M. (2017). *Impacto de la extracción del guano sobre las poblaciones de aves guaneras en algunas islas y puntas guaneras de la costa peruana* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional <https://hdl.handle.net/20.500.12958/3425>
- de Arriaga, P. (1621). *La extirpación de las idolatrías en el Perú*. Imprenta y Librería San Martí y C^a.
- Gunes, B., Stokes, J., Davis, P., Connolly, C., & Lawler, J. (2021). Modelling and optimisation of the biogas yield after hybrid alkaline-ultrasonic pre-treatment in the early stages of anaerobic digestion of pot ale to shorten the processing time. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.013>
- Gunes, B., Stokes, J., Davis, P., Connolly, C., & Lawler, J. (2021). Optimisation of anaerobic digestion of pot ale after thermochemical pre-treatment through Response Surface Methodology. *Biomass and Bioenergy*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105902>
- Hernández, R. (2017). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill, Interamericana Editores.
- Hernández, V., Olvera, O., Guzmán, P., Morillón, D. (2017). Dimensionamiento de dos biodigestores para la producción de metano en la FES Cuautitlán, empleando la materia fecal de conejos y vacas. *Revista de desarrollo tecnológico*, 1(03), 44-53.

- León, G. (2017). *Los biofertilizantes en el rendimiento de cuatro variedades de quinua (Chenopodium quinoa Willd.) en el valle del Mantaro* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional <https://hdl.handle.net/20.500.12996/2832>
- Lorente Leyva, L.L., Collaguazo Galeano, G., Herrera Granda, I., Lastre Aleaga, A., & Cordovés García, A. (2018). Diseño de biodigestor a escala de laboratorio para la digestión anaerobia e industrialización energética de los desechos sólidos municipales. *Revista DELOS Desarrollo Local Sostenible*, 11(31). <https://www.eumed.net/rev/delos/31/leandro-lorente.html>
- Matter, J.M., De Costa, M.S.S.M., De Costa, L.A.M., Pereira, D.C., De Varennes, A., & Tessaro, D. (2017). Anaerobic co-digestion of hatchery waste and wastewater to produce energy and biofertilizer–Batch phase. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(9), 651–656. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n9p651-656>
- Meegoda, J.N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph15102224>
- MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). *Manual del Biogás*. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

- Ministerio de Agricultura [Perú]. (2016, 21 de marzo), *Medios de producción agropecuarios*. <https://acortar.link/Yt8j3Z>
- Ministerio del Ambiente [Perú]. (2016). *Objetivos de Desarrollo Sostenible e Indicadores*. <https://acortar.link/lca9iJ>
- Ministerio del Ambiente [Perú]. (2017, 28 de junio). *Nueva Ley de Residuos Sólidos*. <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/nueva-ley-de-residuos-solidos/> (28-12-18)
- Miyashiro, I. (2014). *Calidad de seis formulaciones de compost enriquecido con guano de islas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional <https://hdl.handle.net/20.500.12996/1879>
- Owamah, H.I., Dahunsi, S.O., Oranusi, U.S., & Alfa, M.I. (2014). Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste Management*, 34(4), 747–752. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.017>
- Paes, J.L., Alves, T.B.S., da Silva, L.D.B., de S. Marques, A., & Valentina, R.S.D. (2020). Use of inoculum in biodigesters with cattle manure under conventional and organic production systems. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 146–153. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V40N2P146-153/2020>
- Pinedo, M., Abanto-Rodríguez, C., Oroche, D., Paredes, E., Bardales-Lozano, R., Alves, E., Lopes, J., & Vargas, J. (2018). Improvement of the agronomic characteristics and yield of camu-camu fruit with the use of biofertilizers in Lore-

- to, Peru. *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 527–533. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.08>
- Rashvanlou, R.B., Farzadkia, M., Moserzadeh, A.A., Riazati, A., Wei, C., & Hoseinzadeh, E. (2020). Microbial Community Analysis Using MiSeq Sequencing and Pathway of Methane Production in Tehran WWTP: A Full-Scale Anaerobic Digester. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 5(3), 1091–1102. <https://doaj.org/article/741ba427341c43629d818fa3f113ee44>
- Rea Galeas, H. (2018). *Diseño e implementación de un biodigestor para la producción de un bioabono a partir de estiércol de ganado vacuno en el Relleno Sanitario del GAD Municipal del cantón La Joya de los Sachas* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8937>
- Reis, M.M., Santos, L.D.T., Pegoraro, R.F., Colen, F., Rocha, L.M., & Ferreira, G.A.D.P. (2016). Nutrition of *Tithonia diversifolia* and attributes of the soil fertilized with bio-fertilizer in irrigated system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(11), 1008–1013. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n11p1008-1013>
- Sánchez García, Y. (2016). *Caracterización química del guano de aves marinas de la Isla San Jerónimo, Baja California, México y su viabilidad como fertilizante agrícola* [Tesis de posgrado, CICESE]. Repositorio Institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1319>

- Serrepe, A. (2017). *El Habla de los Mochicas, Muchik: Historia de la gramática* [Tomo I]. Instituto Nacional de Cultura de Chiclayo.
- Sihuas, N. (2016), *Boletín estadístico de medios de producción agropecuarios, Dirección general de seguimiento y evaluación de políticas-DGESEP*. Ministerio de agricultura y riego – MINAGRI, Perú.
- Solís Muñoz, H. (2022). *Producción de biofertilizante en biorreactor con cúpula flotante a partir de guano de la isla Guañape* [Tesis doctorado, Universidad Nacional de Trujillo]
- Vargas, M. (2017). *Evaluación de un fertilizante compuesto por una mezcla de efluente de biodigestor más urea versus urea, sobre variables tanto del suelo como de la producción del pasto kikuyo (Kikuyuocloa clandestina) en fincas lecheras de Santa Cruz de Turrialba y Pacayas de la provincia de Cartago* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Costa Rica]. <https://acortar.link/3DToVo>
- Yuhui, L., Xiuping, T., Qingwen, Z., Aiping, Z., Xing, L., & Zhengli, Y. (2019). Nitrogen Absorption of Winter Wheat Influenced by Combined Biofertilizer Replace Chemical Fertilizer. *China Science & Technology Journal Database*, 34(2),178-186. http://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/Detail?id=7001818539&from=journal_article

Anexo

Anexo 1. Métodos para el análisis físico, químico y biológico de las muestras estudiadas

	Parámetros	Título/Norma/Año
1	Demanda Química de Oxígeno	Oxygen Demand, Chemical.Reactor Digestion Method. Method 8000. WATER ANALYSIS HANDBOOK .4 th Edition.2002
2	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.5210B. APHA-AWWA-WEF. 21st Edition.2005
3	Sólidos Totales (ST)	Total Solids Dried at 103-105°C.2540B. APHA-AWWA-WEF. 21st Edition.2005
4	Sólidos Volátiles (SV)	Fixed and Volatile Solids Ignited at 550 °C.2540E. APHA-AWWA-WEF. 21st Edition.2005
5	Conductividad Eléctrica (CE)	Conductivity. Direct Measurement Method. Method 8160. WATER ANALYSIS HANDBOOK .4 th Edition.2002
6	Alcalinidad	Alcalinity.Titration Method.2320B. APHA-AWWA-WEF. 21st Edition.2005
7	pH	Electrodo Crison con 0.01 unidades de pH y precision de ± 0.01
8	Nitrógeno Total	Método 4500 –NH ₃ B de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA,1995).
9	Nitrógeno amoniacal	Método 4500 de Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA,1995).
10	Fósforo	Método 8178 de aminoácidos llamado también Orto-fosfato, adaptado de SMEWW
11	Potasio	Método Turbimétrico de Tetrafenilborato. APHA-AWWA-WEF. 21st Edition.2005
12	Coliformes Totales	Método de Filtrado de Membrana. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA AWWA WEF 21 th Edition. Part. 9221 E-1.



Religación **Press**

Ideas desde el Sur Global



R E L I G A C I Ó N
CICSHAL

Centro de Investigaciones en Ciencias Sociales y Humanidades
desde América Latina



Religación
Press

ISBN: 978-9942-642-66-0



9 789942 642660