UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

Tesis

Aprovechamiento del lodo de levadura gastada de la industria cervecera para la obtención de biol por digestión anaerobia, Cusco 2024

Asesor:

M.Sc. Ing. Mollo Varillas, Valex Raúl

Autores:

Ccallata Echecaray, Luz Raquel

Pacco Pacco, Miguel Angel

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero(a) Ambiental

Cusco - Cusco - Perú

2026

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
Y RECURSOS NATURALES

Acta N°: 014

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 24 días del mes de setiembre del 2026, siendo las 11:05 horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 020-2026-UTEA-FC-EPIARN de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería Ambiental:

Presidente	:	Dra. Farfan Rodriguez, Jessika
Dictaminante	:	Mg. Mattos Yallico, Cesar Antonio
Replicante	:	Mg. Ccopa Ccoto, Oscar

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: Aprovechamiento del lodo de levadura gastada de la industria cervecera para la obtención de biol por digestión anaerobia, Cusco 2024.

Desarrollado por los Bachilleres:

Br.: PACCO PACCO, Miguel Angel
Br.: CCALLATA ECHECARAY, Luz Raquel

Para optar el Tituló Profesional de:

Ingeniero Ambiental

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fueron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Nota	Detalle (**)
Br. PACCO PACCO, Miguel Angel	15	
Br. CCALLATA ECHECARAY, Luz Raquel	15	

Siendo las 11:15 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dra. Farfan Rodriguez, Jessika

(Firma)

Dictaminante: Mg. Mattos Yallico, Cesar Antonio

(Firma)

Replicante: Mg. Ccopa Ccoto, Oscar

(Firma)

Nota: **Desaprobado:** 0-10; **Aprobado:** 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

8% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

6% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Ccallata Echecaray, Luz Raquel
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad	:	74654718
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0003-8230-5616
Apellidos y nombres		Pacco Pacco, Miguel Angel
Tipo de Documento de Identidad		Documento Nacional de Identidad
Número de Documento de Identidad		47678223
URL ORCID		https://orcid.org/0009-0004-8145-0501
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	M.Sc. Ing. Mollo Varillas, Valex Raúl
Tipo de Documento de Identidad	:	Documento de Identidad Nacional
Número de Documento de Identidad	:	47198884
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0002-7895-1469
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales
Línea de Investigación	:	Calidad Ambiental
Rango de años en que se realizó la investigación	:	Octubre 2024 – Junio 2026
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	8%
URL OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.01

Dedicatoria

A Dios, por darme la vida, la salud, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación académica y profesional.

A mis padres, en especial a mi mamá Raquel y mi hermana Siomara quienes constituyen el pilar fundamental de mi vida, mi mamá que con todos los sacrificios supo brindarme su apoyo y mi hermana por su compañía, cariño y alegría, y por estar presente en los momentos más importantes de mi vida.

A toda mi familia, por sus palabras de aliento, por creer en mí y acompañarme en cada paso de este camino.

Ccallata Echecaray, Luz Raquel

Dedico este logro a Dios, por ser mi guía y fortaleza. A mi madre, por su amor incondicional y sacrificios. A mi padre, que me guía desde el cielo. A mis hermanos y queridas sobrinas, por sus palabras de aliento y alegría. Y a toda mi familia, por creer siempre en mí y ser el motor de mis sueños.

Pacco Pacco, Miguel Ángel

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a Dios por brindarnos salud, fortaleza y perseverancia para culminar esta importante etapa de nuestra formación profesional.

A la Universidad Tecnológica de los Andes, por acogernos en sus aulas y contribuir a nuestra formación académica y humana. Asimismo, agradecemos a todos los docentes que, a lo largo de nuestra carrera, compartieron sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, las cuales fueron fundamentales para nuestro desarrollo profesional.

De manera especial, expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestro asesor de tesis, M.Sc. Ing Valex Raúl Mollo Varillas, por su orientación permanente, paciencia, exigencia académica y valioso apoyo durante el desarrollo de la presente investigación. Sus recomendaciones y confianza fueron esenciales para la culminación satisfactoria de este trabajo.

Al Ing. Juan Carlos Torres Estrada, Gerente de la empresa JMC GERENCIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C., por facilitar la materia prima utilizada en la investigación y brindarnos las facilidades necesarias para la ejecución del estudio.

Asimismo, agradecemos al personal de los laboratorios que participaron en los análisis y a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de esta investigación mediante su apoyo, consejos y colaboración.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su amor, comprensión y respaldo incondicional durante todo este proceso. Su confianza y aliento constante fueron la motivación que nos permitió superar cada desafío y alcanzar esta meta académica.

Los autores

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el aprovechamiento del lodo de levadura gastada proveniente de la industria cervecera de la ciudad de Cusco para la obtención de biol mediante digestión anaerobia, determinando la influencia de diferentes concentraciones de materia seca sobre sus características nutricionales y fisicoquímicas. Se empleó un diseño de bloques completamente al azar con tres tratamientos sometidos a digestión anaerobia (3 %, 12 % y 22 % de materia seca) y sus respectivos controles, distribuidos en tres bloques correspondientes a distintos lotes de materia prima. La formulación de los tratamientos estuvo compuesta por lodo de levadura gastada, melaza y el consorcio microbiano EM-1. La digestión anaerobia se desarrolló bajo condiciones controladas de temperatura y agitación, evaluándose parámetros nutricionales, fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados evidenciaron diferencias entre tratamientos en la composición final del biol, observándose que el tratamiento con 12 % de materia seca presentó las características más favorables para su potencial aplicación agrícola. Asimismo, la caracterización microbiológica preliminar del lodo de levadura gastada mostró bajas concentraciones de coliformes totales y ausencia de *Escherichia coli*. Se concluyó que el lodo de levadura gastada constituye una alternativa viable para su valorización mediante digestión anaerobia, permitiendo la obtención de un fertilizante líquido con potencial de uso en sistemas de agricultura regenerativa y contribuyendo al aprovechamiento sostenible de residuos de la industria cervecera.

Palabras clave: digestión anaerobia, lodo de levadura gastada, biol, EM-1, valorización de residuos.

Abstract

The objective of this research was to evaluate the utilization of spent brewer's yeast sludge generated by the brewing industry in the city of Cusco for the production of biol through anaerobic digestion, determining the influence of different dry matter concentrations on its nutritional and physicochemical characteristics. A randomized complete block design was employed, consisting of three treatments subjected to anaerobic digestion (3%, 12%, and 22% dry matter) and their respective controls, distributed across three blocks corresponding to different batches of raw material. The treatment formulation consisted of spent brewer's yeast sludge, molasses, and the EM-1 microbial consortium. Anaerobic digestion was carried out under controlled temperature and agitation conditions, and nutritional, physicochemical, and microbiological parameters were evaluated. The results showed differences among treatments in the final composition of the biol, with the treatment containing 12% dry matter exhibiting the most favorable characteristics for potential agricultural application. Furthermore, the preliminary microbiological characterization of the spent brewer's yeast sludge revealed low concentrations of total coliforms and the absence of *Escherichia coli*. It was concluded that spent brewer's yeast sludge represents a viable alternative for valorization through anaerobic digestion, enabling the production of a liquid fertilizer with potential use in regenerative agriculture systems while contributing to the sustainable management of residues generated by the brewing industry.

Keywords: anaerobic digestion, spent brewer's yeast sludge, biol, brewery waste, waste valorization.

Índice

Portada i

Acta de sustentación ii

Reporte de similitud iii

Metadatos iv

Dedicatoria v

Agradecimientos vi

Resumen vii

Abstract viii

Índice ix

Índice de tablas xi

Índice de figuras xiv

Índice de anexos xv

I Introducción 16

II Planteamiento del problema 19

2.1 Descripción y formulación del problema 19

2.2 Objetivos 21

2.3 Justificación e importancia 21

2.4 Hipótesis 23

2.5 Variables 24

III Marco teórico 26

3.1 Antecedentes 26

3.2 Bases Teóricas 33

3.3 Definición de términos 51

IV Metodología 54

4.1 Tipo y nivel de investigación 54

4.2 Ámbito temporal y espacial 54

4.3 Población y muestra 54

4.4 Instrumentos 56

4.5 Procedimientos 60

4.6 Análisis de datos 67

4.7 Consideraciones éticas 69

V Resultados y discusión 70

5.1 Resultados semanales de Monitoreo de pH y Conductividad Eléctrica 70

5.2 Resultados Descriptivos e Inferenciales 71

5.3 Discusiones 96

VI Conclusiones 106

VII Recomendaciones 108

VIII Referencias 110

IX Anexos 121

Índice de tablas

Tabla 1 Matriz de operacionalización de variables 25

Tabla 2 Resultados de análisis de coliformes totales y Escherichia coli 38

Tabla 3 Comparación de atributos fisicoquímicos/nutricionales de diversos bioles desarrollados y/o ofertados en Perú 46

Tabla 4 Modelos estadísticos aplicados en el ANOVA 68

Tabla 5 Estadísticos descriptivos del nitrógeno total (ppm) por tratamiento 72

Tabla 6 ANOVA–DBCA para nitrógeno total 72

Tabla 7 Estadísticos descriptivos del fósforo (ppm) por tratamiento 73

Tabla 8 ANOVA–DBCA para fósforo (P) 73

Tabla 9 Estadísticos descriptivos del potasio (ppm) por tratamiento 74

Tabla 10 ANOVA–DBCA para potasio (K) 74

Tabla 11 Estadísticos descriptivos del calcio (ppm) por tratamiento 74

Tabla 12 ANOVA–DBCA para calcio (Ca) 75

Tabla 13 Estadísticos descriptivos del magnesio (ppm) por tratamiento 75

Tabla 14 ANOVA–DBCA para magnesio (Mg) 76

Tabla 15 Estadísticos descriptivos del azufre (ppm) por tratamiento 76

Tabla 16 ANOVA–DBCA para azufre (S) 76

Tabla 17 Estadísticos descriptivos del sodio (ppm) por tratamiento 77

Tabla 18 ANOVA–DBCA para sodio (Na) 77

Tabla 19 Estadísticos descriptivos del cloro (ppm) por tratamiento 78

Tabla 20 ANOVA–DBCA para cloro (Cl) 78

Tabla 21 Estadísticos descriptivos de micronutrientes (ppm) valores medios por tratamiento 79

Tabla 22 Resumen de ANOVA–DBCA para micronutrientes 79

Tabla 23 Estadísticos descriptivos del carbono orgánico (%) y relación C/N por tratamiento 80

Tabla 24 ANOVA–DBCA para carbono orgánico y relación C/N 80

Tabla 25 Estadísticos descriptivos de la materia orgánica (%) por tratamiento 80

Tabla 26 ANOVA–DBCA para materia orgánica 81

Tabla 27 Contraste de la hipótesis específica 1: características nutricionales del biol 82

Tabla 28 Estadísticos descriptivos del pH por tratamiento 82

Tabla 29 ANOVA–DBCA para pH 83

Tabla 30 Estadísticos descriptivos de la conductividad eléctrica (dS/m) por tratamiento . 83

Tabla 31 ANOVA–DBCA para conductividad eléctrica 84

Tabla 32 Estadísticos descriptivos de la DQO (ppm) por tratamiento 84

Tabla 33 ANOVA–DBCA para DQO 85

Tabla 34 Estadísticos descriptivos de la densidad (g/mL) por tratamiento 85

Tabla 35 ANOVA–DBCA para densidad 86

Tabla 36 Estadísticos descriptivos de sólidos totales (ppm) por tratamiento 86

Tabla 37 ANOVA–DBCA para sólidos totales 86

Tabla 38 Estadísticos descriptivos de cenizas disueltas (%) por tratamiento 87

Tabla 39 ANOVA–DBCA para cenizas disueltas 88

Tabla 40 Estadísticos descriptivos de Impurezas (%) por tratamiento 88

Tabla 41 ANOVA–DBCA para impurezas 89

Tabla 42 Contraste de la hipótesis específica 2: características fisicoquímicas del biol 89

Tabla 43 Comparación de características nutricionales: biol experimental (X_1–X_3) vs bioles comerciales peruanos 91

Tabla 44 Comparación de características fisicoquímicas: biol experimental vs bioles comerciales 92

Tabla 45 Contraste de la hipótesis específica 3: comparación con bioles comerciales 93

Tabla 46 Matriz de cumplimiento de criterios de calidad por tratamiento con digestión anaerobia 94

Tabla 47 Contraste de la hipótesis general sobre la determinación del tratamiento adecuado para la obtención de biol mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada de cerveza 95

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de flujo de proceso de producción de cerveza..... 35

Figura 2 Principales características de la célula típica de levadura (eucariota) 37

Figura 3 Interacción de cuatro vías que affectan el carbono orgánico y la salud del suelo con y sin prácticas agrícolas regenerativas..... 42

Figura 4 Clasificación de fertilizantes en el ámbito peruano 43

Figura 5 Mapa de proceso de intermedios durante la DA 48

Figura 6 Prototipo de biodigestor anaeróbico con control térmico y de agitación..... 57

Figura 7 Multiparámetro portátil..... 58

Figura 8 Verificación de temperatura..... 59

Figura 9 Gráfica de validación de temperatura 59

Figura 10 Flujograma del procedimiento previo al análisis estadístico 60

Figura 11 Análisis de Materia Seca de cada tratamiento 61

Figura 12 Recolección de lodo de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco 62

Figura 13 Insumos utilizados para cada tratamiento 63

Figura 14 Monitoreo semanal con el equipo Multiparámetro portátil 64

Figura 15 Diagrama del diseño experimental puro empleado en este estudio 65

Figura 16 Esquema del orden de aplicación de tratamientos a diversas muestras de lodo de levadura de cerveza gastada basado en el DBCA..... 66

Figura 17 Diagrama de variación de pH durante las 12 semanas..... 70

Figura 18 Diagrama de variación de Conductividad Eléctrica durante las 12 semanas..... 71

Índice de anexos

Anexo 1 Matriz de consistencia. 122

Anexo 2 Operacionalización de variables 123

Anexo 3 Tabla de resultados nutricionales y fisicoquímicos de laboratorio 124

Anexo 4 Ficha de observación directa de cada muestra 125

Anexo 5 Microorganismos eficaces EM – 1 128

Anexo 6 Registro fotográfico de la experimentación 129

I Introducción

El crecimiento sostenido de la industria cervecera a nivel mundial ha contribuido significativamente al desarrollo económico y a la generación de empleo; sin embargo, también ha incrementado la producción de residuos y subproductos que requieren una gestión ambiental adecuada. Entre estos residuos destaca el lodo de levadura gastada, generado durante los procesos de fermentación y maduración de la cerveza, el cual se caracteriza por contener elevadas concentraciones de materia orgánica, nutrientes y biomasa microbiana residual. Cuando este residuo no es aprovechado adecuadamente, su transporte, almacenamiento y disposición final pueden generar impactos ambientales asociados al consumo de recursos, emisión de gases de efecto invernadero y mayores costos operativos para las empresas.

La valorización del lodo de levadura gastada para la producción de biol constituye una solución con un impacto positivo directo en la Agenda 2030, es así que se logra la perspectiva del ODS 12 (Producción y consumo responsables), la investigación mitiga la carga contaminante de estos residuos al transformarlos en recursos de alto valor agregado. Además, este tratamiento genera un impacto transversal en el ODS 2 (Hambre cero) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), dado que la aplicación del biol en los cultivos sustituye de forma eficiente a los fertilizantes químicos tradicionales, previniendo la degradación del suelo, restaurando los nutrientes de la capa arable y fomentando sistemas de producción alimentaria altamente sostenibles.

En el contexto actual de la economía circular y la gestión sostenible de residuos, existe un creciente interés por desarrollar alternativas que permitan transformar los subproductos industriales en recursos con valor agregado. En este sentido, la digestión anaerobia constituye una tecnología ampliamente utilizada para la estabilización de residuos orgánicos y la recuperación de nutrientes, permitiendo obtener productos aprovechables en actividades agrícolas. Entre ellos destaca el biol, un fertilizante líquido resultante de la degradación biológica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, el cual puede aportar nutrientes y compuestos bioactivos favorables para el desarrollo vegetal.

En la ciudad de Cusco, la generación continua de lodo de levadura gastada por parte de la industria cervecera representa una oportunidad para implementar estrategias de valorización que contribuyan a reducir la cantidad de residuos destinados a disposición final. No obstante, existe limitada información técnica acerca de las características del biol obtenido a partir de este residuo específico y sobre la influencia que diferentes concentraciones de materia seca pueden ejercer en la calidad final del producto. Esta situación evidencia una brecha de conocimiento que dificulta establecer criterios técnicos para su aprovechamiento eficiente en sistemas agrícolas.

Frente a esta problemática, la presente investigación se planteó evaluar el aprovechamiento del lodo de levadura gastada proveniente de la industria cervecera de la ciudad de Cusco para la obtención de biol mediante digestión anaerobia. Asimismo, se buscó determinar la influencia de diferentes concentraciones de materia seca sobre las características nutricionales y fisicoquímicas del producto obtenido, con la finalidad de identificar la condición más favorable para su potencial aplicación agrícola.

La importancia de esta investigación radica en que propone una alternativa de valorización para un residuo industrial que tradicionalmente requiere manejo y disposición especializada. Desde el punto de vista ambiental, contribuye a promover el aprovechamiento

sostenible de residuos orgánicos y a fortalecer los principios de la economía circular. Desde la perspectiva técnica, genera información sobre la calidad del biol obtenido a partir de lodo de levadura gastada, aportando evidencia experimental que puede servir como referencia para futuras investigaciones y aplicaciones productivas. Asimismo, desde el ámbito económico, el aprovechamiento de este residuo podría reducir costos asociados a su gestión y favorecer la obtención de productos con valor agregado para el sector agrícola.

Metodológicamente, la investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo y un diseño experimental de bloques completamente al azar. Se evaluaron tres tratamientos sometidos a digestión anaerobia, correspondientes a concentraciones de materia seca de 3%, 12% y 22%, además de sus respectivos controles.

Para la elaboración de los tratamientos se utilizaron lodo de levadura gastada, melaza y el consorcio microbiano EM-1. Posteriormente, se analizaron parámetros nutricionales y fisicoquímicos con el propósito de comparar el comportamiento de cada tratamiento y determinar la alternativa más adecuada para la obtención de Biol.

II Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

Por un lado, la co-producción de grandes cantidades de lodo de levadura de cerveza gastada (2do mayor residuo generado en cantidad y frecuencia (Umego & Barry Ryan, 2023)), obliga a la industria cervecera local a disponerlo en rellenos sanitarios (de Cusco a Lima), generando una huella de carbono alrededor de 17 tCO_2e/servicio, además de un futuro colapso de rellenos sanitarios. En la ciudad de Cusco, actualmente se generan ~47 t/sem de este residuo (material de descarte), mientras que a nivel nacional ~605 t/sem. Este residuo no puede ser utilizado de manera directa en el sector agrícola debido a su alto contenido de demanda química de oxígeno (~210 g/L de DQO), actividad fermentativa y contenido de alcohol. Su solo vertido causaría efectos adversos en la fertilidad del suelo, así como la eutrofización de cuerpos de agua; generando un impacto negativo significativo al medio ambiente.

Por otro lado, a principios del 2022 las importaciones de fertilizantes químicos sé redujeron en un 84% (por conflicto entre Rusia y Ucrania) significando un déficit de fertilizantes de más de 80M t con respecto al 2021 (Moreno, 2022). En el 2019, del total de fertilizantes ofertados (S/ 2 240 MM) en el mercado interno peruano el 89.5% fueron importados (MIDAGRI, 2022); esto denota el gran impacto que genera la no importación en el costo de producción de la actividad agrícola. Según el INEI (2019), el 46.7% de pequeños y medianos productores aún depende de estos insumos químicos. La sola producción de urea genera alrededor de 1.9-2.3 tCO_2e/tUrea, y su aplicación alrededor de 0.73 tCO_2e/tUrea (López Astudillo, y otros, 2018), además de generar degradación del suelo.

Sumado a esto, en el 2018 se estimaron 22 248 100 ha de áreas degradadas en el territorio peruano (17.5% de la superficie total) (Rubiños, 2021), generado principalmente por la agricultura extensiva y los cambios bruscos de temperatura (disminución de la humedad (Skendžić et al., 2021)). Desde 1970 se viene evidenciando un incremento considerable en la temperatura terrestre a causa del cambio climático producto principalmente de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero derivados del desarrollo industrial (IEA, 2019). Como consecuencia se está conllevando a poner en riesgo la seguridad alimentaria, agravar el calentamiento global (se dejan de captar 1.5-4.5 tCO_2/ha/año (Hernández, Tirado, & Beltrán, 2014)) y a destruir la biodiversidad (microorganismos benéficos, como hongos y bacterias fijadoras de carbono). Al tener suelos desertificados (infértiles) se perturba el ciclo del carbono (secuestro de carbono en el suelo).

2.1.1 Problema General

- ¿Cuál es el tratamiento adecuado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco?

2.1.2 Problemas Específicos

- ¿Qué valores presentan las características nutricionales del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco?
- ¿Qué valores presentan las características fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco?
- ¿Qué valores presentan las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco, en comparación con los bioles comerciales?

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo General

- Determinar el tratamiento adecuado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Calcular las características nutricionales del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.
- Calcular las características fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.
- Comparar los valores de las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco con los de los bioles comerciales.

2.3 Justificación e importancia

A pesar de que el Perú es un consumidor dependiente de fertilizantes químicos (en su gran mayoría) importados (MIDAGRI, 2022), desde el 2017 se viene evidenciando un alza en la producción orgánica del país. Actualmente se cuenta con 571 880 ha dedicadas a la agricultura orgánica, del cual el 89.7% ya están certificadas, denotando un incremento interés por el uso de fertilizantes orgánicos (CEPLAN , 2020).

En este trabajo de investigación se pretende, a través de una economía circular (basada en la reutilización), y en conjunto con la empresa JMC GERENCIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C., reaprovechar el material de descarte de la industria cervecera de la ciudad de Cusco “lodo de levadura de cerveza gastada” vía digestión anaerobia para la obtención (a nivel laboratorio) de un biol eco-amigable y asimilable destinado a la

agricultura regenerativa, siendo este nutritivo tanto para las plantas como para microorganismos benéficos que se hallan en el suelo.

Por un lado, el biol es el material que queda después del proceso de digestión anaeróbica y es generalmente alto en nutrientes (Gonde, Wickham, Brink, & Nicol, 2023). Su aplicación es generalmente foliar y es utilizado como complemento nutricional para plantas en el uso de fertilizantes altamente concentrados, mejorando el equilibrio ecosistémico del suelo y haciéndolo apto para la vegetación que es participe del ciclo del carbono. Por otro lado, el lodo de levadura gastada es el segundo subproducto más relevante del proceso de elaboración de cerveza, proveniente de la fermentación del mosto (Umego & Barry Ryan, 2023). Por su elevado DQO, y capacidad fermentativa es altamente contaminante y no debe ser botado en el medio ambiente debido a que genera la aparición de vectores y la degradación de suelos y eutrofización de cuerpos de agua.

Con este proyecto se aseguraría una captura anual de media de 0.1-0.8 tCO2/ha de suelo agrícola regenerado. También conllevaría a la reducción del 88% de la generación actual de huella de carbono equivalente, debido a que se evitara el transporte y disposición final a rellenos sanitarios ubicados a 1000 km de distancia de la ciudad del Cusco (19h 48min); así como también a la generación mínima de una huella hídrica debido a que no se utilizaría agua como insumo en el proceso de producción. Comparado con el uso y fabricación de fertilizantes químicos, su obtención conllevara a una baja tasa de huella de carbono y su uso a una emisión mínima de dióxido de carbono (0.06 tCO2e/tBiol., ~92% menos que la urea).

La evaluación sistemática de diferentes insumos utilizados para la obtención del biol en mención proporcionará información valiosa sobre el equilibrio necesario para mejorar su calidad. Esto puede generar un impacto positivo en los productores agrarios que están apostando por fertilizantes orgánicos y una agricultura regenerativa. Así también, un impacto

positivo en el medio ambiente, debido a que se estaría reduciendo la huella hídrica y de carbono al valorizar un lodo contaminante.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

H_0: No existen diferencias significativas en las características nutricionales y fisicoquímicas entre los tratamientos, por lo tanto, ningún tratamiento puede considerarse adecuado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

H_a: Existen diferencias significativas en las características nutricionales y fisicoquímicas entre los tratamientos, y al menos uno de ellos es el adecuado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

2.4.2 Hipótesis Específicas

H_{01}: Las características nutricionales del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia no son significativamente mayores a las del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

H_{a1}: Las características nutricionales del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia son significativamente mayores a las del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

H_{02}: Las características fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia no presentan diferencias significativas respecto al lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

H_{a2}: Las características fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia presentan diferencias significativas respecto al lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

H_{03}: Las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento no superan el rango de los bioles comerciales de referencia.

H_{a3}: Las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento superan el rango de los bioles comerciales de referencia.

2.5 Variables

El presente trabajo de investigación cuenta con una variable independiente (digestión anaerobia del lodo de levadura gastada) y una dependiente (biol), tal como se detalla en la Tabla 1 Materialización de Variables.

Tabla 1

Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Independiente: digestión anaerobia del lodo de levadura gastada	La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual se convierte la materia orgánica en biogás, y cuyos residuos resultados de este proceso son los digestatos (Wang & Lee, 2021). En tanto al lodo de levadura gastada, este es el segundo subproducto más relevante del proceso de elaboración de cerveza, proveniente de la fermentación del mosto, presenta un alto contenido de humedad de entre 74 – 86%, y es rico en proteínas y carbohidratos (Umego & Barry Ryan, 2023)	Este fenómeno será evaluado en 2 dimensiones: concentración de lodo de levadura gastada (se logra variar la concentración por decantación del material), y condiciones de operación (los cuales se mantendrán constantes durante todo el proceso de digestión anaerobia con el uso de un equipo prototipo). Se aplicará un diseño DCA con ANOVA para todo el conjunto de dimensiones independientes y dependientes.	Concentración de lodo de levadura gastada	Materia seca (MS)	3% MS, 12% MS, y 22% MS
			Condiciones de operación	Temperatura, presión, pH, y agitación	Temperatura constante de 37 °C. Presión atmosférica local. pH propio de la mezcla de insumos. Agitación constante a 60 rpm
Dependiente: biol	El biol o también conocido como digestato liquido es el material que queda después del proceso de digestión anaeróbica y es generalmente alto en nutrientes (Gonde, Wickham, Brink, & Nicol, 2023); técnicamente denominado producto acondicionador, para el desarrollo y mejoramiento de suelos (MIDAGRI, 2023).	Este material será evaluado en 2 dimensiones: características nutricionales y características fisicoquímicas (con protocolos de laboratorio para análisis de fertilizantes líquidos, y muestras liquidas). Sus valores serán tratados en conjunto con las características del lodo de levadura de cerveza gastada, con el empleo de la prueba de rangos múltiples de Tukey.	Características nutricionales	C orgánico, N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Cl, Cu, Zn, Mn, Fe, B, relación C/N y MO	N (≥242 ppm). P (≥100 ppm). K, (≥2494 ppm), Ca (≥0.18%). C/N (≥3). MO (≥0.31%)
			Características fisicoquímicas	DQO, pH, conductividad eléctrica, densidad, sólidos totales, cenizas disueltas, Impurezas	Conductividad eléctrica (9.95-23 dS/m). pH (4-7).

III Marco teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 A nivel internacional

En estos últimos años se viene reportando tratamientos biológicos de residuos de cervecería a través de la digestión anaeróbica bajo diversos parámetros de operación, así como de tipos de inóculos. En su mayoría estos desechos de cervecería son utilizados para la producción de biogás.

Por un lado, Gustiari (2023), obtuvo un fertilizante liquido orgánico (a escala laboratorio) a partir del residuo liquido de la producción de tofu. Para esto utilizo 3 dosificaciones del residuo líquido (1, 2 y 3 L) y los mezclo con las mismas proporciones de insumos (500 mL de agua de coco, 50 mL de azúcar rubia, 50 mL de agua limpia, y el 50 mL del consorcio bacteriano EM4), la fermentación anaeróbica se produjo a temperatura ambiente y duro 2 semanas. La dosificación con 1 L de residuo líquido reporto más altas características de N, P, K (nitrógeno, fosforo, potasio). Respecto al tratamiento anaeróbico de residuos de cervecería, Beltrán (2015) utilizo desecho de levadura de la industria cervecera para la obtención de un biol y lo testeo en campo para ver la mejora de propiedades del suelo y del crecimiento de frejoles. Para esto mezclo 3 L de desecho de levadura con 15 L de agua y 2 kg de materia orgánica (MO) (en este caso, desechos de cocina) en un recipiente de 20 L a condiciones anaeróbicas. No se utilizó inoculo alguno, ni activador (generalmente azúcar). La digestión duro alrededor de 30 días. Comparado con el desecho de levadura antes de la digestión, los macroelementos del biol obtenido fueron menores (en promedio de un 35% menos) a excepción del calcio (63% mayor). Los análisis fisicoquímicos y de macroelementos del suelo reportaron valores elevados de con la

aplicación del biol (20% más) pero sin mucha diferencia en el contenido de materia orgánica, así también en el tamaño de los frejoles (15% más). Esto indica que, a pesar de haberse disminuido las características nutricionales, su estabilización (en forma de biol) es adecuado para su uso en suelos agrícolas. Por otro lado, Sosa-Hernández et al. (2016) utilizaron levadura gastada de la industria cervecera para la obtención de gas metano (CH_4). Para esto utilizaron 126 mL de diversas concentraciones de levadura gastada diluida en agua desionizada (al 100%, 75%, 50%, y 25%), 0.7 g/L de cloruro de amonio (NH_4Cl) como fuente de nitrógeno, 0.2% de hidróxido de sodio (NaOH) 10 M para ajustar el pH a 7, y 54 mL de inoculo de lodo anaeróbico. Todos los insumos fueron mezclados en frascos de suero y encubados a 37 °C con agitación continua a 180 rpm durante toda la prueba, los test se hicieron por duplicado y al inicio se inyecto una mezcla de nitrógeno/dióxido de carbono (N_2/CO_2) de 80/20% para asegurar las condiciones anaeróbicas y mantener el pH neutral. El tiempo total de generación de metano duro 45 días. Los resultados mostraron mejor conversión de DQO a CH_4 para las diluciones de levadura al 50% y 25% (74.2 y 56.6 mL de CH_4/g DQO, respectivamente), seguido de la dilución al 75% y 100% (42.2 y 15.4 mL de CH_4/g DQO, respectivamente). La cinética de generación de metano para concentración al 100 % fue la más lenta, pues se detectó CH_4 al último día de la digestión; al contrario, la cinética de generación para la dilución al 25% fue la más rápida (desde el día 5), esto se atribuye a que la alta carga orgánica presentes en la levadura al 100% demoran en degradarse y los microrganismos demoran en aclimatarse a las condiciones inhibidoras.

En una investigación de Dudek et al. (2019) se evaluó el uso de biocarbón (producido a 300 °C a partir de granos gastados de cervecería, 100% masa de seca (MS)) en la digestión anaeróbica de granos gastados de cervecería (100% MS), en conjunto con digestato liquido de una planta de biogás (inoculo, 3.1% MS), para la producción de biogás. El tiempo de incubación fue de 21 días a 37 °C, la digestión fue en seco con una masa total de sustratos

de 35 g en el interior de recipientes de vidrio de 1 L, al inicio de cada test se usó CO_2 para asegurar las condiciones anaeróbicas. De la masa total, se mantuvo el 85% de inoculo, y el 15% correspondiente a la mezcla de biocarbón con granos gastados (variando de 0 al 50% la proporción de biocarbón). Con respecto a la prueba en blanco (0% de biocarbón), el uso de 5% de biocarbón genero un 32% más, resultando ser la máxima producción; del 10 al 50% no se notaron resultados significativos pues tenían una tendencia a la baja de producción de biogás. Esta tendencia esta atribuido a la reacción de Maillard durante la generación de biocarbón, la presencia de melanoidinas (procedente de la reacción térmica entre aminoácidos y azucares) en su mayoría no son degradables para los microorganismos.

Así también, Neves (2019) investigó la producción de biogás (CH_4 + CO_2) a partir de la digestión anaerobia de aguas residuales de las industrias de oliva y cervecera. Para esto, varió las concentraciones de ambos efluentes (sustratos) y los mezclo por separado con 2 tipos de inóculos (efluentes porcinos y solidos biológicos de planta de tratamiento de aguas residuales), las pruebas se realizaron por triplicado. El reactor se mantuvo a 37 °C con un espacio libre del 45%, y a la salida se analizaron los gases con un gasómetro; al inicio de la digestión el interior del reactor fue desheredado con nitrógeno gaseoso para asegurar las condiciones anaeróbicas. Los test duraron entre 34 a 75 días. Los resultados reportaron mayor generación de gas metano para las combinaciones 70% de agua residual de cervecería + 30% de solidos biológicos (80% de CH_4 de un total de 66 mL de biogás en 34 días), 40% de efluente porcino + 60% agua residual de cervecería (79.5% de CH_4 en 45 días), y 70% de efluente porcino + 30% agua residual de oliva (70.3% de CH_4 de un total de 780 mL de biogás en 75 días). Se evidencio que el efluente porcino es un buen inoculo y que la baja producción de metano por parte del uso de agua residual de cervecería se debe al bajo componente orgánico presente en ella. Así también se destacó una presencia mayoritaria de *Methanosaeta*, cuya actividad es inhibida por la presencia de aguas residuales de oliva. De

manera similar, Gebrehiwet (2019) evaluó la influencia de la temperatura, el pH, y el ratio de sustratos en la producción de biogás a partir de levadura gastada de cervecería (sustrato), agua residual de efluente de cervecería (sustrato) y lodo anaeróbico (inoculo) de una planta de tratamiento de aguas de cervecería. Para esto, las digestiones anaeróbicas fueron llevadas a cabo en botellas plásticas de 1L con temperatura controlada en baño maría (35, 37, y 39 °C), las botellas fueron llenadas con 400 mL del inoculo y 400 mL de mezcla de ambos sustratos (0, 1, 6, 11, y 100% v/v de levadura gastada), se variaron los pH a valores de 5, 6.5 y 8; y el biogás fue analizado en un analizador de gases BIOGAS 5000. En total fueron 27 unidades experimentales, y la digestión duro 21 días. Del modelo matemático obtenido se concluye que a medida que aumenta la temperatura del rango 35-38 °C incrementa el rendimiento de metano, valores por encima decrece debido a que las bacterias son muy sensibles a pequeños cambios de temperatura, así como de pH (cuyo rendimiento de metano se vio favorecido en el rango de 5-7). Se evidencio también que a medida que disminuía la concentración de levadura de 1-11% también lo hacia el rendimiento de metano, esto se debió a que la mayor acumulación de materia orgánica de células de levadura dificulta la acción bacteriana en el medio. Del análisis hecho al digestato liquido (biol) resultante de cada digestión se reportó que a mayor contenido de levadura mayor eran resultaron ser sus parámetros nutricionales, una concentración del 100% de levadura alcanzo valores de N, P, K de 102, 120 y 170 ppm, respectivamente; comparados con 46.2, 68.1 y 120.5 para el 1%.

Finalmente, Duguma et al. (2024) valorizo el lodo de agua residual y levadura gastada de la industria destilera para la producción de biogás. Para esto se efectuaron 17 test variando la temperatura (33, 36.5 y 40 °C), el pH (6, 7 y 8), y la ratio volumétrica (1, 8 y 15% de levadura gastada en lodo de agua residual). Los test tuvieron un tiempo de retención hidráulica de 24 días. Se utilizaron botellas plásticas de 1L con el 30% de espacio libre. Para medir la cantidad de biogás generado, se empleó el método de desplazamiento de agua,

mientras que el rendimiento de metano mediante el uso de un analizador de gases BIOGAS 5000. Comparado con los datos de caracterización del sustrato antes del test, después de la digestión el digestato liquido (biol) redujo en un 86% su contenido de DQO (610.1 ppm para 15% de levadura) así como en un 84% para solidos totales (643.3 ppm para 15% de levadura); los valores más bajos de DQO y solidos totales se dio para la concentración del 1% de levadura (226.1 ppm y 158.8 ppm, respectivamente). Respecto a las mejores condiciones de operación, se reportó el más alto rendimiento de metano a un pH de 7 y 36.5 °C para el ratio volumétrico de 8%. El rendimiento de metano más bajo se dio para un pH de 6, 33 °C, y un ratio volumétrico de 8%.

3.1.2 A nivel Nacional

En el ámbito nacional solo se reportó dos investigaciones ligadas a la producción de biol a partir de levadura residual de cervecería; en el resto de investigaciones valorizaron sangre de camal, vísceras de pollo y pescado, entre otros.

Por un lado, Abanto y Ricopa (2021) obtuvieron biol a partir de sangre de cerdo. Para esto utilizaron diversas mezclas (en baldes de 19 L) de sangre (10 L) con insumos como el zinc (500 g), ácido bórico (500 g), suero de leche (1 L), y microorganismos (2 y 3 L). El tiempo total de la digestión fue de 60 días a temperatura ambiente. El biol obtenido de las mezclas de solo sangre con microorganismos presentaron un olor nauseabundo. Los bioles preparados con zinc, así como con ácido bórico presentaron un alto contenido en zinc y boro, respectivamente. Para todos los casos, los bioles presentaron alto contenido de hierro debido a la sangre de cerdo. Su aplicación en parcelas de cebolla china demostró que es un repelente de insectos. Por otro lado, Rojas Salas (2023) elaboró un biol a partir de viseras de pollo y pescado. Para esto realizaron tests variando la relación materia orgánica (viseras): agua en relaciones de 50:50 y 25:75, adicionalmente se agregaron otros insumos como ceniza, leche, melaza, humus, y microorganismos EM; llegando a pesar un total de 50 kg. La digestión

anaeróbica se dio a temperatura ambiente (12-20 °C) por un tiempo de 88 días, y en constante agitación. Los análisis de laboratorio mostraron mayor carga de materia orgánica para el tratamiento 25:75, pero mayores parámetros nutricionales para el tratamiento 50:50. Así también, Espinoza Peña (2020) produjo biol a partir de residuos de cascara de naranja y gallinaza. Para esto utilizaron digestores de 80 L de capacidad (dejando el 20% libre) y 3 tratamientos (21.3 kg de cascara en 42.7 L de agua, 21.3 kg de gallinaza en 42.7 L de agua, y 10.65 kg tanto de cascara como de gallinaza en 42.7 L de agua). El tiempo de retención fue de 45 días, y se analizaron muestras en los días 15, 30 y 45. La temperatura de trabajo fue a ambiente (~22.5 °C). El ultimo tratamiento (cascara de naranja + gallinaza) resulto ser el mejor debido a su más alto contenido en nutrientes a los 45 días. A medida que pasaban los días, los parámetros nutricionales incrementaban a excepción de la materia orgánica que mostró una leve tendencia a la baja.

Leiva Trujillo (2018) valorizo mediante fermentación homoláctica del estiércol de ganado vacuno y la parte liquida del lodo de levadura gastada de cervecería para la obtención de biol de calidad nutricional e inocuidad microbiológica. Para esto utilizó la relación de 1:1 para estiércol y la levadura liquida (sumando un total de 500g), adicionado de diferentes concentraciones de melaza y consorcio microbiano ácido láctico Bio-Lac (0:25, 0:50, 25:25, 25:50 y 50:50 g, para ambas partes). Los tratamientos se realizaron por triplicado en envases de plástico de 1 kg de capacidad cubiertos con plástico. Se trabajo a una temperatura de 40 °C por 5 días. El mejor tratamiento en términos de características nutricionales, fisicoquímicas y económicos fue la combinación de 50:25 g de melaza: Bio-Lac. A pesar de estar elaborado con estiércol, el producto final presento ausencia de coliformes, *E.Coli*, y *Salmonella*, esto debido a su pH acido. Si presento *Lactobacillus sp.* (debido al producto Bio-Lac), y mohos y levaduras; pero estas fueron eliminadas al pasteurizar el biol a 60 °C

por 30 min. La prueba de toxicidad en semillas de lechuga indico que la mejor dosificación seria de la razón 1:100 (biol:agua).

Finalmente, Sifuentes (2023) también valorizo la levadura residual de cervecería para obtener biol por fermentación láctica. Para esto solo utilizo como insumos levadura residual (pasteurizada y sin pasteurizar), melaza y microorganismos eficientes (complejo B-lac) (ambos con una variación del 5, 10, 5 y 20% del total de la solución). Se utilizaron recipientes de 1 L y en cada uno 500 g de solución total, las condiciones anaeróbicas se aseguraron tapando los recipientes con bolsas de polietileno, la temperatura de fermentación fue de 40 °C y ambiente, y el tiempo de retención de 30 días. El mejor tratamiento se dio con la concentración del 20% tanto para la melaza y los microorganismos eficientes, en el cual se evidencio el consumo total de la melaza y un bajo pH (el cual es adecuado para eliminar los patógenos presentes). Durante la fermentación anaeróbica se notó un incremento progresivo de la conductividad eléctrica a medida que disminuía el pH. Se evidenciaron tres etapas: un incremento rápido de la población microbiana (5 días), un máximo alcance de la población en donde utiliza toto el sustrato (día 15), y un decrecimiento de la población por falta de sustrato (hasta el día 30). Comparado con la materia prima original, se observó que el biol obtenido (después de los 30 días) presento menor cantidad de coliformes, igual cantidad de *Escherichia coli*, menor cantidad de mohos, igual cantidad de levaduras y la aparición de bacterias acidolácticas (complejo B-lac). El biol que obtuvo la mayor cantidad de parámetros nutricionales fue la obtenida a 40 °C con levadura pasteurizada. Comparado con el biol obtenido por Leiva Trujillo (2018) (con estiércol y 5 días de digestión), este presento menos conductividad eléctrica (9.88 dS/m), mayor materia orgánica (+52%), mayor N, P (+165% y +185%, respectivamente), y menor K, Ca, Mg y Na (−30%, −845%, −113% y −118%, respectivamente). Su aplicación en semillas de lechuga indicó que el biol preparado con levadura sin pasteurizar presentó un nivel alto de sustancias fitotóxicas (33% de índice de

germinación), mientras que el preparado con levadura pasteurizada un nivel moderado (57% de índice de germinación).

3.1.3 A nivel regional y local

A nivel local no se reportaron trabajos de investigación de elaboración de biol, más si del uso de levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la producción acelerada de compost.

Rivera et al. (2020) utilizaron levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) para acelerar el proceso de compostaje de biorresiduos de una institución educativa. Para esto formaron pilas y mezclaron 1 kg de biorresiduo, 100 g de ceniza de leña, 200 g de estiércol, 300 g de aserrín, y diferentes concentraciones de levadura (0, 100, 200, y 300 g) diluida en 1 L de agua. El mejor tratamiento resulto con el uso de 300 g de levadura (93 días), seguido de 200 g (100 días), y 100 g (108 días). De similar forma, Llavilla y Ostos (2023) también produjeron abono orgánico a partir de residuos de flores y aplicación de *Saccharomyces cerevisiae*. Para esto utilizaron 7 kg de excremento vacuno, 3 kg de tierra agrícola, 50 kg de flores, y diversas concentraciones de levadura (400, 800 y 1200 mL). La aplicación de levadura también evidencio una aceleración en el proceso de compostaje (comparado con la prueba testigo), siendo el mejor tratamiento fue con la aplicación de 800 mL de levadura presentando parámetros fisicoquímicos y nutricionales óptimos.

3.2 Bases Teóricas

3.2.1 Industria cervecera y sus residuos

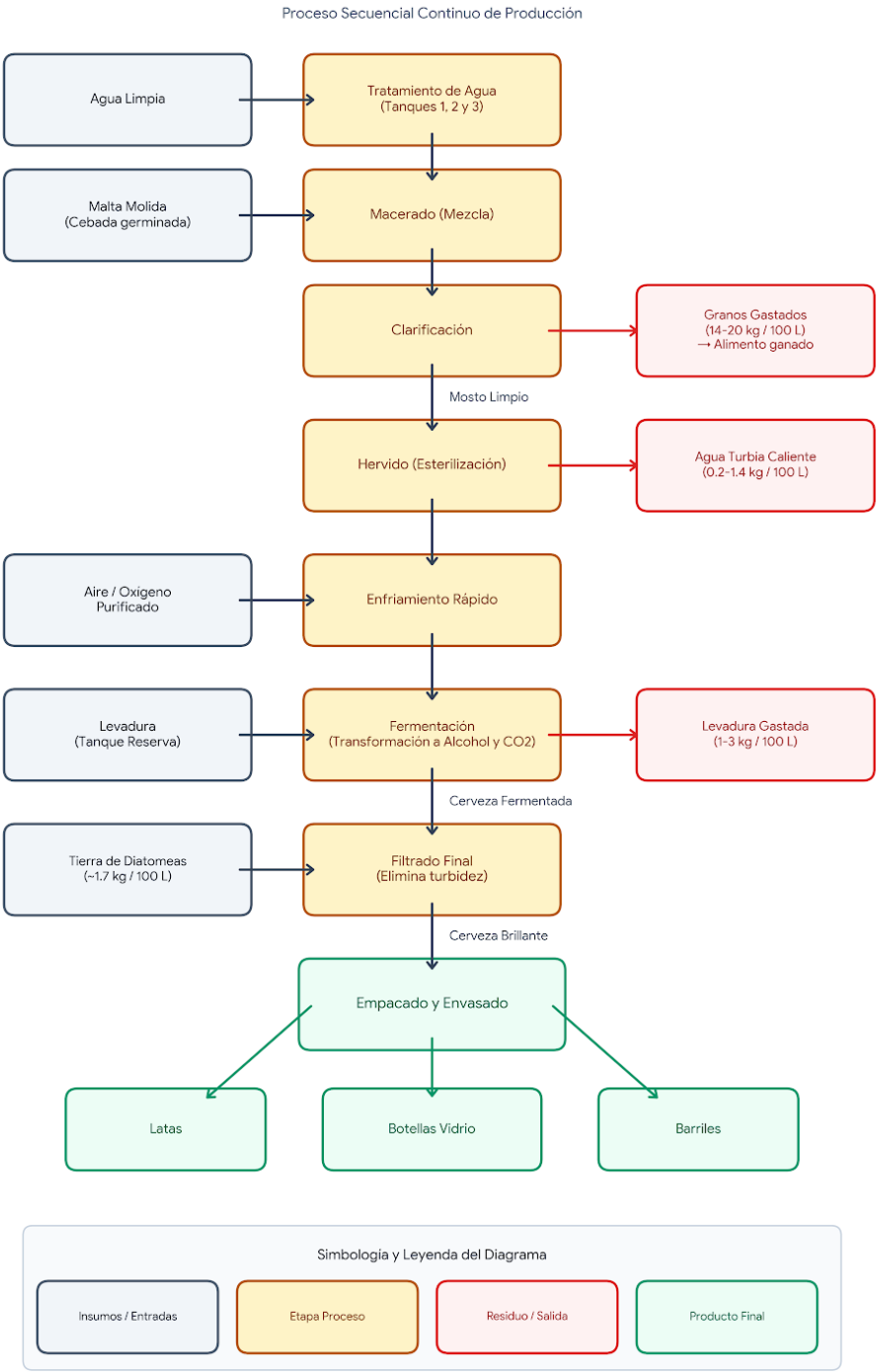
La cerveza es la quinta bebida más consumida del mundo además del té, carbonatos, leche y café, y continua siendo una bebida popular con un promedio de consumo de 9.6 L/cápita de la población mayor de 15 años (Olajire, 2020). En el 2018, en Europa, se produjeron más de 4.2 billones (Morgan, Styles, & Lane, 2021). En Latinoamérica, Brasil y México lideran la producción de cerveza contribuyendo en el 60-70% del total producido en Latinoamérica, seguidos por Colombia y Argentina (tercera y cuarta posición

respectivamente), Perú se posiciona en el quinto lugar duplicando su producción en el periodo 2012-2017 (Arancibia, Masaro, & Coronel, 2024). En el 2023, el mercado latinoamericano de cerveza alcanzo un valor promedio de 13550 MM USD, y se estima que para el periodo 2024-2032 este crezca con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 4% (EMR, 2023). En el Perú, durante el periodo 2010-2020 se viene produciendo en promedio 13.7 MM hl de cerveza anual (Gonzales Campos, Lau Wong, & Quintanilla Ramirez J.A., 2021).

El proceso de elaboración de cerveza es energéticamente intensivo y utiliza grandes cantidades de agua, 4-7 hl/hl de cerveza producida (2/3 del agua es usada en el proceso y 1/3 en operaciones de limpieza) (Devolli, Shahinasi, Stafassani, Feta, & Dara, 2018). El proceso general de producción se ilustra en la Figura 1. Según Poisson et al. (2021) y Salazar et al. (2023) este proceso comienza por un tratamiento previo de agua y la recepción de malta molida, ambos insumos (malta y agua tratada) son mezclados y llevados a maceración a 75 °C por 30-120 min, en esta etapa el almidón es convertido en maltosa y dextrina. Una vez completado el macerado, el líquido, comúnmente llamado mosto, es separado de los granos gastados y transferido a un hervidor entre 60-90 min. En el hervido se agregan lúpulo y otros sabores para la extracción de compuestos amargos. El mosto hervido es luego bombeado a un tanque de hidromasaje por 60 min para dar lugar a la etapa de separación de rotura en caliente. En este momento, todas las partículas más grandes y proteínas coaguladas (turbia) sedimentan en el fondo del tanque. Seguido, el mosto claro es enfriado desde 92-94 °C a 18-20 °C con agua helada. Enfriado, el mosto es transportado hacia un tanque fermentador en conjunto con la levadura a temperatura de 14-19 °C entre 4-6 días, dependiendo del tipo de cepa de levadura, en esta etapa la levadura consume toda la azúcar fermentable de la etapa de maceración y la convierte en alcohol y CO_2. Después del proceso enzimático, la levadura se hunde en el fondo del tanque. Finalizada la fermentación, la cerveza verde es transferida

a tanques de maduración de entre 1-5 °C por 4-7 días. La levadura es colectada (de los tanques de fermentación y maduración) y reciclada tantas veces sea posible para los otros batch. Al final de la etapa de maduración (acondicionamiento) la cerveza es filtrada con tierra diatomea y luego transportadas a tanques para su carbonatación. El producto final puede ser envasado en barriles, botellas o latas.

Figura 1 *Diagrama de flujo de proceso de producción de cerveza*



Nota. Adaptado de dos Santos Mathias et al. (2014), y Umego y Barry-Ryan (2023)

En todo el proceso de producción se producen principalmente cuatro residuos con potencial reaprovechable: granos gastados (14-20 kg/hl de cerveza producida), turbia caliente (0.2-1.4 kg/hl), lodo de levadura gastada (1-3 kg/hl), y tierra diatomea (~1.7 kg/hl). Sumado a esto, también se emiten gases de efecto invernadero como CO_2 (3 kg/hl, en la fermentación), N_2O (de la combustión interna de motores), SO_2 (durante el horneado de la malta); además de la emisión de olores, ruido, aguas residuales, residuos peligrosos, y residuos sólidos no reciclables (Olajire, 2020) . En términos de demanda química de oxígeno (DQO), de los residuos generados, el lodo de levadura gastada es el más contaminante. Los granos gastados presentan en promedio 24 g/L de DQO, la turbia 165 g/L, el lodo de levadura gastada 210 g/L, la tierra diatomea 16.5 g/L, mientras que las aguas residuales 11-20 g/L (Devolli, Shahinasi, Stafassani, Feta, & Dara, 2018).

3.2.2 Lodo de levadura gastada

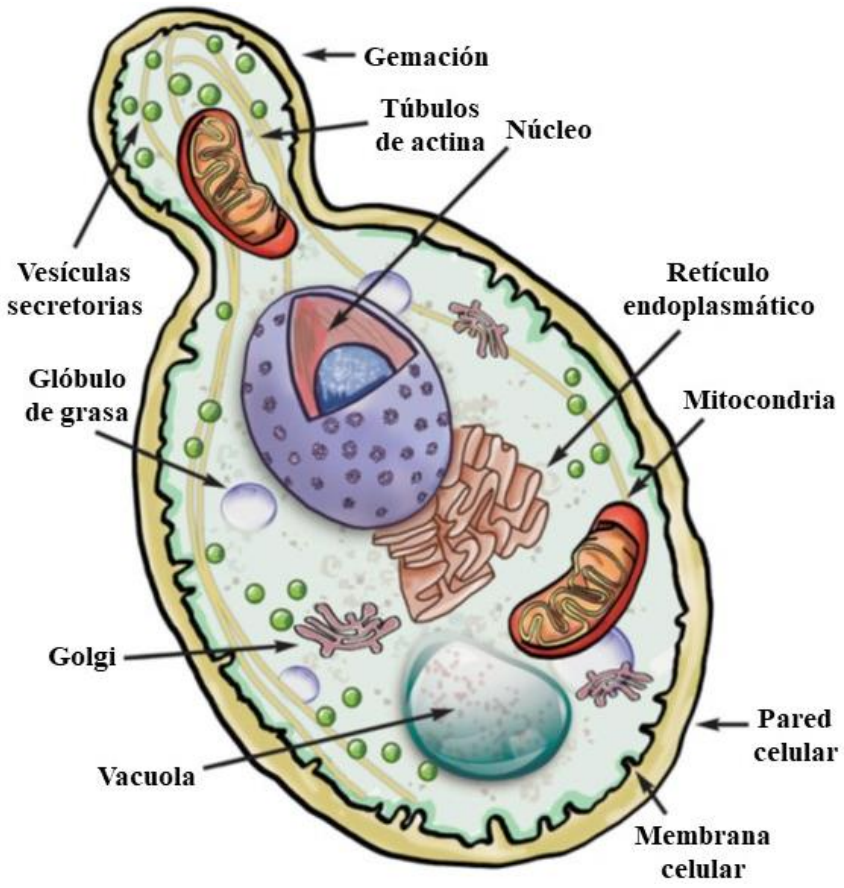
El lodo de levadura gastada (o también conocida como levadura residual o levadura excedente) es el subproducto de la fermentación del mosto y maduración en cervecerías, y representa hasta el 15% del total de subproductos generados (Umego & Barry Ryan, 2023). Está compuesta por cerveza residual (representando una humedad de 74-90% (San Martin et al., 2021; Umego & Barry-Ryan, 2023)) y una o ambas cepas gastadas de *Saccharomyces cerevisiae* y Saccharomyces pastorianus/*carlsbergensis*, la primera cepa se utiliza para producir cerveza estilo ale (16-25 °C) y cualquiera de las segundas para cerveza estilo lager (8-15 °C) (Puligundla et al., 2020). La Figura 2 esquematiza las principales características de la célula típica de levadura. Se les denomina gastada debido a que la masa celular generada es reutilizada (entre 3 a 10 veces) para la inoculación de nuevos tanques de fermentación (Dos Santos Mathias, Moretzsohn de Mello, & Camporese Sérvulo, 2014).

Se reporto que este residuo contiene alrededor de 40% de proteína cruda, 59% de carbohidratos totales y 1% de lípidos, además de minerales, vitaminas y complejo B (Umego

& Barry Ryan, 2023). Sin embargo, su alto contenido de humedad causa un deterioro microbiano que limita su vida útil a 48 h sin refrigeración (San Martin, y otros, 2021), por lo cual debería de ser aprovechado en ese lapso de tiempo si se desea valorizar.

Figura 2

Principales características de la célula típica de levadura (eucariota)



Nota. Adaptado de Stewart (2017).

Debido a su alto contenido de DQO este residuo no puede eliminarse en corrientes de aguas residuales sin tratamiento previo, ya que tendría un impacto negativo grave en el medio ambiente resultando en erosión hídrica y lixiviación de nitratos, otro inconveniente de este residuo es el alto contenido de ácidos nucleicos los cuales provocan la disminución de la digestibilidad de animales monogástricos como el cerdo (Aigboje, 2022).

3.2.2.1 Concentración de parámetros microbiológicos en lodo de levadura gastada

La evaluación de coliformes totales y *Escherichia coli* es un criterio importante para determinar la inocuidad de fertilizantes orgánicos elaborados a partir de residuos con potencial contaminación fecal, como estiércoles, excretas animales o lodos residuales (Feria et al., 2020; Gianoli et al., 2019). Sin embargo, el lodo de levadura gastada proveniente de la industria cervecera se genera en procesos industriales controlados y no constituye una fuente habitual de contaminación fecal.

Asimismo, investigaciones desarrolladas con levadura residual de cervecería han reportado bajas concentraciones o ausencia de microorganismos indicadores de contaminación fecal cuando no se incorporan residuos de origen pecuario durante la elaboración del biol (Leiva Trujillo, 2018; Sifuentes, 2023).

En concordancia con ello, la caracterización microbiológica preliminar del lodo de levadura gastada empleado en la presente investigación evidenció bajas concentraciones de coliformes totales y ausencia de *Escherichia coli*, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Resultados de análisis de coliformes totales y Escherichia coli

Parámetros	Unidad	M1	M2	M3
Coliformes Totales	NMP/100 mL	400	200	0
Escherichia coli	UFC/100 mL	0	0	0

Nota. Adaptado de informe de ensayo N° LQ 0071-26 Analisis fisicoquimico y microbiologico de biol.
Donde:
M1: Lodo de Levadura
M2: Lodo de Levadura Decantada
M3: Lodo de Levadura Sobrenadante

Estos antecedentes sugieren que el lodo de levadura gastada presenta un bajo riesgo microbiológico en comparación con otros residuos orgánicos empleados para la elaboración de fertilizantes líquidos.

3.2.2.2 Valorización del lodo de levadura gastada

No obstante, por las propiedades fisicoquímicas que contiene este material de descarte (lodo de levadura gastada) varios investigadores ya han venido desarrollando alternativas de valorización, para su inserción en la cadena productiva circular.

Según lo describe Jaeger et al. (2020) , en la actualidad el reúso de lodo de levadura gastada tiene potencial como: alimento para animales (previa autolización y deshidratación), fuente de enzimas (como proteasas, proteinasa, pectinasas, para el cultivo de bacterias acidolácticas), aditivo funcional de alimentos (atreves de la extracción de β-glucanos), sustrato de fermentación (por su alto contenido de nitrógeno), fuente para producción de metano (por fermentación anaerobia de su materia orgánica), agente de biosEM4orción (remoción de contaminantes tóxicos de aguas contaminadas), suplemento de fermentación de etanol (por su contenido de nitrógeno y minerales esenciales ayudan al crecimiento de levaduras fermentables).

Por otro lado, también se ha venido evaluando su potencial uso (en crudo) como biofertilizante para la agricultura, en remplazo de fertilizantes químicos (Lonhienne, y otros, 2014). Para esto se realiza un cultivo previo de la cepa de levadura gastada (en dextrosa peptona), seguido por múltiples lavados para remover excesos de ácidos iso-α del lúpulo y alcohol adherido. Sin embargo, su uso en crudo deviene dificultoso desde que el material de descarte en mención no es estable, generando malos olores y descomposición si este no es almacenado al frio, además de que su uso debe ser mesurado para evitar un impacto ambiental negativo.

Para todos los casos mencionados su valorización implica un tratamiento previo (desde simples como una inoculación y lavado hasta complejos como autolizado y deshidratación) antes de su uso. Por tal motivo un análisis tecno-económico es fundamental para la elección de la mejor vía de valorización.

3.2.3 Agricultura regenerativa

La población mundial viene aumentando en razón del 1%/año, y se estima llegar de 7.95 B del 2022 a 9.7 B en el 2050 y 11 B en el 2100 (Lal, Negassa , & Lorenz, 2015). Esto es preocupante en términos de huella ecológica y aseguramiento de la seguridad alimentaria, pues se impondría un incremento sustancial de la producción de alimentos a fin de satisfacer la demanda. En la actualidad, el sistema alimentario global libera alrededor del 25% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI), causando alrededor del tercio de la acidificación terrestre y de la mayoría de la eutrofización de aguas superficiales (Schreefel, Schulte, De Boer, Schrijver, & Van Zanten). Mientras tanto, la agricultura representa cerca del 12% de las emisiones antropogénicas globales de GEI y se estima que es el responsable del 70% de las emisiones de amoniaco (NH_3) causadas principalmente por la aplicación de fertilizantes inorgánicos (minerales) (Chataut, Bhatta, Joshi , Subedi , & Kafle, 2023) .A medida que aumenta la producción de cultivos, debido al incremento poblacional, también aumenta la aplicación de fertilizantes; esto se evidencio con el incremento (reportado) del 200-300% del uso de fertilizantes inorgánicos en el periodo de 1970-2010 (Walling & Vaneeckhaute, 2020). Los fertilizantes inorgánicos (en su gran mayoría sintéticos) decrecen el pH y la humedad del suelo, aumentando las concentraciones acumuladas de $NH4^+$; su uso excesivo causa la degradación del suelo y un declive en su estructura (Ozlu, Arriaga , Bilen, Gozukara, & Babur, 2022).

Una estrategia para la reducción de estos impactos significativos al medio ambiente es la transición hacia una agricultura regenerativa. En la actualidad existen muchas definiciones de agricultura regenerativa debido a que esta presenta diversas dimensiones. Sin embargo, Newton et al. (2020) definen, de manera más genérica, a la agricultura regenerativa como un medio alternativo de producción de alimentos que puede tener bajos (o incluso netos) impactos ambientales y/o sociales. Dentro de las prácticas agrícolas

regenerativas se identificaron el uso de enmienda orgánica (como el compost, estiércol animal, mulch, biocarbón, y residuos de sistemas alimentarios) y procesos de gestión del terreno (gestión e integración ganadera, diversidad de cultivos, reducción de la labranza, y el enfoque integral) (Voisin , y otros, 2024). El empleo de estas prácticas regenerativas conlleva a beneficios como: el incremento de carbono en el suelo, mejora de las funciones microbianas y ciclos de nutrientes asociados, mejora del contenido de humedad en el suelo, mejora de la resistencia a las plagas y enfermedades, obtención de alimentos ricos en nutrientes, y reducción de emisiones de GEI (Khangura, Ferris, Wagg, & Bowyer, 2023).

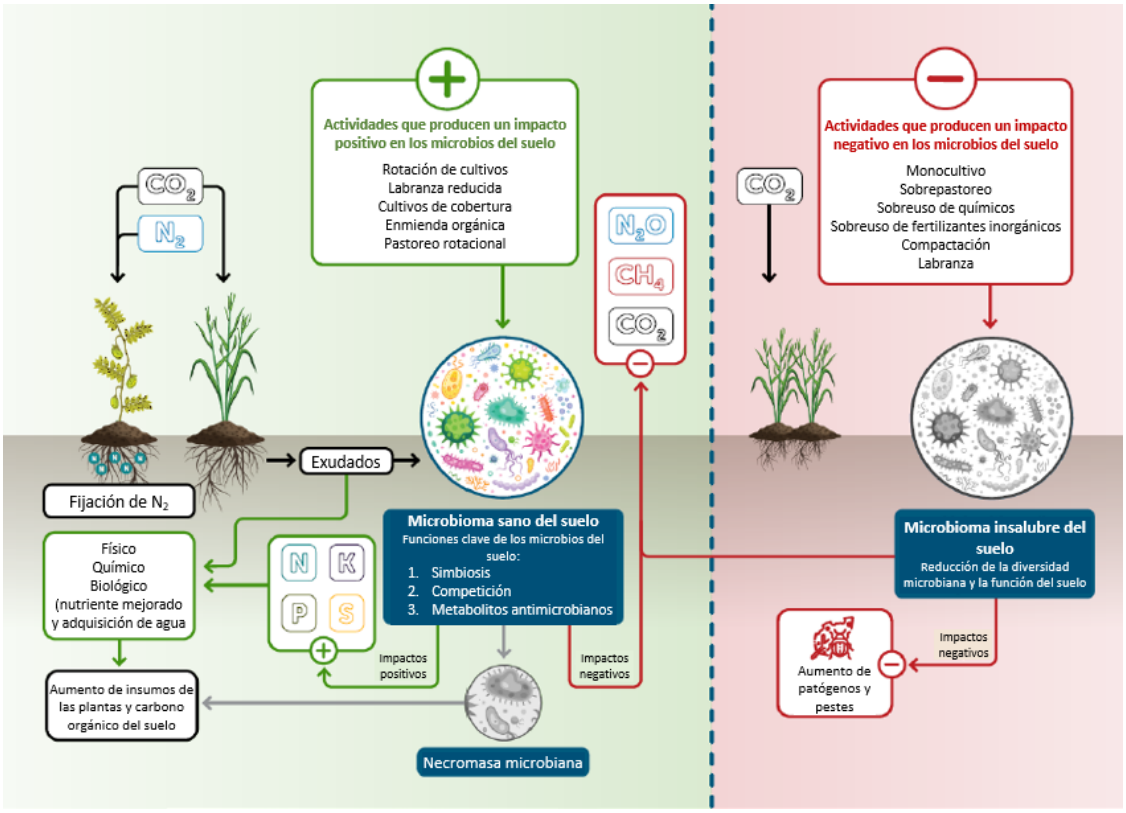
Tras la aplicación de estas prácticas se viene evidenciando un incremento en los niveles de carbono orgánico del suelo, en el rango de 0.9-3 MgC/ha/año; siendo el pastoreo controlado el que genera mayor secuestro de carbono en el suelo (3 MgC/ha/año), seguido de la rotación de cultivos (1.46 MgC/ha/año) y el uso de enmienda orgánica (0.97 MgC/ha/año). (Rehberger, West , Spillane , & McKeown, 2023). También señalan que la aplicación de enmienda orgánica incrementa el contenido de carbono orgánico en el suelo en un 5.6 MgC/ha comparado con el uso de fertilizantes químicos y en un 9.4 MgC/ha comparado con la no aplicación de productos. Esto es beneficioso para el suelo, de hecho, la interacción de cuatro vías (planta – microbio – prácticas de gestión – medioambiente) son los principales impulsores del secuestro de carbono y la mejora de la salud del suelo y la resiliencia de un bioma agrícola (ver Figura 3).

En síntesis, el secuestro de carbono orgánico en el suelo se refiere al proceso de transferencia de CO_2 de la atmosfera al suelo de una unidad terrestre a través de unidades vegetales, residuos vegetales y otros solidos orgánicos, que se almacenan y retienen en la unidad como parte de la materia orgánica del suelo (Lal, Negassa , & Lorenz, 2015). El aumento de concentraciones de CO_2 en el suelo conducen al incremento de iones H^+, mejorando el intercambio catiónico y las tasas de meteorización química, produciendo

nutrientes derivados de minerales esenciales para el crecimiento de las plantas y desarrollo del suelo (Lockhart, Keller, Evans , Carpenter Boggs, & Huggins, 2023).

Figura 3

Interacción de cuatro vías que afectan el carbono orgánico y la salud del suelo con y sin prácticas agrícolas regenerativas



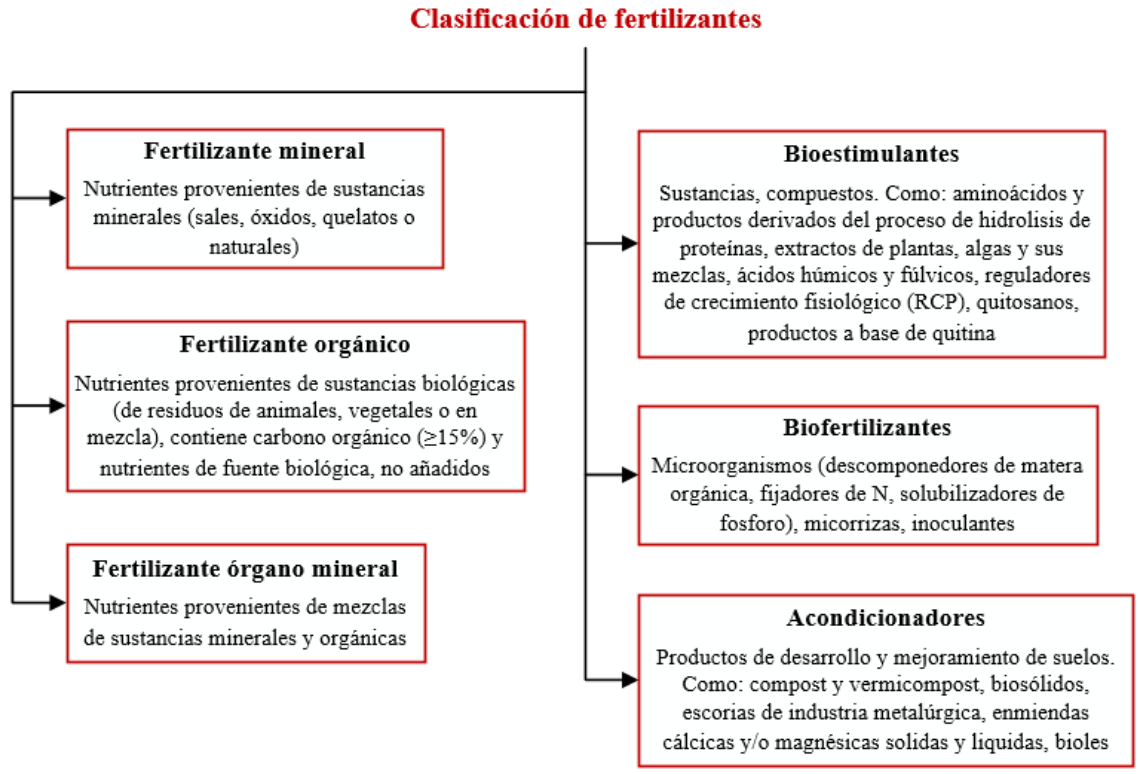
Nota. Adaptado de Khangura et al. (2023)

3.2.4 Fertilizantes

Los fertilizantes son compuestos o mezclas entregados como sólido, líquidos o gases, que suministran nutrientes esenciales a los cultivos en forma soluble que son convenientes y seguras de manejar, estos pueden aplicarse al suelo o directamente al follaje (Angus, 2012). El año 2023 el estado peruano aprobó por decreto supremo el reglamento de fertilizantes y sustancias afines (MIDAGRI, 2023), en el cual se clasifican y describen los tipos de fertilizantes que se vienen empleando en el territorio peruano. Según la Figura 4 estos se clasifican en: fertilizantes minerales, fertilizantes orgánicos, fertilizantes órgano-minerales, bioestimulantes, biofertilizantes y acondicionadores.

Figura 4

Clasificación de fertilizantes en el ámbito peruano



Nota. Adaptado de MIDAGRI (2023)

Independientemente de su origen, es sabido que los fertilizantes, en general, generan un impacto ambiental representado por la huella de carbono, tanto por su producción, transporte, almacenaje y utilización en suelos. Por ejemplo, respecto a los fertilizantes minerales, la producción de 1 kg de urea (46% de N) genera entre 0.89-2.51 $kgCO_2e$ y la de 1 kg de nitrato de amonio (33.5% de N) entre 1.18-3.47 $kgCO_2e$, mientras que su aplicación en suelo entre 0.09-38.44 $kgCO_2e/kgN$ (Brentrup, Hoxha , & Christensen, 2016) (Walling & Vaneeckhaute, 2020). Referente a la enmienda orgánica, la producción de compost pude generar entre 0.045-0.4 $kgCO_2e/kgResiduo$, la de estiércol animal entre 25-3200 $kgCO_2e$/cabeza/año (debido a la fermentación entérica), y la de digestato (biol y/o biosol) en el rango de 0.025-0.23 $kgCO_2e/kgResiduo$; mientras que su aplicación en suelos de 0.33-5.6 $kgCO_2e/kgN$, 0.6-16.27 $kgCO_2e/kgN$, y 0.72-17.6 $kgCO_2e/kgN$ respectivamente (Walling & Vaneeckhaute, 2020). Es indiscutible que la producción y aplicación de

fertilizantes minerales generan la mayor huella de carbono. Entre las enmiendas orgánicas la generación de estiércol animal tiene más impacto seguido del compost y la del digestato; en términos de aplicación, el compost genera menos impacto y tanto el estiércol animal como el digestato presentan valores similares. Si bien el estiércol animal (fertilizante orgánico) es un material aplicado dentro de las prácticas agrícolas regenerativas, su uso excesivo ha venido generando aproximadamente más del 80% de la emisión global de óxido de nitrógeno (N_2O), además de que el proceso de compostaje también emite GEI (NH_3 y CO_2) vía volatilización (Chataut, Bhatta, Joshi , Subedi , & Kafle, 2023). Esto conlleva a la creación de políticas para una mejor administración de enmiendas orgánicas y a la búsqueda de materiales alternativos más ecoamigables. El uso de bioles (acondicionadores) representaría una buena alternativa considerando que en su proceso de producción se capta y aprovecha fácilmente el biogás generado como fuente de combustión (generando valores negativos de emisiones, en este caso de –0.025 a –0.23 $kgCO_2e/kgResiduo$), contrario al proceso de compostaje y fermentación entérica del estiércol animal, cuyos gases emitidos son difícilmente captables y aprovechables.

3.2.4.1 Bioles

El biol (o digestato liquido) es el producto líquido que ha sido saneado y estabilizado por un proceso de tratamiento biológico denominado digestión anaerobia (Saveyn & Eder, 2014). Este es un producto que puede ser usado en nutrición vegetal, alimentación animal, obtención de agua de riego, bio-plaguicida, pretratamiento de semillas, sal de fosfato y síntesis de carbono (Baştabak & Koçar , 2020). Según el MIDAGRI (2023), técnicamente, los bioles son acondicionadores de suelos. Lo que hace que el biol sea un producto interesante son sus excelentes cualidades nutricionales basado en un rico contenido de macronutrientes vegetales (N, P, K y S), varios micronutrientes y también materia orgánica (Drosg , Fuchs, Al Seadi, Madsen, & Linke, 2015). Estos acondicionadores líquidos son

producidos a partir de diversas materias primas, la Tabla 3 resume la composición fisicoquímica/nutricional de varios bioles, derivados de diversas fuentes, desarrollados y/o ofertados en Perú.

Por lo apreciado en la Tabla 3, los bioles desarrollados en el mercado local varían en el rango de pH de 4-7.78, y en el rango de conductividad eléctrica de 9.95-82.5 dS/m, siendo el desarrollado a partir de levadura residual el de menor valor, en ambos casos. Así también, se aprecia que el biol desarrollado a partir de residuos de especies marinas presenta los mayores valores de N, P y K, mientras que el desarrollado a partir de estiércol de vaca y vísceras de pescado los valores más bajos. La variación de valores de los diversos productos está influenciada por el tipo de fuente de materia prima, así como de las condiciones operacionales de la digestión anaerobia.

Tabla 3

Comparación de atributos fisicoquímicos/nutricionales de diversos bioles desarrollados y/o ofertados en Perú

Producto	Alli Allpa	Fosac	Mallki	Aminovigor premium	Fertibiol	S/N
Materia prima principal	Estiércol de vaca, vísceras de pescado	Residuos ruminales ganaderos	Guano avícola	Residuo de especies marinas	Purín de caballo	Levadura residual de cervecería
pH	7.66	4.5 - 5.5	4.3 - 4.6	4.22	7.78	4.01
Conductividad eléctrica (dS/m)	22.81	78.5 - 82.5	19.0 - 23.0	--	28.23	9.95
Materia orgánica (%)	0.31	--	3.0 - 4.5	27.77	--	14.48
N (ppm)	241.69	4200-4300	600-700	21360	13000	11200
P (ppm)	6.67	430-470	90-100	2000	296.5	1914.81
K (ppm)	2494.16	4440-4500	4000-6000	10200	5642	4075
C (%)	0.18	--	--	--	--	--
C/N		--	3.2-3.9	--	--	--
Referencia	Alli Allpa (2024)	FOSAC (2024)	Mallki (2024)	Ecocampo (2024)	All Garden (2024)	(Sifuentes Estrada, 2023)

3.2.5 Digestión anaerobia

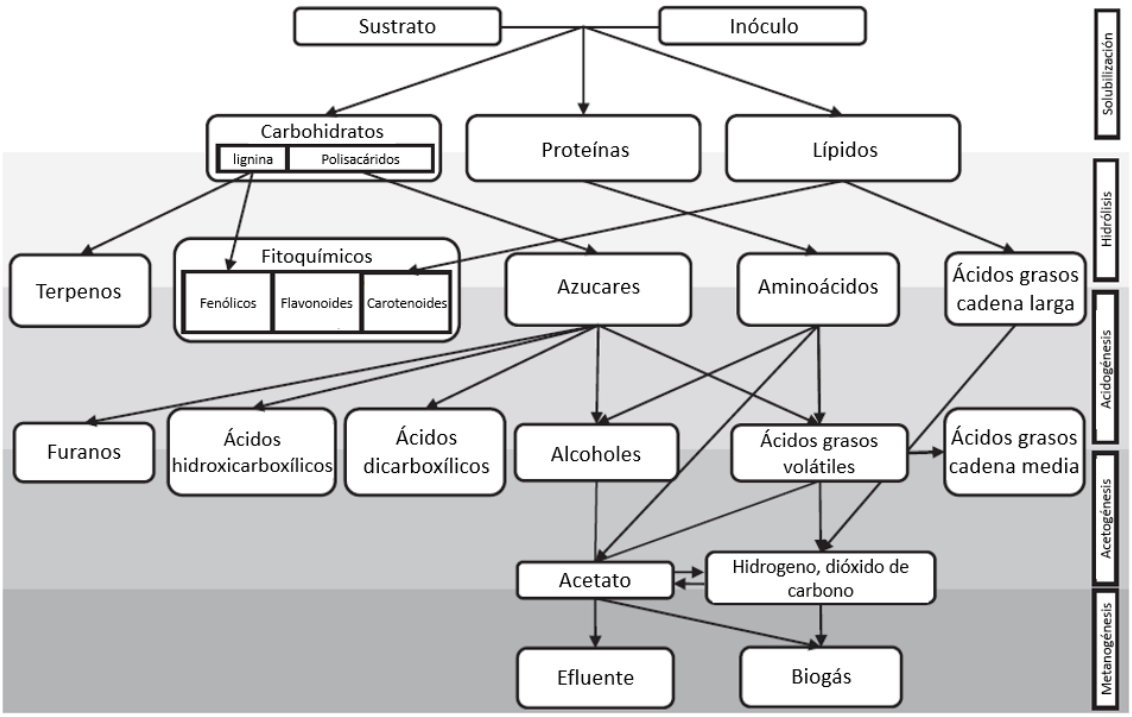
El proceso de digestión anaerobia o anaeróbica (DA) es en el cual el material orgánico es digestado mediante reacciones bioquímicas por bacterias anaeróbicas bajo condiciones libres de oxígeno (Atelge, y otros, 2020). Durante la DA alrededor del 20-90% de la materia orgánica es degradada, dependiendo de la materia prima (Möller & Müller, 2012). Como consecuencia de este proceso, se producen biogás y digestato (o efluente) que son fuentes de bioenergía y biorecurso respectivamente (Liu, Wei, & Leng , 2021). El biogás está compuesto principalmente por tres componentes, metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2); sin embargo, también están presentes otras especies en forma de trazas como el sulfuro de hidrogeno (H_2S), hidrogeno (H_2), amoniaco (NH_3), oxigeno (O_2) y monóxido de carbono (CO) (Ullah Khan, y otros, 2017). El digestato se compone de dos fases, sólida y liquida, y es generalmente alto en nutrientes valiosos como el nitrógeno, fosforo y potasio (N, P, K), los cuales son considerados esenciales para el crecimiento de las plantas (Gonde et al., 2023). El digestato liquido contiene <15% de materia seca, mientras que el digestato solido >15% de materia seca (Marianna , Attila, & Viktória , 2012).

Según Hunter et al. (2021) el proceso de DA está compuesto por cinco etapas: solubilización, hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis, y metanogénesis. La Figura 5 esquematiza el resumen de los productos intermedios formados durante el proceso de DA. En la solubilización el sustrato y el inoculo se disuelven, generalmente a condiciones normales. En la etapa de hidrolisis microorganismos hidrolíticos degradan compuestos de alto peso molecular (como polisacáridos, proteínas y lípidos) en sustancias orgánicas más simples y solubles (monómeros) (Kunz, Steinmetz, & Do Amaral, 2022). La etapa de acidogénesis también es conocida como etapa de fermentación, y es en la cual los productos de la etapa hidrolítica son degradados aún más, por bacterias acidogénicas, a ácidos grasos volátiles, ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, hidrogeno y dióxido de carbono

(Yusuf Abdulkarim, Abdulsalam, El Nafaty, & Muhammad, 2019). En la acetogénesis se transforma la mayoría de productos de la acidogénesis en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono (Van, Fujiwara, Leu Tho, Song Toan, & Hoang Minh, 2020). En la última etapa de la DA (metanogénesis) se consumen el ácido acético, hidrogeno, u otros sustratos disponibles como el formato, metanol, metilamina y monóxido de carbono para la producción de metano (Yusuf Abdulkarim, Abdulsalam, El Nafaty, & Muhammad, 2019). En la etapa de metanogénesis se identificaron dos mecanismos de generación de metano, la primera denominada metanogénesis acetoclastica y la segunda metanogénesis hidrogenotrófica (Van, Fujiwara, Leu Tho, Song Toan, & Hoang Minh, 2020). En el primer mecanismo se convierte el ácido acético a metano y dióxido de carbono, mientras que en el segundo se emplea dióxido de carbono e hidrogeno para la obtención de metano más agua.

Figura 5

Mapa de proceso de intermedios durante la DA



Nota. Adaptado de Hunter et al. (2021).

Pramanik et al. (2019), identificaron las principales bacterias que degradan los diversos productos envueltos en cada etapa de la DA. Por ejemplo, en el grupo de bacterias fermentativas (en la etapa de hidrolisis) se identificaron principalmente a los *Clostridium*, *Bacteroides*, *Acetivibrio*, *Vibrio*, *Bacillus*, *Proteus*, *Peptococcus*, *Micrococcus*, y *Staphylococcus*. En el grupo de bacterias acidogénicas (en la etapa de acidogénesis) a los *Clostridium*, *Eubacterium limosum*, *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Escherichia*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Sarcina*, *Veillonella*, *Desulfovibrio*, *Desulfuromonas*, *Desulfobacter*, y *Selenomonas*. En el grupo de bacterias acetogénicas (en la etapa acetogénica) a los *Clostridium*, *Syntrophobacter*, y *Syntrophomonas*. Mientras que en el grupo de arqueas metanogénicas (en la etapa metanogénica) a los géneros *Methanosarcina*, *Methanospirillum*, *Methanosaeta*, *Methanobacterium*, *Methanocalculus*, *Methanobrevibacter*, Methanoplanus, *Methanoregula*, *Methanococcus*, y *Methanoculleus*.

Los pH de operación normalmente usados para cada una de las etapas son 5.5-6 para la hidrolisis, 6-7 para la acidogénesis, 6-7 para la acetogénesis, y 6.5-7.5 para la metanogénesis (Pramanik, Suja, Zain , & Pramanik , 2019). Sin embargo, hay diversos factores que intervienen en el pH de la DA. Por ejemplo, el incremento del pH es debido a la formación de carbonato de amonio y remoción de CO_2, así también como por la mayor concentración de cationes básicos (como Ca^{2+}, K^{+}); simultáneamente la precipitación de carbonatos, la precipitación de Fe^{2+}-fosfatos, y la formación de estruvita (reacción entre Mg^{2+}, NH_4^{+}, y PO_4^{3-}) decrecen el pH (Möller & Müller, 2012). Además, se sabe también que la formación de ácidos grasos volátiles es fuertemente inhibida con un pH <4 (Van, Fujiwara, Leu Tho, Song Toan, & Hoang Minh, 2020). Por otro lado, el sistema de DA es operado en tres niveles de temperatura optimas: psicrofilica (<20 °C), mesofílica (20-43 °C, considerándose optimo entre 35-37 °C), y termofílica (50-60 °C, siendo optima a 55 °C) (Nie, y otros, 2021). Las condiciones mesofílicas y termofílicas son ampliamente usadas en

muchas escalas comerciales de sistemas DA orientados a mantener una máxima producción de metano (Admasu, Bogale, & Mekonnen, 2022) (Hunter, Blanco, & Borrion , 2021) (Nie, y otros, 2021) (Ullah Khan, y otros, 2017).

3.2.6 Consorcio microbiano EM-1

El consorcio microbiano EM-1 (Effective Microorganisms®) es un inoculante biológico comercial constituido por un conjunto de microorganismos benéficos que actúan de forma sinérgica durante los procesos de fermentación y transformación de la materia orgánica. De acuerdo con la información técnica del fabricante, el producto está conformado principalmente por bacterias ácido-lácticas (*Lactobacillus spp*.), levaduras (*Saccharomyces spp*.) y bacterias fotosintéticas (*Rhodopseudomonas spp.*), microorganismos que participan en la fermentación de compuestos orgánicos, la producción de metabolitos y la estabilización biológica del sustrato (BIOEM, 2025). Asimismo, Higa y Parr (1994) señalan que la interacción entre estos grupos microbianos favorece la degradación de la materia orgánica, reduce la proliferación de microorganismos indeseables y promueve la formación de compuestos de interés agronómico durante los procesos fermentativos.

En la presente investigación, el EM-1 (anexo 7) fue empleado como inoculante para favorecer el desarrollo de la digestión anaerobia del lodo de levadura gastada. Para cada unidad experimental se preparó una mezcla constituida por 1080 mL de lodo de levadura gastada, correspondiente a los tratamientos X_1 (3 % de MS), X_2 (12 % de MS) y X_3 (22 % de MS), a la cual se adicionaron 60 mL de EM-1 previamente activado con 60 mL de melaza. Esta formulación se mantuvo constante en todas las unidades experimentales, por lo que el inoculante no constituyó una variable de estudio, sino una condición experimental controlada. En consecuencia, las diferencias observadas entre tratamientos fueron atribuidas exclusivamente al efecto de la concentración de materia seca del lodo de levadura gastada.

3.3 Definición de términos

a. **Sustrato:** Es la materia prima usada para la digestión anaerobia (entre otros procesos), generalmente biomasa, y es fuente energética para la actividad enzimática de microorganismos compuesta por vitaminas y oligoelementos (Adekunle & Okolie, 2015)

b. **Inóculo:** Es la fuente de microorganismos que inician el proceso de degradación del sustrato en la digestión anaerobia (Sicchieri, De Quadros, , Bortoloti, Fernandes , & Kuroda, 2022).

c. **Levaduras:** Son hongos unicelulares eucariotos (Figura 2), y son los microorganismos económicamente más importantes empleados en la obtención de diversos productos industriales como el etanol (potable e industrial), extracto de levadura, panes, proteínas y péptidos heterólogos; el género de levadura predominante empleada en la producción de alcohol de fermentación es la *Saccharomyces*, y se pueden emplear sustratos como almidones, celulosa, hemicelulosa, sacarosa, inulina, lactosa, entre otros (Stewart, Introduction. In Brewing and Distilling Yeasts (1 ed., pp. 1-9), 2017).

d. **Malteado:** Es la germinación de cebada u otros cereales (como trigo, sorgo) y el secado controlado del cereal germinado (para preservar su actividad enzimática) (Stewart, Introduction. In Brewing and Distilling Yeasts , 2017).

e. **Cerveza:** Es una bebida fermentada hecha de una fuente de almidón sin concentrar el alcohol, compuesta de aproximadamente 92.9% de agua, 3.9% de etanol, 2.5% de carbohidratos, 0.5% de dióxido de carbono, y 0.2% de proteína (Bart, 2013).

f. **Biosol:** Es el segundo efluente de salida del digestor (parte solida) y presenta una cantidad equilibrada de nutrientes, sus características dependerán del tipo de sustrato utilizado (Gil Ramírez, Leiva Cabrera, Lezama Escobedo, Bardales Vásquez, & León Torres, 2023).

g. **Valorización de residuos:** Esta centrado en el concepto de economía circular y se refiere a cualquier proceso industrial que envuelve el reusó, reciclado, o compostaje de residuos, productos útiles o fuentes de energía (Kanani, Heidari, Gilroyed, & Pelletier, 2020).

h. **Sistemas alimentarios:** Incluyen la gama de actividades (realizadas por una amplia gama de personas o actores) relacionadas con la producción, procesamiento, distribución, venta al por menor, preparación y consumo de alimentos (Zurek, y otros, 2022).

i. **Materia seca:** Se define como el peso perdido de las muestras cuando se secan al horno a temperaturas por encima de 100 °C por 12 a 24 horas (Al Arif, Lucia Tri, Estoepangestie, & Mirni, 2017).

j. **Materia orgánica:** Se define como el peso perdido de la materia seca cuando combustiona (materia seca menos contenido de cenizas) (Al Arif, Lucia Tri, Estoepangestie, & Mirni, 2017). Consiste en un amplio grupo de compuestos que contienen carbono en su estructura química (Zanki, y otros, 2020), como polisacáridos, amino azucares, proteínas, polihidroxi aromáticos, lípidos, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, entre otros (Dayarathne, Angove, Aryal, Abuel Naga , & Mainali, 2021) (Picó & Barceló, 2020).

k. **Relación C/N:** Relación entre el contenido de carbono y nitrógeno de una sustancia, indicando la disponibilidad de nitrógeno en determinada sustancia; cuando la materia orgánica presenta alto contenido de nitrógeno, los microorganismos del suelo tienen mayor mineralización (Pérez & Torres Bazurto, 2020).

l. **Demanda química de oxígeno:** Parámetro que indica la cantidad de oxígeno requerido para oxidar casi por completo todos los compuestos orgánicos a agua y dióxido de carbono (Muñoz , 2020).

m. **Coliformes:** Son agentes patógenos provenientes de la flora saprofita intestinal como *Salmonella*, *Echerichia*, *Vibro*, Shiguella, *Rotavirus*, *Hepatitis A*, *Giardia*, entre otros;

causantes de enfermedades gastrointestinales. (Feria, Álvarez, & Rodriguez, 2020) (Gianoli , Hung, , & Shiva, 2019) (Feria et al., 2020; Gianoli et al., 2019).

n. ***Escherichia coli*:** Es el coliforme más conocido para indicar la contaminación fecal porque se puede encontrar casi exclusivamente en heces humanas y animales; se ubica en el grupo de *Enterobacteriaceae* dentro de la familia de bacterias Gram-negativas y es conocido como el microorganismo más infeccioso (Nurliyana, y otros, 2018).

o. **Bacterias acido lácticas:** Son un grupo de bacterias gram-positiva (cocci o varillas) que no forman esporas capaces de convertir sustrato de carbohidratos en ácidos orgánicos (como ácido acético, ácido láctico, ácido cítrico, ácido succínico, ácido propiónico, etc.) y de producir una amplia gama de metabolitos (Punia Bangar, Suri , Trif, & Ozogul, 2022).

p. **Huella hídrica:** Es una medida del consumo y degradación del agua fresca, cuyo indicador total consta en tres más pequeños: huella hídrica verde (relacionada al agua natural), azul (referida a aguas subterráneas y superficiales) y gris (agua necesaria para asimilar los contaminantes producidos) (Karwacka et al., 2020).

q. **Huella de carbono:** Representa la cantidad total de dióxido de carbono equivalente y otros gases de efecto invernadero procedentes del ciclo de vida del producto, incluido su almacenamiento, uso y disposición (Karwacka, Ciurzyńska , Lenart, & Janowicz , 2020).

r. **Huella ecológica:** Es un enfoque de contabilidad de recursos que rastrea la demanda humana en los ecosistemas, o más precisamente en la biocapacidad del planeta. Permite determinar el tamaño de las economías, desde los hogares hasta las ciudades, los países o la humanidad en su conjunto, en comparación con el tamaño de los ecosistemas, una región o todo el planeta (Wackernagel & Lin).

IV Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

El presente trabajo de investigación es del tipo aplicativo, debido a que se buscó reducir el impacto que genera el transporte y disposición final de un lodo contaminante mediante su valorización para la obtención de un producto circular estable (biol) apto para la agricultura regenerativa.

Así también, presenta un nivel o alcance explicativo, debido a que se pretendió especificar las mejores características nutricionales, fisicoquímicas del biol obtenido.

4.2 Ámbito temporal y espacial

El presente trabajo de investigación tuvo lugar en el laboratorio de análisis de suelos, agua y aire de la Universidad Tecnológica de los Andes con sede en la ciudad de Cusco. Con una duración de 4 meses, iniciando en enero y terminando en mayo del 2026.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

La población estuvo compuesta por una cantidad finita de 15 lotes de lodo fresco de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco (con capacidad de ~8000 L cada uno), repartidos en 3 semanas (5 lotes/semana) y contenidas en tanques cisterna, dentro de las instalaciones de la empresa JMC GERENCIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C.

4.3.2 Muestra

En la presente investigación, el lodo de levadura gastada empleado como insumo fue proporcionado por la empresa JMC GERENCIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C., la cual autorizó su utilización exclusivamente con fines académicos y de investigación. La participación de la empresa se formalizó mediante una carta de consentimiento. Asimismo,

la información obtenida durante el desarrollo del estudio fue utilizada únicamente para los objetivos planteados, respetando en todo momento la confidencialidad de la información institucional y el uso responsable del insumo facilitado.

El cálculo de la muestra se efectuó mediante la Ecuación 2 (para poblaciones finitas), y estuvo constituida por un total de 383 L de lodo fresco de levadura gastada, repartida en 3 semanas.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad (1)$$

Donde:

n: tamaño de muestra a calcular.

N: tamaño de población (120000 L).

Z: parámetro estadístico que depende del nivel de confianza (1-α) (1.96 para un nivel de confianza de 95%).

e: error estimado máximo a aceptar (5%).

p: probabilidad o proporción estadística favorable para la variable de estudio (0.5 por defecto).

q: (1-p) probabilidad o proporción estadística desfavorable para la variable de estudio.

$$n = \frac{120000 \cdot 1.96^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{0.05^2 \cdot (120000 - 1) + 1.96^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5} = 383 \text{ L} \quad (2)$$

Para el muestreo se empleó el método probabilístico aleatorizado, y bajo el procedimiento y recomendaciones de toma de muestras liquidas del ANA (2016). Para fines prácticos a la investigación primero se procedió a la extracción de 128 L (383/3) de lodo fresco de levadura gastada de 3 lotes diferentes (cada una de distinta semana) seleccionados al azar. Luego, de cada muestra (correspondiente a un lote diferente) se tomaron 6 submuestras las cuales fueron distribuidas de forma aleatoria en cada unidad experimental del bloque respectivo. Se aseguró la homogenización de las muestras en todo momento.

4.4 Instrumentos

Para la presente investigación se emplearon dos técnicas principales de recolección de datos: los análisis de laboratorio y la observación directa mediante un equipo multiparámetro portátil. Los análisis de laboratorio, fueron realizados por laboratorios especializados que permitieron determinar las características nutricionales, fisicoquímicas y microbiológicas del lodo de levadura gastada, así como las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido por digestión anaerobia. En el caso de los análisis microbiológicos del biol, estos no fueron analizados por que la caracterización inicial del lodo de levadura gastada dio como resultado ausencia de *Escherichia coli* y bajas concentraciones de coliformes totales, indicando un bajo riesgo de proliferación microbiológica del biol obtenido. Por otra parte, la observación directa permitió el monitoreo semanal del pH y la conductividad eléctrica durante todo el proceso de digestión anaerobia, registrando la evolución de estos parámetros hasta la estabilización del biol.

Asimismo, para el desarrollo de la investigación se utilizó un prototipo de biodigestor anaeróbico con control térmico y de agitación, diseñado para la ejecución de los tratamientos experimentales bajo condiciones controladas de temperatura y agitación. Este equipo constituyó la unidad experimental donde se desarrolló el proceso de digestión anaerobia del lodo de levadura gastada como se muestra en la siguiente figura 6.

Figura 6

Prototipo de biodigestor anaeróbico con control térmico y de agitación



Nota. Identificación de las partes del prototipo de biodigestor.

Por otro lado, se empleó un equipo multiparámetro portátil (figura 7) para la medición periódica de pH y conductividad eléctrica durante el desarrollo de las pruebas experimentales. Este instrumento permitió realizar el seguimiento de la evolución fisicoquímica (pH y Conductividad Eléctrica) de las muestras a lo largo del proceso de digestión anaerobia.

Figura 7

Multiparámetro portátil

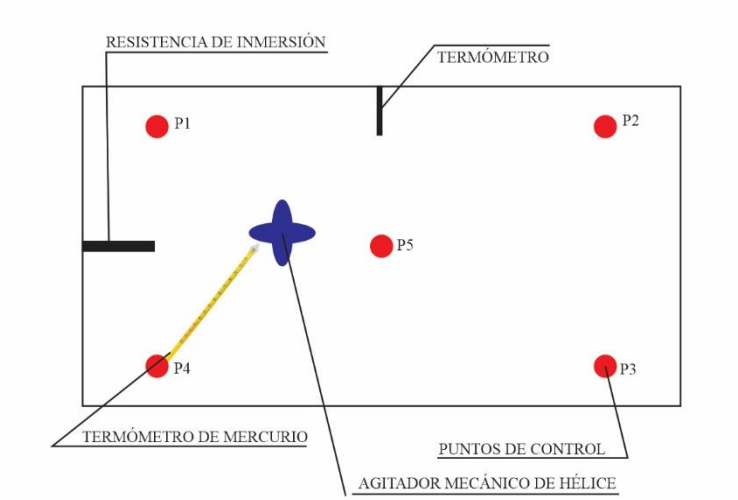


Nota. Medición de parámetros insitu con equipo multiparámetro portátil.

La validez de los datos analíticos estuvo respaldada por la aplicación de métodos normalizados de ensayo en el laboratorio responsable de los análisis. Asimismo, la confiabilidad de las mediciones realizadas durante la fase experimental fue garantizada mediante la calibración (certificado de calibración del multiparámetro) y uso adecuado de los equipos empleados, para el caso del Prototipo de biodigestor anaeróbico con control térmico y de agitación se utilizó un termómetro de mercurio como instrumento de verificación independiente para corroborar la uniformidad y precisión de la temperatura registrada por el prototipo de biodigestor anaeróbico. La validación térmica se efectuó mediante mediciones realizadas en cinco puntos estratégicamente distribuidos dentro del baño termostático: un punto central y cuatro puntos ubicados en las esquinas del equipo (Figura 8). Las mediciones fueron registradas durante cinco días consecutivos bajo condiciones normales de operación, permitiendo evaluar la homogeneidad espacial y estabilidad temporal de la temperatura de trabajo (Figura 9).

Figura 8

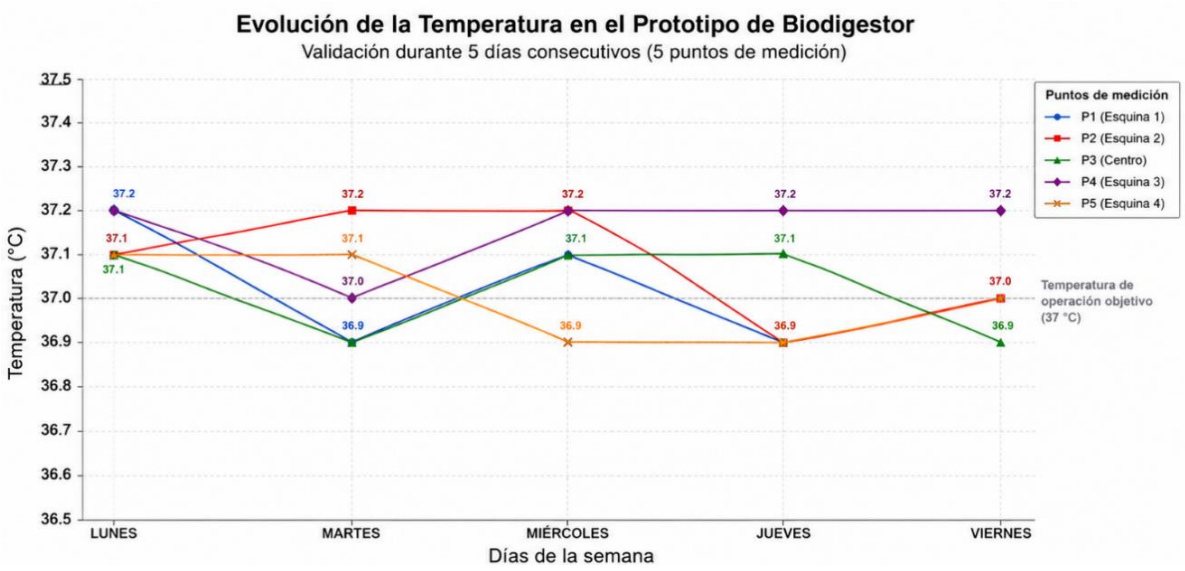
Verificación de temperatura del prototipo de biodigestor



Nota: Diagrama de medición de ubicación de los puntos de control de temperatura.

Figura 9

Gráfica de validación de temperatura



Nota: Gráfica de validación de temperatura durante una semana.

Esta verificación permitió confirmar que la temperatura indicada por el sistema de control del prototipo fue consistente con las mediciones directas realizadas mediante el termómetro de referencia. Durante los cinco días de evaluación, las temperaturas registradas en los cinco puntos de control oscilaron entre 36.9 °C y 37.2 °C, con una temperatura

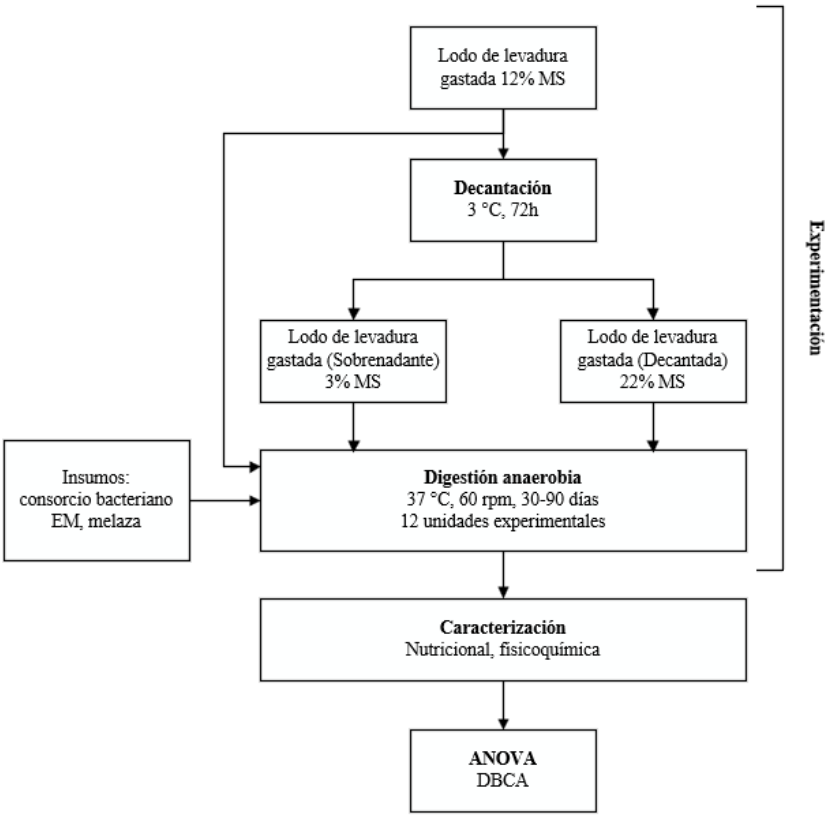
promedio de 37.06 °C y un error porcentual promedio de ±0.15 % respecto a la temperatura objetivo de 37 °C. Estos resultados evidencian una adecuada homogeneidad térmica y estabilidad operacional del equipo, validando el correcto funcionamiento del sistema de calentamiento y control de temperatura empleado durante la digestión anaerobia. Finalmente, los datos obtenidos fueron organizados y procesados mediante el software Python para su correspondiente análisis estadístico.

4.5 Procedimientos

Previo al análisis estadístico descriptivo e inferencial, el material en estudio pasó por las etapas de experimentación y caracterización, tal como se ilustra en la Figura 10.

Figura 10

Flujograma del procedimiento previo al análisis estadístico



Para determinar el contenido de materia seca (MS) de las muestras de lodo de levadura gastada, inicialmente se extrajeron submuestras representativas que fueron colocadas en crisoles previamente acondicionados y pesados. Posteriormente, cada crisol

con muestra fue pesado utilizando una balanza electrónica para obtener el peso inicial o peso fresco de las muestras X_1, X_2 y X_3 (Figura 11).

Seguidamente, los crisoles fueron introducidos en una estufa de secado a 105 °C durante 24 horas, con la finalidad de eliminar la humedad presente en las muestras. Transcurrido dicho periodo, las muestras fueron retiradas y pesadas nuevamente para obtener su peso seco, conforme al procedimiento descrito por Chollom et al. (2017).

Posteriormente se empleó la siguiente fórmula para determinar la materia seca de cada muestra:

$$\text{Materia seca} = \frac{\text{Muestra seca}}{\text{Muestra fresca}} \ (100) \qquad (3)$$

Como resultado, se determinó que las muestras presentaron contenidos de materia seca de 3 %, 12 % y 22 % para X_1, X_2 *y* X_3, respectivamente, valores que fueron utilizados para la formulación de los tratamientos experimentales.

Figura 11

Análisis de Materia Seca de cada tratamiento



Nota: Determinación de materia seca para cada tratamiento, se muestra los crisoles con muestra de lodo de levadura gastada en la estufa de secado.

4.5.1 Experimentación

Las muestras de lodo de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco fueron suministradas por la empresa JMC GERENCIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C. como se muestra en la Figura 12 mientras que los otros insumos utilizados para la digestión anaerobia fueron obtenidos por otros proveedores locales y nacionales.

Figura 12

Recolección de lodo de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco



Nota: Obtención de las muestras de levadura gastada de tanques suministrados en la empresa JMC GERENCIA Y CONSTRUCCIÓN S.A.C.

Para la ejecución de la digestión anaerobia se empleó un equipo volumétrico prototipo, construido con las características necesarias para la investigación, compuesto por un tanque de baño María, en cuyo interior se posicionaron 12 digestores mezcladores de vidrio de 1.5 L que se conectaron respectivamente (por mangueras) a 12 trampas de aire con contenido de agua como se muestra en la Figura 6.

La digestión anaerobia se llevó a cabo a condiciones termófilas manteniendo una temperatura constante de 37 °C (hasta el final de la digestión), presión atmosférica, y 60 rpm de agitación, según lo recomendado por (Hosseinzadeh , Gitipour, & Mehrdadi, 2024).

Antes de su mezclado con los insumos, aparte de utilizar el lodo de levadura gastada proveniente de tanques cisterna (12% MS), se prepararon otras dos muestras de levadura a

diferentes concentraciones de MS. Para esto, parte del lodo de levadura gastada del mismo lote se puso a decantar por 3 días a 3 °C, resultando en dos fases: el sobrenadante (con 3% MS), y el decantado (22% MS), determinando la MS con la misma metodología. Una vez obtenidas las tres muestras de lodo de levadura a diferentes concentraciones se procedió a mezclar los insumos (figura 13) según la dosificación mostrada en el apartado 4.5.1.1, llegando a un volumen total de 1.200 L para cada tratamiento. Luego, las mezclas fueron vertidas en cada digestor (unidad experimental), dejando un espacio vacío del 20% del volumen total del digestor. Seguido a ello se tapó cada digestor, y se llenaron las trampas de aire con agua destilada proporcionada por el Laboratorio de análisis de Suelos Agua y Aire, para asegurar las condiciones anaerobias, dando así inicio a la digestión.

Figura 13

Insumos utilizados para cada tratamiento



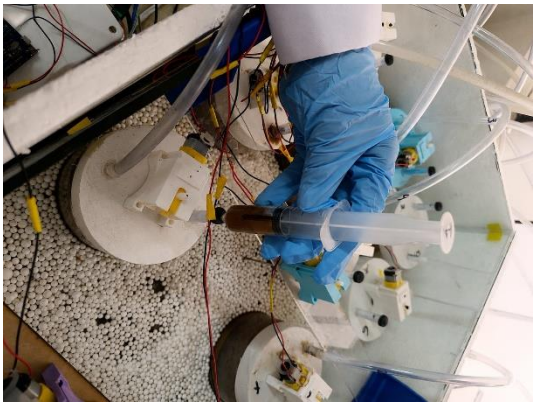
Nota: En la figura se observa los insumos utilizados para luego realizar la dosificación mostrada en el apartado 4.5.1.1.

Por último, se verifico la temperatura y la agitación constante durante todo el proceso de digestión anaerobia. Paralelamente, se evaluó el monitoreo semanal del pH y la conductividad eléctrica haciendo uso de un equipo multiparámetro portátil (extrayendo 10 mL de muestra), tal como se muestra en la Figura 14. El monitoreo semanal se realizó hasta la culminación natural del proceso de digestión anaerobia, que se dio a las 12 semanas, periodo en el que se observó la estabilización del pH a partir de la semana 10 y una

disminución gradual de la producción de biogás (determinada mediante el burbujeo en las trampas de aire). Finalmente, en la semana 12 se evidencio la estabilización de los valores del pH y la ausencia de la producción de biogás, criterios que indicaron la finalización del proceso de digestión anaerobia.

Figura 14

Monitoreo semanal con el equipo Multiparámetro portátil



Nota: Procedimiento para el monitoreo semanal de análisis de pH y Conductividad Eléctrica, se logra observar la forma que se obtuvieron los 10 mL, para su respectivo análisis de pH y conductividad eléctrica haciendo uso de un multiparámetro portátil.

El inicio de la digestión anaerobia se estableció mediante la aparición de burbujeo en las trampas de aire, considerándose este fenómeno como un indicador de la producción de biogás. La presencia o ausencia de burbujeo fue registrada durante las inspecciones realizadas hasta la finalización del proceso. El detalle de estas observaciones se presenta en el Anexo número 5 Ficha de observación directa de cada muestra.

Para cada tratamiento ($X_{1,}$ $X_{2\ y}$ X_3) el tiempo de digestión fue de 90 días. El burbujeo que se generó en las trampas de aire fue un indicador de que la digestión anaerobia aún está en curso. Para esto se reportó a diario en el Anexo número 3 las observaciones del caso. Finalizada las pruebas se procedió a dejar reposar las muestras por 1 día para la separación de sus fases (sólida y liquida), seguido se recuperaron las muestras liquidas (biol) y se caracterizaron para su posterior evaluación.

4.5.1.1 Diseño de investigación

La investigación presenta un tipo de diseño experimental puro (asignación al azar), con posprueba y grupos control, tal como se diagrama en la Figura 15.

Figura 15

Diagrama del diseño experimental puro empleado en este estudio

RG_1	X_1	0_1
RG_2	X_1	0_2
RG_3	X_1	0_3
RG_4	X_2	0_4
RG_5	X_2	0_5
RG_6	X_2	0_6
RG_7	X_3	0_7
RG_8	X_3	0_8
RG_9	X_3	0_9
RG_{10}	$—_1$	0_{10}
RG_{11}	$—_2$	0_{11}
RG_{12}	$—_3$	0_{12}

Del cual, R simboliza la aleatorización de las muestras G_i, mientras que X_i representa los tratamientos (porcentaje de materia seca) en cada muestra, $—_i$ la ausencia de estímulo, y 0_i la medición de parámetros pos-estímulo.

Este tipo de diseño representa más apropiadamente a un diseño de bloques completamente al azar (DBCA), con 3 bloques (lotes 1, 2 y 3) y 6 tratamientos o niveles ($—_1$, $—_2$, $—_3$ (controles), X_1, X_2 y X_3), haciendo un total de 12 unidades experimentales. La Ecuación 1 representa el modelo estadístico aditivo DBCA, mientras que la Figura 16 esquematiza el arreglo del tratamiento aplicado.

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} \quad i = 1,2,3,4;\ j = 1,2,3 \tag{4}$$

Donde:

Y_{ij}: variable respuesta, características del biol.

μ: media de la variable respuesta.

τ_i: efecto del tratamiento i, digestión anaerobia con distinta concentración de lodo de levadura gastada.

γ_j: efecto del bloque j, número de lote.

ε_{ij}: error experimental.

Figura 16

Esquema del orden de aplicación de tratamientos a diversas muestras de lodo de levadura de cerveza gastada basado en el DBCA

Bloque 1:	X_1RG_3	$—_1RG_{10}$	X_1RG_1	X_1RG_2
Bloque 2:	$—_2RG_{11}$	X_2RG_5	X_2RG_6	X_2RG_4
Bloque 3:	X_3RG_7	X_3RG_8	$—_3\ RG_{12}$	X_3RG_9

Donde:

X_1: digestión anaerobia de lodo de levadura gastada con 3% MS (1080 mL), consorcio bacteriano EM – 1 (compuesto por *Lactobacillus*, *Saccharomices* y *Rhodopseudomonas*) (60 mL), y melaza (60 mL). (LODO DE LEVADURA - SOBRENADANTE)

X_2: digestión anaerobia de lodo de levadura gastada con 12% MS (1080 mL), consorcio bacteriano EM – 1 (60 mL), y melaza (60 mL). (LODO DE LEVADURA)

X_3: digestión anaerobia de lodo de levadura gastada con 22% MS (1080 mL), consorcio bacteriano EM – 1 (60 mL), y melaza (60 mL). (LODO DE LEVADURA - DECANTADO)

$—_1$: lodo de levadura gastada con 3% MS. (LODO DE LEVADURA - SOBRENADANTE)

$—_2$: lodo de levadura gastada con 12% MS. (LODO DE LEVADURA)

$—_3$: lodo de levadura gastada con 22% MS. (LODO DE LEVADURA - DECANTADO)

4.5.2 Caracterización

Los análisis nutricionales y fisicoquímicos fueron realizados por laboratorios especializados, MC QUIMICALAB para análisis fisicoquímico (DQO); y VALLE GRANDE para análisis nutricionales (N, P_2O_5, K_2O, C_aO, M_gO, S, N_a, Cl, Cu, Zn, Mn, Fe, B, relación C/N, MO y C orgánico) y análisis fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, densidad, sólidos totales, cenizas disueltas, impurezas), mediante métodos normalizados de ensayo, cuyos resultados fueron consignados en los respectivos informes de ensayo como se reporta en el Anexo número 4. Complementariamente, durante la fase experimental se efectuó el monitoreo semanal de pH y conductividad eléctrica mediante mediciones directas realizadas con un equipo multiparámetro portátil. Los resultados obtenidos fueron registrados en fichas de control y observación para su posterior análisis.

Para el cálculo de las características nutricionales y fisicoquímicas se empleara las siguientes técnicas: electrométrico, gravimétrico, kjeldahl, colorimétrico, turbidímétrico, argentométrico, oxidación con dicromato, y espectrometría de absorción atómica por llama (APHA, 2005).

Para el caso de las características nutricionales y fisicoquímicas de las muestras control, se realizó por tipo de muestra recolectada (3% MS, 12% MS y 22% MS) en total 3 muestras control (de cada tipo) a analizar.

4.6 Análisis de datos

4.6.1 Análisis de varianza (ANOVA) del DBCA

La técnica estadística análisis de varianza (ANOVA) será usada para la determinación de la existencia o no de diferencias significativas en las varianzas de las medias de los tratamientos para el diseño aplicado DBCA (demostración de hipótesis general).

Debido a la ausencia de una normativa técnica peruana que estipule los parámetros fisicoquímicos y nutricionales del biol, la contrastación de la hipótesis general se realiza mediante un análisis comparativo frente a los rangos de parámetros de bioles comerciales disponibles (ver tabla 3) en el mercado al igual que la hipótesis especifica 3.

La Tabla 4 resume el conjunto de modelos utilizados en el ANOVA.

Tabla 4

Modelos estadísticos aplicados en el ANOVA

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Tratamientos	$\mathrm{SC_{trat}} = \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{n_i} x_{i.}^2 - \frac{x_{..}^2}{N}$	$k - 1$	$\mathrm{CM_{trat}} = \frac{\mathrm{SC_{trat}}}{k-1}$	$F = \frac{\mathrm{CM_{trat}}}{\mathrm{CM}_{error}}$
Bloques	$\mathrm{SC_{bloq}} = \sum_{j=1}^{r} \frac{1}{n_j} x_{.j}^2 - \frac{x_{..}^2}{N}$	$r - 1$	$\mathrm{CM_{bloq}} = \frac{\mathrm{SC_{bloq}}}{r-1}$	$F = \frac{\mathrm{CM}_{bloq}}{\mathrm{CM}_{error}}$
Error	$\mathrm{SC_{error}} = \mathrm{SC_{total}} - \mathrm{SC_{trat}} - \mathrm{SC_{bloq}}$	$(k-1)(r-1)$	$\mathrm{CM}_{error} = \frac{\mathrm{SC_{error}}}{(k-1)(r-1)}$	
Total	$\mathrm{SC_{total}} = \sum_{j=1}^{r} \sum_{i=1}^{k} x_{ij}^2 - \frac{x_{..}^2}{N}$	$N - 1$		

Donde:

SC: suma de cuadrados.

CM: cuadrado medio.

k: número de tratamientos

r: número de bloques.

F: valor F calculado. Si es mayor al F teórico, se rechaza la hipótesis nula.

n_i: número de elementos para cada tratamiento.

n_j: número de elementos para cada bloque.

N: número total de elementos de la muestra.

x_i: suma de elementos para cada tratamiento.

$x_{.j}$: suma de elementos para cada bloque.

$x_{.}$: suma de todos los elementos de la muestra.

Si se encuentra diferencia significativa entre los tratamientos, se procede por realizar la prueba de rangos múltiples mediante el método de Tukey para comparar las diferencias entre medias muestrales con el valor crítico.

4.7 Consideraciones éticas

La presente investigación se desarrolló respetando los principios de integridad científica, objetividad, transparencia y responsabilidad académica. Durante todas las etapas del estudio se garantizó la autenticidad de la información recopilada de acuerdo a lo necesitado, el registro adecuado de los datos experimentales y la presentación veraz de los resultados obtenidos, sin alteraciones, omisiones o manipulaciones que pudieran afectar la validez de las conclusiones.

Asimismo, se respetó la propiedad intelectual de los autores consultados mediante la citación y referenciación de las fuentes de información de acuerdo con las normas APA, séptima edición, evitando cualquier forma de plagio o uso indebido de información científica y técnica.

Por otra parte, el desarrollo experimental se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio tal cual se describe en el capítulo de metodología, aplicando procedimientos que garantizaron la seguridad en la manipulación del lodo de levadura gastada, los reactivos empleados y los equipos utilizados durante el proceso de digestión anaerobia. Los residuos generados durante los ensayos fueron manejados de manera responsable, minimizando posibles impactos ambientales. Finalmente, los resultados obtenidos fueron reportados de manera objetiva e imparcial, independientemente de si estos confirmaron o no las hipótesis planteadas, asegurando así la confiabilidad y reproducibilidad de la investigación.

V Resultados y discusión

5.1 Resultados semanales de Monitoreo de pH y Conductividad Eléctrica

La medición del pH y la conductividad eléctrica se realizó semanalmente durante las 12 semanas que duró el proceso de digestión anaerobia, con la finalidad de evaluar su evolución y comportamiento a lo largo del tiempo. Los resultados evidenciaron que el pH presentó variaciones más pronunciadas durante las primeras cinco semanas, alcanzando posteriormente una condición de relativa estabilidad hasta el final del ensayo (Figura 17). Por otro lado, la conductividad eléctrica mostró variaciones continuas durante todo el periodo de evaluación, observándose una tendencia general al incremento conforme avanzó el proceso de digestión anaerobia (Figura 18).

Los resultados de cada medición semanal se presentan de manera detallada en el Anexo número 5, los cuales constituyeron la base para la elaboración de las gráficas de evolución utilizadas en el análisis del comportamiento de ambos parámetros durante el proceso experimental.

Figura 17

Diagrama de variación de pH durante las 12 semanas

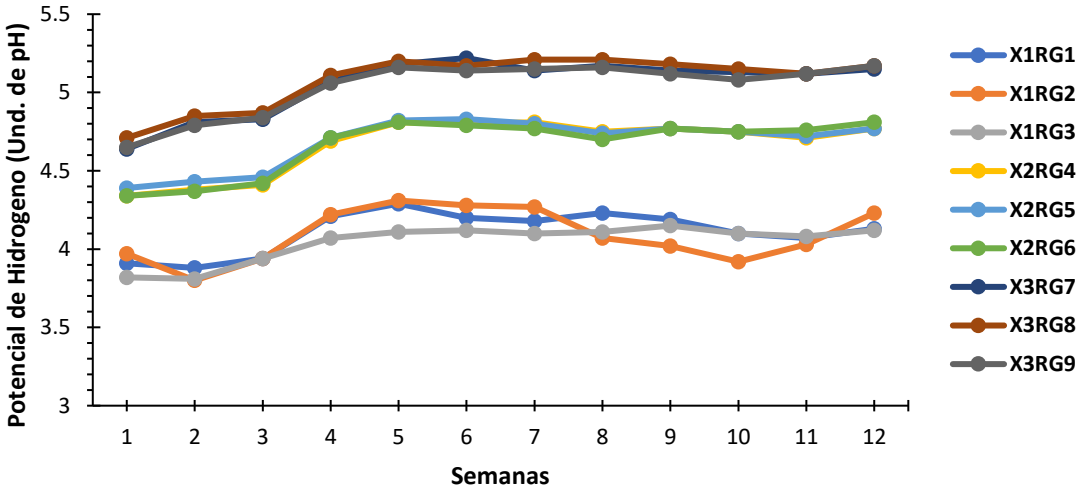
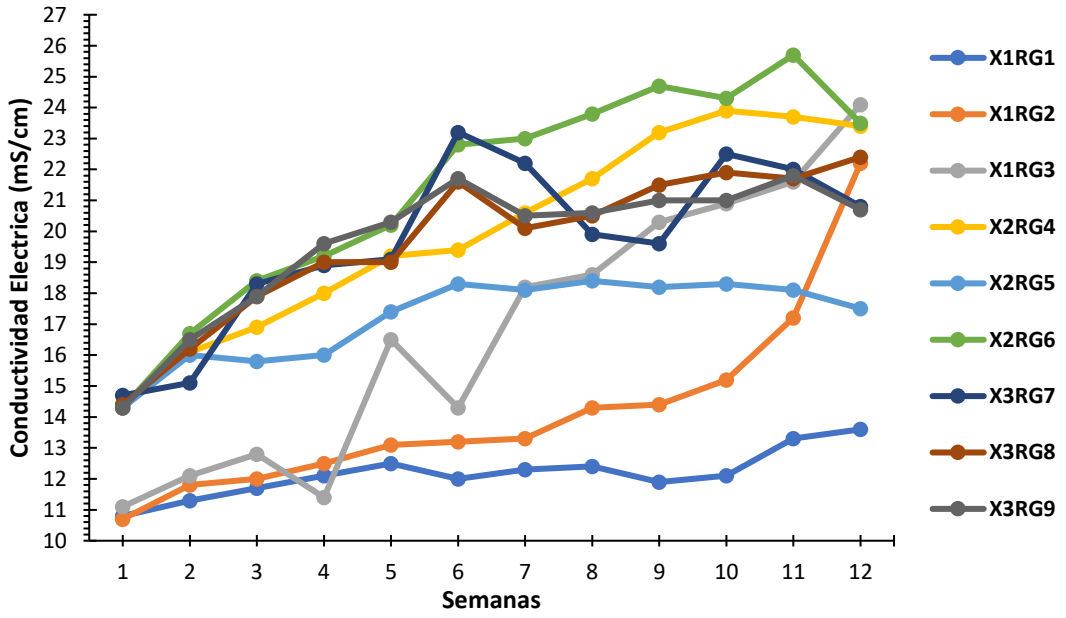


Figura 18

Diagrama de variación de Conductividad Eléctrica durante las 12 semanas



Nota. En las figuras 18 y 19, nos muestran la evolución semanal que tuvieron los valores de pH y Conductividad eléctrica, donde:

- X_1RG_1, X_1RG_2 y X_1RG_3, representan al bloque X_1 (3% MS)
- X_2RG_4, X_2RG_5 y X_2RG_6, representan al bloque X_2 (12% MS)
- X_3RG_7, X_3RG_8 y X_3RG_9, representan al bloque X_3 (22% MS)

5.2 Resultados Descriptivos e Inferenciales

Los resultados de los análisis nutricionales y fisicoquímicos de la obtención de biol por digestión anaerobia de cada tratamiento se presentan en el Anexo número 4, a partir de esos valores se proceden a presentar los siguientes resultados.

Previamente a la interpretación de los resultados del análisis de varianza de los tratamientos de digestión anaerobia (DA), es importante señalar que los coeficientes de variación (CV) obtenidos fueron inferiores al 10% en todos los parámetros evaluados. Esta baja variabilidad experimental se debe a la homogeneidad de los tratamientos experimentales (réplicas), las cuales fueron preparadas mediante una dosificación estandarizada de los insumos y sometidas a condiciones controladas de digestión anaerobia (temperatura de 37 °C, agitación constante de 60 rpm y volumen uniforme). Asimismo, el porcentaje de materia

seca constituyó el factor experimental evaluado, por lo que su efecto fue explicado por el tratamiento dentro del modelo estadístico y no por el error experimental. En conjunto, estas condiciones permitieron obtener una homogeneidad entre tratamientos.

5.2.1 Objetivo específico 1: Características nutricionales del biol

5.2.1.1 Nitrógeno total (N)

Tabla 5

Estadísticos descriptivos del nitrógeno total (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	4 850.00	226.00	4.7	4 288.54	5 411.46	d
X_2 (12% MS + DA)	9 200.00	432.00	4.7	8 126.77	10 273.23	c
X_3 (22% MS + DA)	14 800.00	694.00	4.7	13 075.87	16 524.13	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	3 200.00	149.00	4.7	2 829.83	3 570.17	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	5 800.00	272.00	4.7	5 124.26	6 475.74	e
—$_3$ **(22% MS + DA)**	9 500.00	445.00	4.7	8 394.47	10 605.53	b

Nota. n = 3 por tratamiento. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación; IC = intervalo de confianza al 95%. Letras distintas en la columna Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05). X_1–X_3 = tratamientos con DA; —$_1$ – —$_3$ = controles con DA.

Tabla 6

ANOVA–DBCA para nitrógeno total

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	312 812 500.00	5	62 562 500.00	312.45	< 0.001
Bloques	8 933.33	2	4 466.67	0.02	0.980
Error	1 999 333.33	10	199 933.33	—	—
Total	**314 821 766.67**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05. SC = suma de cuadrados; gl = grados de libertad; CM = cuadrado medio.

Interpretación: El ANOVA–DBCA evidenció diferencias altamente significativas entre los seis tratamientos para el nitrógeno total ($F(5,10) = 312.45$, $p < 0.001$). La prueba de Tukey identificó seis grupos homogéneos diferenciados, siendo X_3 el de mayor valor (M = 14 800 ppm, DE = 694) y —$_1$ el menor (M = 3 200 ppm). Los tratamientos con DA

superaron en promedio un 51% a sus respectivos controles, confirmando el efecto concentrador de la digestión anaerobia sobre el nitrógeno asimilable.

5.2.1.2 Fósforo (P)

Tabla 7

Estadísticos descriptivos del fósforo (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 3% MS + DA)	520.00	24.00	4.6	460.38	579.62	d
X_2 (12% MS + DA)	980.00	46.00	4.7	865.72	1 094.28	c
X_3 (22% MS + DA)	1 620.00	76.00	4.7	1 431.19	1 808.81	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	340.00	16.00	4.7	300.25	379.75	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	620.00	29.00	4.7	547.95	692.05	e
—$_3$ **(22% MS + DA)**	1 050.00	49.00	4.7	928.27	1 171.73	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 8

ANOVA–DBCA para fósforo (P)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	2 561 533.33	5	512 306.67	285.67	< 0.001
Bloques	58.00	2	29.00	0.02	0.984
Error	17 933.33	10	1 793.33	—	—
Total	**2 579 525.00**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se detectaron diferencias altamente significativas entre tratamientos (F (5,10) = 285.67, p < 0.001). X_3 registró la concentración más elevada (M = 1 620 ppm), superando en un 53% a —$_3$ (M = 1 050 ppm).

5.2.1.3 Potasio (K)

Tabla 9

Estadísticos descriptivos del potasio (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	2 800.00	131.00	4.7	2 474.55	3 125.45	d
X_2 (12% MS + DA)	4 500.00	211.00	4.7	3 975.80	5 024.20	b
X_3 (22% MS + DA)	5 900.00	277.00	4.7	5 211.84	6 588.16	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	1 900.00	89.00	4.7	1 678.89	2 121.11	e
—$_2$ **(12% MS + DA)**	3 100.00	145.00	4.7	2 739.77	3 460.23	c
—$_3$ **(22% MS + DA)**	4 200.00	197.00	4.7	3 710.59	4 689.41	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 10

ANOVA–DBCA para potasio (K)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	29 726 666.67	5	5 945 333.33	198.34	< 0.001
Bloques	933.33	2	466.67	0.02	0.985
Error	299 666.67	10	29 966.67	—	—
Total	**30 027 266.67**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: El ANOVA confirmó diferencias altamente significativas (F(5,10) = 198.34, p < 0.001). X_3 alcanzó el valor más alto (M = 5 900 ppm).

5.2.1.4 Calcio (Ca)

Tabla 11

Estadísticos descriptivos del calcio (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	1 820.00	85.00	4.7	1 608.68	2 031.32	d
X_2 (12% MS + DA)	3 450.00	162.00	4.7	3 047.16	3 852.84	b
X_3 (22% MS + DA)	5 720.00	268.00	4.7	5 052.67	6 387.33	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	1 120.00	52.00	4.6	991.57	1 248.43	f

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
—2 **(12% MS + DA)**	2 100.00	98.00	4.7	1 856.44	2 343.56	e
—3 **(22% MS + DA)**	3 100.00	145.00	4.7	2 739.77	3 460.23	c

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 12

ANOVA–DBCA para calcio (Ca)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	34 441 200.00	5	6 888 240.00	268.45	< 0.001
Bloques	1 008.00	2	504.00	0.02	0.980
Error	256 600.00	10	25 660.00	—	—
Total	**34 698 808.00**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se evidenciaron diferencias altamente significativas para calcio ($F(5,10) = 268.45$, $p < 0.001$). X_3 obtuvo el mayor valor (M = 5 720 ppm), superando en un 84.5% a —3 (M = 3 100 ppm). Este resultado es coherente con el reporte de Beltrán (2015), quien documentó que el calcio fue el único macronutriente que incrementó su concentración tras la digestión anaerobia de levadura cervecera (63% mayor).

5.2.1.5 Magnesio (Mg)

Tabla 13

Estadísticos descriptivos del magnesio (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	340.00	16.00	4.7	300.25	379.75	d
X_2 (12% MS + DA)	650.00	30.00	4.6	575.37	724.63	c
X_3 (22% MS + DA)	1 080.00	51.00	4.7	953.16	1 206.84	a
—1 **(3% MS + DA)**	220.00	10.00	4.5	195.13	244.87	f
—2 **(12% MS + DA)**	410.00	19.00	4.6	363.04	456.96	e
—3 **(22% MS + DA)**	690.00	32.00	4.6	610.39	769.61	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 14

ANOVA–DBCA para magnesio (Mg)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	1 245 266.67	5	249 053.33	222.37	< 0.001
Bloques	168.00	2	84.00	0.08	0.928
Error	11 200.00	10	1 120.00	—	—
Total	**1 256 634.67**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: El ANOVA confirmó diferencias significativas (F(5,10) = 222.37, p < 0.001). X_3 presentó el mayor valor de MgO (M = 1 080 ppm), mientras que la DA incrementó el magnesio en promedio un 56% respecto al control correspondiente, indicando liberación de Mg^{2+} durante la mineralización anaerobia.

5.2.1.6 Azufre (S)

Tabla 15

Estadísticos descriptivos del azufre (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	180.00	8.00	4.4	160.08	199.92	d
X_2 (12% MS + DA)	340.00	16.00	4.7	300.25	379.75	b
X_3 (22% MS + DA)	560.00	26.00	4.6	495.33	624.67	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	115.00	5.00	4.3	102.55	127.45	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	220.00	10.00	4.5	195.13	244.87	e
—$_3$ **(22% MS + DA)**	360.00	17.00	4.7	317.69	402.31	c

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 16

ANOVA–DBCA para azufre (S)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	325 866.67	5	65 173.33	219.68	< 0.001
Bloques	85.33	2	42.67	0.14	0.869
Error	2 966.67	10	296.67	—	—

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Total	**328 918.67**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se detectaron diferencias altamente significativas para azufre (F(5,10) = 219.68, p < 0.001). X_3 alcanzó la mayor concentración (M = 560 ppm), con un incremento promedio del 56% respecto a los controles, reflejando la mineralización del azufre orgánico contenido en los aminoácidos de las células de *Saccharomyces cerevisiae* durante la digestión anaerobia.

5.2.1.7 Sodio (Na)

Tabla 17

Estadísticos descriptivos del sodio (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	280.00	13.00	4.6	247.67	312.33	e
X_2 (12% MS + DA)	530.00	25.00	4.7	468.36	591.64	c
X_3 (22% MS + DA)	880.00	41.00	4.7	778.00	982.00	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	190.00	9.00	4.7	167.60	212.40	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	360.00	17.00	4.7	317.69	402.31	d
—$_3$ **(22% MS + DA)**	600.00	28.00	4.7	530.40	669.60	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 18

ANOVA–DBCA para sodio (Na)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	856 400.00	5	171 280.00	198.23	< 0.001
Bloques	314.67	2	157.33	0.18	0.835
Error	8 640.00	10	864.00	—	—
Total	**865 354.67**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: El ANOVA–DBCA para sodio confirmó diferencias significativas (F(5,10) = 198.23, p < 0.001). La DA incrementó la concentración de Na en un 47% en

promedio respecto a los controles. Si bien el sodio en exceso puede ser perjudicial para el suelo, los valores obtenidos (280–880 ppm) se encuentran dentro de rangos admisibles para bioles de aplicación agrícola moderada.

5.2.1.8 Cloro (Cl)

Tabla 19

Estadísticos descriptivos del cloro (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	210.00	10.00	4.8	185.12	234.88	e
X_2 (12% MS + DA)	400.00	19.00	4.8	352.73	447.27	c
X_3 (22% MS + DA)	660.00	31.00	4.7	583.01	736.99	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	140.00	7.00	5.0	122.58	157.42	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	270.00	13.00	4.8	237.67	302.33	d
—$_3$ **(22% MS + DA)**	450.00	21.00	4.7	397.75	502.25	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 20

ANOVA–DBCA para cloro (Cl)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	487 200.00	5	97 440.00	216.53	< 0.001
Bloques	200.00	2	100.00	0.22	0.804
Error	4 500.00	10	450.00	—	—
Total	**491 900.00**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se evidenciaron diferencias altamente significativas para cloro ($F(5,10) = 216.53$, $p < 0.001$). X_3 presentó el mayor valor (M = 660 ppm), con un incremento promedio del 47% respecto a los controles, atribuible a la liberación de iones cloruro durante la lisis celular anaerobia.

5.2.1.9 Micronutrientes: Cobre (Cu), Zinc (Zn), Manganeso (Mn), Hierro (Fe) y Boro (B)

Tabla 21

Estadísticos descriptivos de micronutrientes (ppm) valores medios por tratamiento

Tratamiento	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	B (ppm)	CV% medio	Tukey (global)
X_1 (3% MS + DA)	3.80	12.40	2.80	28.50	0.95	4.6	d
X_2 (12% MS + DA)	7.20	23.50	5.30	54.20	1.80	4.7	c
X_3 (22% MS + DA)	11.90	38.80	8.70	89.60	2.98	4.7	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	2.50	8.10	1.85	18.70	0.63	4.6	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	4.70	15.30	3.50	35.40	1.19	4.7	e
—$_3$ **(22% MS + DA)**	7.80	25.50	5.70	58.90	1.96	4.7	b

Nota. n = 3 por tratamiento. CV% medio = promedio de coeficientes de variación de los cinco micronutrientes. Tukey global = grupo homogéneo compartido por los cinco micronutrientes. Los ANOVA individuales presentaron F(5,10) entre 185.40 (B) y 267.80 (Fe), todos con $p < 0.001$.

Tabla 22

Resumen de ANOVA–DBCA para micronutrientes

Variable	F calculado	p-valor	F crítico	Decisión
Cobre (Cu)	232.45	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — DA incrementa significativamente Cu
Zinc (Zn)	245.80	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — DA incrementa significativamente Zn
Manganeso (Mn)	219.34	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — DA incrementa significativamente Mn
Hierro (Fe)	267.80	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — DA incrementa significativamente Fe
Boro (B)	185.40	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — DA incrementa significativamente B

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, $\alpha = 0.05$. Todos los F calculados superan ampliamente el valor crítico.

Interpretación: Los cinco micronutrientes presentaron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p < 0.001$). La DA incrementó la concentración de Cu, Zn, Mn, Fe y B en un promedio del 52% respecto a los controles, siendo X_3 el tratamiento con mayor concentración en todos los casos. El hierro presentó los valores más elevados (X_3: 89.60 ppm), coherente con el alto contenido de metaloproteínas en las células de *Saccharomyces cerevisiae* que son liberadas durante la autólisis anaerobia.

5.2.1.10 Carbono orgánico (C) y Relación C/N

Tabla 23

Estadísticos descriptivos del carbono orgánico (%) y relación C/N por tratamiento

Tratamiento	ΔC org. (%)	DE	CV%	IC 95% inf.	IC 95% sup.	ΔC/N	Tukey C
X_1 (3% MS + DA)	2.80	0.11	3.9	2.53	3.07	3.8	e
X_2 (12% MS + DA)	5.10	0.20	3.9	4.60	5.60	3.6	c
X_3 (22% MS + DA)	8.40	0.33	3.9	7.58	9.22	3.3	b
—$_1$ **(3% MS + DA)**	3.50	0.14	4.0	3.15	3.85	7.2	d
—$_2$ **(12% MS + DA)**	5.80	0.23	4.0	5.23	6.37	6.5	c
—$_3$ **(22% MS + DA)**	9.20	0.36	3.9	8.31	10.09	6.0	a

Nota. n = 3 por tratamiento. DE y CV corresponden al C orgánico; la ΔC/N (variación por bloques) es un valor de diferencia derivado de N total y C orgánico. Tukey C = grupo homogéneo para carbono orgánico. Letras distintas indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 24

ANOVA–DBCA para carbono orgánico y relación C/N

Variable	F calculado	p-valor	F crítico	Decisión
Carbono orgánico (C)	201.89	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — diferencias altamente significativas
Relación C/N	289.12	< 0.001	3.33	Se rechaza H_{01} — DA reduce significativamente la C/N

Interpretación: El carbono orgánico se redujo ligeramente con la DA (X_1: 2.8% vs —$_1$: 3.5%), resultado inherente a la degradación de compuestos carbonados durante el proceso anaerobio; sin embargo, todos los bioles superaron el umbral mínimo de referencia (≥ 0.18%). La relación C/N disminuyó significativamente con la DA (3.3–3.8 vs 6.0–7.2 en controles), indicando mayor disponibilidad de nitrógeno asimilable.

5.2.1.11 Materia orgánica (MO)

Tabla 25

Estadísticos descriptivos de la materia orgánica (%) por tratamiento

Tratamiento	Media (%)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	5.10	0.20	3.9	4.60	5.60	e

Tratamiento	Media (%)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_2 (12% MS + DA)	9.30	0.37	4.0	8.38	10.22	c
X_3 (22% MS + DA)	15.20	0.61	4.0	13.68	16.72	b
—$_1$ **(3% MS + DA)**	6.30	0.25	4.0	5.68	6.92	d
—$_2$ **(12% MS + DA)**	10.40	0.42	4.0	9.36	11.44	c
—$_3$ **(22% MS + DA)**	16.80	0.67	4.0	15.14	18.46	a

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 26

ANOVA–DBCA para materia orgánica

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	225.05	5	45.01	218.56	< 0.001
Bloques	0.03	2	0.02	0.07	0.930
Error	2.06	10	0.21	—	—
Total	**227.14**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. SC expresados en (%²). F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se detectaron diferencias significativas en MO ($F(5,10) = 218.56$, $p < 0.001$). La DA redujo ligeramente la MO respecto al control.

5.2.1.12 Prueba de hipótesis específica 1

- Hipótesis nula (H_0): Las características nutricionales del biol obtenido mediante digestión anaerobia no son significativamente mayores a las del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.
- Hipótesis alterna (H_1): Las características nutricionales del biol obtenido mediante digestión anaerobia son significativamente mayores a las del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

Tabla 27

Contraste de la hipótesis específica 1: características nutricionales del biol

Variable nutricional	F calculado	p-valor	Decisión
Nitrógeno total	312.45	<0.001	Rechazar H_{01}
Fósforo	285.67	<0.001	Rechazar H_{01}
Potasio	198.34	<0.001	Rechazar H_{01}
Calcio	268.45	<0.001	Rechazar H_{01}
Magnesio	222.37	<0.001	Rechazar H_{01}
Azufre	219.68	<0.001	Rechazar H_{01}
Sodio	198.23	<0.001	Rechazar H_{01}
Cloro	216.53	<0.001	Rechazar H_{01}
Micronutrientes	185.40–267.80	<0.001	Rechazar H_{01}
Carbono orgánico	201.89	<0.001	Rechazar H_{01}
Relación C/N	289.12	<0.001	Rechazar H_{01}
Materia orgánica	218.56	<0.001	Rechazar H_{01}

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 27, todas las variables nutricionales presentaron valores de F calculado superiores al valor crítico (F=3.33), con niveles de significancia inferiores a 0.001. Además, los tratamientos con digestión anaerobia registraron incrementos promedio cercanos al 50% en macro y micronutrientes respecto a los controles. Por consiguiente, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, concluyendo que la digestión anaerobia incrementó significativamente las características nutricionales del biol obtenido a partir del lodo de levadura gastada.

5.2.2 Objetivo específico 2: Características fisicoquímicas del biol

5.2.2.1 Potencial de hidrógeno (pH)

Tabla 28

Estadísticos descriptivos del pH por tratamiento

Tratamiento	Media (unidades)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	4.52	0.10	2.2	4.27	4.77	f
X_2 (12% MS + DA)	4.81	0.11	2.3	4.54	5.08	e

Tratamiento	Media (unidades)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_3 (22% MS + DA)	5.12	0.12	2.3	4.82	5.42	d
—$_1$ (3% MS + DA)	6.85	0.16	2.3	6.45	7.25	c
—$_2$ (12% MS + DA)	7.10	0.17	2.4	6.68	7.52	b
—$_3$ (22% MS + DA)	7.35	0.17	2.3	6.93	7.77	a

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 29

ANOVA–DBCA para pH

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	26.83	5	5.37	389.74	< 0.001
Bloques	0.01	2	0.005	0.36	0.703
Error	0.14	10	0.014	—	—
Total	**26.98**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: El ANOVA–DBCA detectó diferencias altamente significativas en pH ($F(5,10) = 389.74$, $p < 0.001$), siendo el estadístico más alto de todas las variables fisicoquímicas. La DA redujo el pH desde el rango neutro-alcalino de los controles (6.85–7.35) al rango ácido (4.52–5.12), resultado de la producción de ácidos grasos volátiles y ácido láctico durante la acidogénesis.

5.2.2.2 Conductividad eléctrica (CE)

Tabla 30

Estadísticos descriptivos de la conductividad eléctrica (dS/m) por tratamiento

Tratamiento	Media (dS/m)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	11.20	0.35	3.1	10.33	12.07	e
X_2 (12% MS + DA)	19.80	0.62	3.1	18.26	21.34	c
X_3 (22% MS + DA)	31.50	0.99	3.1	29.03	33.97	a
—$_1$ (3% MS + DA)	10.10	0.32	3.2	9.31	10.89	f
—$_2$ (12% MS + DA)	18.20	0.57	3.1	16.78	19.62	d
—$_3$ (22% MS + DA)	28.90	0.91	3.1	26.64	31.16	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Rango óptimo de referencia para bioles peruanos: 9.95–23 dS/m. Letras distintas indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 31

ANOVA–DBCA para conductividad eléctrica

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	985.42	5	197.08	178.23	< 0.001
Bloques	0.78	2	0.39	0.35	0.711
Error	11.05	10	1.11	—	—
Total	**997.25**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: La CE presentó diferencias significativas entre tratamientos (F(5,10) = 178.23, p < 0.001). La DA incrementó moderadamente la CE (X_1: 11.2 vs —$_1$: 10.1 dS/m), atribuible a la mineralización de compuestos orgánicos complejos en iones solubles. X_1 y X_2 se ubican dentro del rango óptimo (9.95–23 dS/m), mientras que X_3 (31.5 dS/m) excede el límite superior, lo que podría generar riesgo de toxicidad salina en suelos con baja capacidad de intercambio catiónico.

5.2.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

Tabla 32

Estadísticos descriptivos de la DQO (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	42 000	1 971	4.7	37 097	46 903	e
X_2 (12% MS + DA)	78 000	3 661	4.7	68 890	87 110	c
X_3 (22% MS + DA)	128 000	6 007	4.7	113 064	142 936	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	98 000	4 600	4.7	86 568	109 432	d
—$_2$ **(12% MS + DA)**	182 000	8 546	4.7	160 743	203 257	b
—$_3$ **(22% MS + DA)**	210 000	9 860	4.7	185 458	234 542	a

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05). La DA evidencio que la DQO final de los tratamientos con digestión anaerobia fue 57.1 % menor que la de sus respectivos controles en X_1 y X_2, y 39.0 % menor en X_3.

Tabla 33

ANOVA–DBCA para DQO

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	5.82E+10	5	1.16E+10	256.88	< 0.001
Bloques	1.53E+07	2	7.67E+06	0.17	0.847
Error	4.52E+08	10	4.52E+07	—	—
Total	**5.87E+10**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. SC expresados en ppm². F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se evidenciaron diferencias altamente significativas en DQO ($F(5,10) = 256.88$, $p < 0.001$). Los tratamientos con digestión anaerobia presentaron valores finales de DQO significativamente menores que sus respectivos controles ($p < 0.001$). En términos relativos, la DQO final fue 57.1 % menos en X_1 y X_2, y 39.0 % menos en X_3 respecto a los controles correspondientes. Estos resultados evidencian que la digestión anaerobia disminuyó la carga orgánica remanente al finalizar el proceso. No obstante, estos porcentajes representan diferencias entre tratamientos y controles al final del ensayo, mas no la eficiencia de remoción respecto a la concentración inicial de DQO.

5.2.2.4 Densidad

Tabla 34

Estadísticos descriptivos de la densidad (g/mL) por tratamiento

Tratamiento	Media (g/mL)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	1.012	0.003	0.3	1.005	1.019	d
X_2 (12% MS + DA)	1.035	0.005	0.5	1.023	1.047	c
X_3 (22% MS + DA)	1.068	0.008	0.7	1.048	1.088	a
—$_1$ (3% MS + DA)	1.008	0.002	0.2	1.003	1.013	e
—$_2$ (12% MS + DA)	1.028	0.004	0.4	1.018	1.038	d
—$_3$ (22% MS + DA)	1.055	0.007	0.7	1.038	1.072	b

Nota. n = 3 por tratamiento. Letras distintas en Tukey indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 35

ANOVA–DBCA para densidad

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	0.00665	5	0.00133	156.47	< 0.001
Bloques	0.000002	2	0.000001	0.12	0.887
Error	0.000085	10	0.0000085	—	—
Total	**0.006737**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: La densidad presentó diferencias significativas entre tratamientos ($F(5,10) = 156.47$, $p < 0.001$). La DA incrementó ligeramente la densidad respecto a los controles en todos los niveles de MS (X_1: 1.012 vs —$_1$: 1.008 g/mL), como resultado de la solubilización de compuestos orgánicos complejos en moléculas de menor peso molecular y mayor densidad relativa.

5.2.2.5 Sólidos totales (ST)

Tabla 36

Estadísticos descriptivos de sólidos totales (ppm) por tratamiento

Tratamiento	Media (ppm)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	3 820	179	4.7	3 374	4 266	e
X_2 (12% MS + DA)	7 150	336	4.7	6 316	7 984	c
X_3 (22% MS + DA)	11 820	555	4.7	10 439	13 201	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	5 100	239	4.7	4 505	5 695	d
—$_2$ **(12% MS + DA)**	9 500	446	4.7	8 391	10 609	b
—$_3$ **(22% MS + DA)**	15 600	732	4.7	13 779	17 421	a

Nota. n = 3 por tratamiento. La DA redujo los ST en promedio un 24% respecto a los controles.

Tabla 37

ANOVA–DBCA para sólidos totales

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	2.61E+08	5	5.22E+07	201.34	< 0.001

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Bloques	1.25E+05	2	6.25E+04	0.24	0.791
Error	2.59E+06	10	2.59E+05	—	—
Total	**2.64E+08**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Se detectaron diferencias significativas en sólidos totales (F(5,10) = 201.34, p < 0.001). La DA redujo los ST en un promedio del 24% respecto a los controles (X_1: 3 820 vs —$_1$: 5 100 ppm; X_2: 7 150 vs —$_2$: 9 500 ppm), resultado coherente con la solubilización y mineralización de la materia orgánica particulada durante el proceso anaerobio. Este comportamiento es consistente con lo reportado por Duguma et al. (2024), quienes documentaron una reducción del 84% en ST tras la DA de levadura gastada de destilería, siendo las diferencias en magnitud explicadas por el mayor tiempo de retención de dicho estudio.

5.2.2.6 Cenizas disueltas (CD)

Tabla 38

Estadísticos descriptivos de cenizas disueltas (%) por tratamiento

Tratamiento	Media (%)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (3% MS + DA)	1.25	0.06	4.8	1.10	1.40	d
X_2 (12% MS + DA)	2.38	0.11	4.6	2.11	2.65	b
X_3 (22% MS + DA)	3.92	0.18	4.6	3.47	4.37	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	0.85	0.04	4.7	0.75	0.95	f
—$_2$ **(12% MS + DA)**	1.60	0.07	4.4	1.43	1.77	e
—$_3$ **(22% MS + DA)**	2.65	0.12	4.5	2.35	2.95	c

Nota. n = 3 por tratamiento. CD = fracción mineral soluble. Letras distintas indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 39

ANOVA–DBCA para cenizas disueltas

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	22.59	5	4.52	189.74	< 0.001
Bloques	0.01	2	0.005	0.21	0.812
Error	0.24	10	0.024	—	—
Total	**22.84**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Las cenizas disueltas presentaron diferencias altamente significativas (F(5,10) = 189.74, p < 0.001). La DA incrementó la fracción mineral soluble respecto a los controles (X_1: 1.25% vs —$_1$: 0.85%), confirmando la mineralización de compuestos orgánicos complejos en iones inorgánicos solubles asimilables por las plantas. X_3 alcanzó el mayor valor (3.92%), concordante con su mayor carga mineral total.

5.2.2.7 Impurezas

Tabla 40

Estadísticos descriptivos de Impurezas (%) por tratamiento**Tratamiento**	Media (%)	DE	CV (%)	IC 95% inf.	IC 95% sup.	Tukey
X_1 (1% MS + DA)	0.42	0.02	4.8	0.37	0.47	e
X_2 (11% MS + DA)	0.78	0.04	5.1	0.68	0.88	c
X_3 (25% MS + DA)	1.30	0.06	4.6	1.15	1.45	a
—$_1$ **(3% MS + DA)**	0.65	0.03	4.6	0.58	0.72	d
—$_2$ **(12% MS + DA)**	1.20	0.06	5.0	1.05	1.35	b
—$_3$ **(22% MS + DA)**	2.10	0.10	4.8	1.85	2.35	a

Nota. n = 3 por tratamiento. Impurezas = fracción insoluble total (materia particulada no degradada). Letras distintas indican diferencias significativas (α = 0.05).

Tabla 41

ANOVA–DBCA para impurezas

Fuente de variación	SC	gl	CM	F calculado	p-valor
Tratamientos	7.45	5	1.49	175.29	< 0.001
Bloques	0.003	2	0.0015	0.18	0.838
Error	0.085	10	0.0085	—	—
Total	**7.538**	**17**	**—**	**—**	**—**

Nota. F crítico (5,10) = 3.33, α = 0.05.

Interpretación: Las impurezas presentaron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F(5,10) = 175.29$, $p < 0.001$). La DA redujo la fracción de impurezas en un promedio del 38% respecto a los controles (X_1: 0.42% vs —$_1$: 0.65%; X_2: 0.78% vs —$_2$: 1.20%), evidenciando la degradación de material particulado durante el proceso anaerobio. X_3 presentó el mayor valor con DA (1.30%), indicando que la mayor concentración de sólidos en suspensión requiere mayor tiempo de retención para su degradación completa.

5.2.2.8 Prueba de Hipótesis Específica 2

- Hipótesis nula (H_0): Las características fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia no presentan diferencias significativas respecto al lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de Cusco.
- Hipótesis alterna (H_1): Las características fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia presentan diferencias significativas respecto al lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de Cusco.

Tabla 42

Contraste de la hipótesis específica 2: características fisicoquímicas del biol

Variable fisicoquímica	F calculado	p-valor	Decisión
pH	389.74	<0.001	Rechazar H_{02}
Conductividad eléctrica	178.23	<0.001	Rechazar H_{02}

Variable fisicoquímica	F calculado	p-valor	Decisión
DQO	256.88	<0.001	Rechazar H_{02}
Densidad	156.47	<0.001	Rechazar H_{02}
Sólidos totales	201.34	<0.001	Rechazar H_{02}
Cenizas disueltas	189.74	<0.001	Rechazar H_{02}
Impurezas	175.29	<0.001	Rechazar H_{02}

Según los resultados del ANOVA resumidos en la Tablas 42, todas las variables fisicoquímicas presentaron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p<0.001$). La digestión anaerobia disminuyó el pH, la DQO, los sólidos totales y las impurezas, mientras que incrementó la conductividad eléctrica, la densidad y las cenizas disueltas. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, concluyendo que la digestión anaerobia modificó significativamente las características fisicoquímicas del biol producido.

5.2.3 Objetivo específico 3: Comparación con bioles comerciales

5.2.3.1 Características nutricionales

Tabla 43

Comparación de características nutricionales: biol experimental (X_1–X_3) vs bioles comerciales peruanos

Variable (unidad)	X_1	X_2	X_3	Alli Allpa	Aminovigor Prem.	Fosac	Mallki	Fertibiol	S/N	Rango ref. mínimo
N (ppm)	4 850	9 200	14 800	241.69	21 360	4200-4300	600-700	13000	11200	**≥ 242 → Todos ✓**
P (ppm)	520	980	1 620	6.67	2 000	430-470	90-100	296.5	1914.81	**≥ 100 → Todos ✓**
K (ppm)	2 800	4 500	5 900	2494.16	10 200	4440-4500	4000-6000	5642	4075	**≥ 2 494 → Todos ✓**
C org. (%)	2.80	5.10	8.40	0.18	—	—	—	—	—	**≥ 0.18 → Todos ✓**
C/N	3.8	3.6	3.3	—	—	—	3.2-3.9	—	—	**3.2 – 3.9 → Todos ✓**
MO (%)	5.10	9.30	15.20	0.31	27.77	—	3.0 - 4.5	—	14.48	**3 – 27.77 → Todos ✓**

Nota. (—) = dato no reportado por el fabricante. ✓ = cumple o supera el criterio de referencia.

5.2.3.2 Características fisicoquímicas

Tabla 44

Comparación de características fisicoquímicas: biol experimental vs bioles comerciales

Variable (unidad)	X_1	X_2	X_3	Alli Allpa	Aminovigor Prem.	Fosac	Mallki	Fertibiol	S/N	Rango referencial
pH	4.52	4.81	5.12	7.66	4.22	4.5 - 5.5	4.3 - 4.6	7.78	4.01	**4–7.78 → Todos ✓**
CE (dS/m)	11.2	19.8	31.5	22.81	—	78.5 - 82.5	19.0 - 23.0	28.23	9.95	**9.95–82.5 → Todos ✓ (X_3: alto)**

Nota. (—) = dato no reportado. X_3 presenta CE = 31.5 dS/m, que supera el límite superior de referencia óptimo (23 dS/m) aunque permanece dentro del rango amplio peruano (hasta 82.5 dS/m).

Interpretación: La comparación directa evidencia que los tres tratamientos con DA superan al biol comercial Alli Allpa en nitrógeno (X_2: +3 702%), fósforo (X_2: +14 602%), potasio (X_2: +80%) y materia orgánica (X_2: ×30). En relación con bioles de alta gama (Aminovigor premium), el tratamiento X_2 presenta concentraciones de N del mismo orden de magnitud (9 200 vs 21 360 ppm). Los parámetros fisicoquímicos de X_1 y X_2 se ubican dentro de todos los rangos de referencia peruanos, mientras que X_3 excede el límite superior de CE recomendado (23 dS/m), lo que condiciona su uso a suelos con alta capacidad de intercambio catiónico o con previa dilución.

5.2.3.3 Prueba de Hipótesis Específica 3

- Hipótesis nula (H_0): Las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento no superan el rango de los bioles comerciales de referencia.
- Hipótesis alterna (H_1): Las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido en cada tratamiento superan el rango de los bioles comerciales de referencia.

Tabla 45

Contraste de la hipótesis específica 3: comparación con bioles comerciales

Criterio de comparación	**Resultado**
Nitrógeno respecto a Alli Allpa	Superior
Fósforo respecto a Alli Allpa	Superior
Potasio respecto a Alli Allpa	Superior
Materia orgánica respecto a Alli Allpa	Superior
Relación C/N respecto a Mallki	Comparable
pH respecto a bioles comerciales	Cumple
Decisión	Rechazar H_{03}

La comparación efectuada con bioles comerciales (Tabla 45) evidenció que los tratamientos con digestión anaerobia, especialmente X_2 y X_3, superaron ampliamente al biol comercial Alli Allpa en nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica. Asimismo, la relación carbono/nitrógeno fue comparable con la reportada para bioles premium como Mallki, mientras que los parámetros fisicoquímicos se mantuvieron dentro de los rangos de referencia nacionales. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, concluyéndose que el biol obtenido a partir del lodo de levadura gastada presenta características nutricionales y fisicoquímicas superiores o comparables a las de los principales bioles comerciales evaluados.

5.2.4 Objetivo general: Determinar el tratamiento adecuado

5.2.4.1 Criterios de calidad por tratamiento con Digestión Anaerobia

Tabla 46

Matriz de cumplimiento de criterios de calidad por tratamiento con digestión anaerobia

Variable / Criterio de calidad	X_1 (3% MS)	X_2 (12% MS)	X_3 (22% MS)	Observación
N ≥ 242 ppm	✓ 4 850	✓ 9 200	✓ 14 800	Todos cumplen; X_3 mayor valor absoluto
P ≥ 100 ppm	✓ 520	✓ 980	✓ 1 620	Todos cumplen; superan ampliamente
K ≥ 2 494 ppm	✓ 2 800	✓ 4 500	✓ 5 900	Todos cumplen el mínimo comercial
C orgánico ≥ 0.18%	✓ 2.80%	✓ 5.10%	✓ 8.40%	Todos cumplen ampliamente
C/N ≥ 3	✓ 3.8	✓ 3.6	✓ 3.3	Todos en rango premium
MO ≥ 0.31%	✓ 5.10%	✓ 9.30%	✓ 15.20%	Todos cumplen ampliamente
pH 4–7	✓ 4.52	✓ 4.81	✓ 5.12	Todos dentro del rango comercial
CE 9.95–23 dS/m	✓ 11.2	✓ 19.8	✗ 31.5	X_3 supera el límite superior óptimo
CRITERIOS CUMPLIDOS	**08 / 08**	**08 / 08**	**07 / 08**	**X_1 y X_2: Tratamiento con 88.9 % de cumplimiento**

Nota. ✓ = cumple el criterio de calidad establecido; ✗ = no cumple. Los 08 criterios comprenden las variables nutricionales (N, P, K, C, C/N, MO) y fisicoquímicas (pH, CE).

Del análisis integral de la matriz de cumplimiento (Tabla 46), se concluye que los tratamientos X_1 (lodo de levadura gastada–sobrenadante con 3 % de materia seca, consorcio microbiano EM1 y melaza, 37 °C y 60 rpm) y X_2 (12 % de materia seca bajo las mismas condiciones de operación) cumplieron el 100% (8/8) de los criterios de calidad establecidos para el biol. No obstante, X_2 presentó concentraciones superiores de nitrógeno, fósforo, potasio, carbono orgánico y materia orgánica respecto a X_1, manteniendo simultáneamente valores de pH y conductividad eléctrica dentro de los rangos establecidos, por lo que constituye el tratamiento más adecuado para la obtención de biol mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada proveniente de la industria cervecera de la ciudad del Cusco. Por otra parte, aunque X_3 registró las mayores concentraciones de nutrientes, excedió el límite superior recomendado para la conductividad eléctrica (31.5 dS/m), incumpliendo así el 12.5% (1/8) de los criterios de calidad establecidos.

Todos los estadísticos F calculados superaron ampliamente el valor crítico F(5,10) = 3.33 (rango: 156.47–389.74), con $p < 0.001$ en las 08 variables evaluadas, confirmando diferencias altamente significativas entre los tratamientos en la totalidad del análisis estadístico.

5.2.4.2 Prueba de Hipótesis General

- Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas en las características nutricionales y fisicoquímicas entre los tratamientos, por lo tanto, ningún tratamiento puede considerarse adecuado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.
- Hipótesis alterna (H_1): Existen diferencias significativas en las características nutricionales y fisicoquímicas entre los tratamientos evaluados, y al menos uno de ellos es adecuado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura de cerveza gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco.

Tabla 47

Contraste de la hipótesis general sobre la determinación del tratamiento adecuado para la obtención de biol mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada de cerveza

Indicador	Resultado
Variables nutricionales evaluadas	6
Variables fisicoquímicas evaluadas	2
Rango de F calculado	156.47–389.74
F crítico ($\alpha = 0.05$)	3.33
Valor de significancia	$p < .001$
Decisión estadística	Se rechaza H_0
Hipótesis aceptada	H_a

Los resultados obtenidos en la tabla 47, evidenciaron que todos los estadísticos F calculados fueron superiores al valor crítico de F = 3.33 y que los valores de significancia fueron menores a 0.001 en las 08 variables evaluadas (Tablas 28 - 33). En consecuencia, se

rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, concluyéndose que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos estudiados. Asimismo, la matriz de cumplimiento de criterios de calidad (Tabla 46) demostró que el tratamiento X_1 y X_2, fueron los tratamientos que cumplieron el 100% de los criterios establecidos (08/08), al realizar un análisis de valores obtenidos respecto a las características nutricionales y fisicoquímicas, entre X_1 y X_2 se determinó que el tratamiento X_2 es el tratamiento más recomendado para la obtención de biol por digestión anaerobia del lodo de levadura gastada.

5.3 Discusiones

La evolución de los parámetros de pH y conductividad eléctrica constituyó un criterio importante para evaluar el desarrollo y grado de estabilización de la digestión anaerobia. El monitoreo semanal realizado durante las 12 semanas evidenció que el pH presentó un incremento gradual durante las primeras cinco semanas, seguido de una etapa de relativa estabilidad hasta la finalización del proceso. Este comportamiento fue observado en los tres tratamientos evaluados, siendo X_3 (22 % MS) el que registró los mayores valores de pH (4.64–5.22), seguido de X_2 (12 % MS) y X_1 (3 % MS). La estabilización observada a partir de la quinta semana sugiere que la actividad microbiana alcanzó una condición de equilibrio, favoreciendo la maduración del biol obtenido.

Estos resultados difieren parcialmente de los reportados por Sifuentes Estrada (2023), quien observó una disminución progresiva del pH durante la fermentación de levadura residual de cervecería, atribuyéndola a la producción de ácidos orgánicos por la actividad microbiana. Sin embargo, en ambas investigaciones se evidenció que las mayores variaciones ocurrieron durante las etapas iniciales del proceso, reflejando una intensa actividad biológica asociada a la transformación de la materia orgánica. Asimismo, la autora señala que el sistema continuó mostrando cambios de pH incluso después de la fase principal

de fermentación, mientras que en el presente estudio los valores tendieron a estabilizarse desde la quinta semana, indicando una mayor maduración del proceso anaerobio.

En cuanto a la conductividad eléctrica, se observó una tendencia general de incremento durante todo el periodo de evaluación. Los tratamientos X_2 y X_3 alcanzaron los mayores valores finales, con máximos de 25.7 y 23.2 mS/cm, respectivamente, mientras que X_1 presentó incrementos más moderados. Este comportamiento evidencia la liberación progresiva de sales minerales y nutrientes solubles como consecuencia de la degradación y mineralización de la materia orgánica contenida en el lodo de levadura gastada.

De manera similar, Sifuentes Estrada (2023) reportó un incremento sostenido de la conductividad eléctrica durante la fermentación de levadura residual, alcanzando valores finales de hasta 21.40 mS/cm y atribuyendo este comportamiento a la acumulación de nutrientes solubles liberados por la actividad microbiana. La tendencia observada en ambos estudios fue coincidente, aunque los tratamientos X_2 y X_3 del presente trabajo alcanzaron valores ligeramente superiores, lo que podría estar relacionado con las mayores concentraciones de materia seca empleadas y el mayor tiempo de digestión aplicado.

En conjunto, la evolución de ambos parámetros confirmó que la digestión anaerobia promovió la transformación gradual de la materia orgánica y la liberación de nutrientes al medio líquido, contribuyendo a la obtención de un biol más estable y con potencial aprovechamiento agronómico.

Se planteó como primer objetivo específico calcular las características nutricionales del biol obtenido en cada tratamiento de digestión anaerobia del lodo de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco. Este objetivo se sustenta en los principios de la digestión anaerobia, proceso biológico mediante el cual los microorganismos degradan la materia orgánica compleja y transforman los nutrientes contenidos en ella hacia formas más simples y biodisponibles para las plantas. Según la literatura científica, durante la hidrólisis,

acidogénesis y metanogénesis se produce la mineralización de compuestos orgánicos, favoreciendo la liberación de nitrógeno, fósforo, potasio y otros elementos esenciales para el desarrollo vegetal.

Los resultados obtenidos demostraron diferencias altamente significativas entre las medias de los tratamientos evaluados para todas las variables nutricionales analizadas ($p < 0.001$). Se observó que la media del tratamiento X_3 (22 % de materia seca con digestión anaerobia) presentó las mayores concentraciones de nitrógeno total (14 800 ppm), fósforo (1 620 ppm), potasio (5 900 ppm), calcio (5 720 ppm), magnesio (1 080 ppm), azufre (560 ppm), así como de los micronutrientes cobre, zinc, manganeso, hierro y boro. Estos resultados evidencian que el incremento de la concentración de materia seca favoreció la disponibilidad de nutrientes en el biol final, debido a que una mayor cantidad de biomasa de levadura proporcionó una mayor reserva de compuestos orgánicos susceptibles de degradación microbiana.

Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Gebrehiwet (2019), quien evaluó la digestión anaerobia de levadura gastada de cervecería bajo diferentes concentraciones y encontró que a medida que aumentaba la proporción de levadura en el sistema también se incrementaban los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio presentes en el digestato líquido. El autor explicó que la elevada carga orgánica aporta mayores cantidades de proteínas, aminoácidos y minerales que posteriormente son transformados en nutrientes disponibles. De manera similar, en la presente investigación se observó una tendencia ascendente de todos los macronutrientes conforme aumentó el porcentaje de materia seca desde 3% hasta 22%, lo cual demuestra la importancia de la concentración inicial del sustrato sobre la calidad nutricional del biol obtenido.

Asimismo, los resultados son concordantes con los planteamientos de Gustiari (2023), quien obtuvo fertilizantes líquidos orgánicos a partir de residuos líquidos de tofu mediante fermentación anaerobia y reportó concentraciones elevadas de nitrógeno, fósforo y potasio en los tratamientos que contenían una adecuada carga orgánica. Aunque los residuos utilizados en ambos estudios son diferentes, los hallazgos confirman que la digestión anaerobia constituye una alternativa eficaz para recuperar nutrientes contenidos en residuos agroindustriales y transformarlos en productos con valor agronómico.

Por otro lado, los resultados difieren de los obtenidos por Beltrán (2015), quien al producir biol a partir de levadura residual cervecera reportó una disminución promedio de aproximadamente 35% en los macronutrientes después de la digestión anaerobia, con excepción del calcio, que aumentó significativamente. En contraste, en la presente investigación se observaron incrementos importantes en nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes en comparación con las medias de los controles correspondientes. Esta discrepancia probablemente se explica por las diferencias metodológicas existentes entre ambos estudios. Mientras Beltrán empleó residuos de cocina como complemento orgánico y no utilizó inoculantes específicos, en esta investigación se emplearon microorganismos eficientes, melaza y condiciones controladas de temperatura y agitación, factores que favorecen una mayor degradación celular y liberación de nutrientes minerales.

Respecto al calcio, los resultados obtenidos muestran una notable coincidencia con Beltrán (2015), quien identificó que este elemento aumentó después del proceso anaerobio. En el presente estudio, la media del tratamiento X_3 presentó una concentración de calcio de 5 720 ppm, superando en 84.5 % al promedio de las medias del grupo control correspondiente. Este comportamiento puede atribuirse a la liberación de calcio intracelular y a la solubilización de compuestos minerales presentes en la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* durante la digestión anaerobia.

Un aspecto particularmente importante fue la disminución significativa de la relación carbono/nitrógeno (C/N) en los tratamientos sometidos a digestión anaerobia. Las medias de los tratamientos sometidos a digestión anaerobia oscilaron entre 3.3 y 3.8, mientras que las medias de los controles presentaron valores entre 6.0 y 7.2. Desde el punto de vista agronómico, una menor relación C/N indica una mayor disponibilidad de nitrógeno para las plantas y un mayor grado de estabilización del fertilizante orgánico. Este comportamiento se debe a que durante la digestión anaerobia gran parte del carbono es transformado en dióxido de carbono y metano, mientras que el nitrógeno permanece en formas minerales disponibles.

De igual manera, las medias de los micronutrientes presentaron incrementos significativos en todos los tratamientos con digestión anaerobia. El hierro registró las mayores concentraciones, alcanzando 89.6 ppm en a media del tratamiento X_3. Estos resultados pueden explicarse por la degradación de metaloproteínas, enzimas y estructuras intracelulares características de la levadura cervecera. Desde el punto de vista agrícola, este hallazgo representa una ventaja importante debido a que los micronutrientes participan activamente en procesos fisiológicos relacionados con la fotosíntesis, respiración y síntesis de compuestos esenciales para el crecimiento vegetal.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la digestión anaerobia favoreció significativamente el enriquecimiento nutricional del biol producido a partir del lodo de levadura gastada. Además, los niveles alcanzados superan ampliamente los valores mínimos reportados para diversos bioles comerciales peruanos, confirmando el potencial de este residuo industrial como materia prima para la producción de fertilizantes orgánicos líquidos de alta calidad.

El segundo objetivo específico consistió en calcular las características fisicoquímicas del biol obtenido mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada. Las características fisicoquímicas constituyen indicadores fundamentales para evaluar la calidad, estabilidad y aptitud agronómica de los fertilizantes orgánicos líquidos, debido a que reflejan el grado de transformación de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes presentes en el producto final.

Los resultados evidenciaron diferencias altamente significativas entre las medias de los tratamientos para todas las variables evaluadas ($p < .001$). El pH disminuyó significativamente en las medias de los tratamientos sometidos a digestión anaerobia, alcanzando valores entre 4.52 y 5.12, mientras que las medias de los controles presentaron valores cercanos a la neutralidad. Esta reducción puede atribuirse a la formación de ácidos grasos volátiles, ácido láctico y otros metabolitos producidos durante las etapas iniciales de la digestión anaerobia.

Estos resultados coinciden con los hallazgos de Gebrehiwet (2019), quien reportó que los mejores desempeños microbiológicos durante la digestión anaerobia de levadura gastada ocurrieron en rangos de pH comprendidos entre 5 y 7. Los valores encontrados en la presente investigación se ubican dentro de este intervalo, indicando condiciones favorables para la actividad de los microorganismos anaerobios responsables de la degradación de la materia orgánica.

En cuanto a la conductividad eléctrica, se observó un incremento progresivo conforme aumentó la concentración de materia seca. Este comportamiento está asociado a la liberación de sales minerales solubles producto de la mineralización de la materia orgánica. Sin embargo, la media del tratamiento X_3 presentó una conductividad eléctrica superior al rango óptimo recomendado para algunos cultivos, situación que podría limitar su

aplicación directa sin una dilución previa. A pesar de ello, las medias de los tratamientos X_1 y X_2 permanecieron dentro de los valores considerados adecuados para fertilizantes líquidos orgánicos.

Respecto a la demanda química de oxígeno (DQO), las medias de los tratamientos sometidos a digestión anaerobia no mostraron reducciones significativas. Este comportamiento evidencia que el proceso de digestión anaerobia degrada una pequeña proporción de materia orgánica biodegradable presente en el lodo de levadura gastada. Estos resultados difieren en gran medida con los reportados por Sosa-Hernández et al. (2016), quienes demostraron que la digestión anaerobia de levadura residual favorece la conversión de la materia orgánica y reduce progresivamente la carga contaminante del sistema, esta diferencia probablemente se debe a los insumos empleados, ya que en la presente investigación no se utilizaron microorganismos metanógenos.

De igual forma, los resultados concuerdan con lo informado por Duguma et al. (2024), quienes reportaron reducciones importantes de sólidos totales durante la digestión anaerobia de residuos ricos en levadura. Aunque las reducciones observadas en la presente investigación fueron menores a las descritas por dichos autores, ambas investigaciones coinciden en señalar que la digestión anaerobia favorece la disminución de la materia orgánica particulada y la estabilización del digestato final. Las diferencias observadas probablemente se deben a variaciones en el tiempo de retención hidráulica, las condiciones operativas y las características propias de cada sustrato.

Asimismo, la disminución de sólidos totales e impurezas observada en las medias de los tratamientos con digestión anaerobia evidencia una degradación efectiva de la materia orgánica suspendida. Paralelamente, el incremento significativo de las cenizas disueltas

demuestra que parte de la materia orgánica fue transformada en minerales solubles, aumentando la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Por consiguiente, los resultados promedio obtenidos indican que la digestión anaerobia mejoró significativamente las propiedades fisicoquímicas del biol producido, favoreciendo su estabilidad, calidad y potencial uso agrícola.

El tercer objetivo específico consistió en comparar las características nutricionales y fisicoquímicas del biol obtenido con las de diversos bioles comerciales disponibles en el mercado peruano. Esta comparación resulta fundamental para determinar la competitividad y viabilidad del producto desarrollado a partir del lodo de levadura gastada.

Los resultados demostraron que las medias de los tratamientos sometidos a digestión anaerobia superaron ampliamente a algunos bioles comerciales en variables nutricionales clave. En particular, las concentraciones medias de nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica obtenidas en los tratamientos X_2 y X_3 fueron considerablemente superiores a las reportadas para el biol comercial Alli Allpa. Asimismo, los niveles de nitrógeno obtenidos fueron comparables a los observados en productos de alta gama como Aminovigor Premium.

Estos hallazgos evidencian que el lodo de levadura gastada posee un elevado potencial como materia prima para la producción de fertilizantes orgánicos líquidos. La riqueza nutricional de *Saccharomyces cerevisiae*, caracterizada por su elevado contenido de proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales, constituye una ventaja importante para la obtención de bioles de alta calidad.

En relación con las características fisicoquímicas, los valores promedio de las medias obtenidas para los tratamientos X_1 y X_2 cumplieron con los rangos de referencia establecidos para fertilizantes líquidos comerciales. Por su parte, el valor promedio de la media obtenida para el tratamiento X_3 presentó una conductividad eléctrica superior al límite óptimo

recomendado, aunque mantuvo valores aceptables para aplicaciones agrícolas bajo condiciones de dilución controlada.

Por tanto, los valores promedio de las medias obtenidas para los bioles evaluados demuestran que los bioles obtenidos mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada presentan una calidad comparable e incluso superior a varios fertilizantes orgánicos líquidos disponibles comercialmente, lo que respalda su potencial aprovechamiento a escala productiva.

El objetivo general de la investigación fue determinar el tratamiento adecuado para la obtención de biol mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco. Los promedios de las medias obtenidas para los tratamientos X_1 y X_2, correspondiente al 3% y 12 % de materia seca respectivamente, cumplieron a la totalidad de los criterios de calidad establecidos, alcanzando un cumplimiento del 100% de los indicadores evaluados.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Gebrehiwet (2019), quien encontró que concentraciones intermedias de levadura favorecen un mejor equilibrio entre disponibilidad de nutrientes y eficiencia del proceso anaerobio. Asimismo, guardan relación con los hallazgos de Sosa-Hernández et al. (2016), quienes señalaron que cargas orgánicas excesivamente elevadas pueden generar limitaciones operativas que afectan la eficiencia global del sistema.

De igual manera, los resultados son consistentes con Duguma et al. (2024), quienes concluyeron que concentraciones moderadas de sustrato favorecen la estabilización de la materia orgánica y permiten obtener digestatos con mejores características de calidad. En la presente investigación, aunque el valor promedio de la media obtenida para el tratamiento X_3 presentó los mayores niveles nutricionales, la elevada conductividad eléctrica limitó su

desempeño integral. Por otro lado, el valor promedio de la media obtenida para el tratamiento X_1 presentó características adecuadas, pero menores concentraciones de nutrientes.

En consecuencia, los resultados permiten concluir que el tratamiento X_2, considerando el promedio de sus medias, es la mejor alternativa para la obtención de biol a partir del lodo de levadura gastada de la industria cervecera de la ciudad de Cusco, debido a que combina elevados niveles nutricionales, adecuadas características fisicoquímicas, estabilidad biológica y cumplimiento total de los estándares de calidad establecidos. Asimismo, los hallazgos demuestran que la digestión anaerobia representa una estrategia técnicamente viable para valorizar residuos cerveceros y transformarlos en fertilizantes orgánicos líquidos de alto valor agronómico, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y a los principios de la economía circular.

VI Conclusiones

Los resultados demostraron que la digestión anaerobia influyó significativamente en las características nutricionales del biol obtenido a partir del lodo de levadura gastada de cerveza, evidenciándose diferencias altamente significativas entre tratamientos para todas las variables evaluadas ($p < 0.001$). En este contexto, el tratamiento X_3 (22% de materia seca con digestión anaerobia) presentó las mayores concentraciones de macronutrientes y micronutrientes, alcanzando valores de 14 800 ppm de nitrógeno, 1 620 ppm de fósforo y 5 900 ppm de potasio. Asimismo, se observó un incremento promedio superior al 50% en la mayoría de nutrientes respecto a los tratamientos control, lo que confirma que la digestión anaerobia favorece la mineralización y liberación de elementos esenciales para la nutrición vegetal. Sin embargo, el tratamiento X_2 mostró una composición nutricional elevada y equilibrada, destacando por mantener concentraciones adecuadas de nutrientes junto con parámetros complementarios favorables para su aprovechamiento agrícola.

Se concluye que la digestión anaerobia modificó significativamente las características fisicoquímicas del biol, generando diferencias altamente significativas en todas las variables analizadas ($p < 0.001$). Los tratamientos con DA presentaron una disminución del pH hacia valores ligeramente ácidos, sólidos totales y de las impurezas, además de un incremento de la CE, densidad y cenizas disueltas. Estos cambios evidencian la transformación de la materia orgánica compleja en compuestos minerales solubles y formas más disponibles para las plantas. Entre los tratamientos evaluados, X_2 mostró el mejor equilibrio entre calidad nutricional y estabilidad fisicoquímica, debido a que mantuvo valores dentro de los rangos de referencia para bioles agrícolas, mientras que X_3 presentó una conductividad eléctrica superior al límite óptimo recomendado.

La comparación realizada permitió establecer que los bioles obtenidos mediante digestión anaerobia del lodo de levadura gastada presentan características nutricionales y

fisicoquímicas competitivas frente a los bioles comerciales disponibles en el mercado peruano. Particularmente, los tratamientos X_2 y X_3 superaron ampliamente al biol comercial Alli Allpa en nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica, alcanzando incrementos de hasta catorce veces en fósforo y treinta veces en materia orgánica. Asimismo, la relación C/N obtenido fue comparable a la reportada en bioles premium, evidenciando una adecuada madurez y disponibilidad nutricional. Desde el punto de vista fisicoquímico, los tratamientos X_1 y X_2 cumplieron con todos los rangos de referencia nacionales, mientras que X_3 mostró limitaciones asociadas a su elevada CE. Por lo tanto, el biol producido a partir del lodo de levadura gastada constituye una alternativa técnicamente viable y competitiva frente a productos comerciales convencionales.

De manera integral, se concluye que el tratamiento X_2, correspondiente al lodo de levadura gastada con 12% de materia seca sometido a digestión anaerobia, constituye la alternativa más adecuada para la obtención de biol. Si bien los tratamientos X_1 y X_2 cumplieron con el 100 % de los criterios de calidad evaluados (8 de 8), considerando los parámetros nutricionales y fisicoquímicos el tratamiento X_2 presentó el mejor equilibrio entre la composición nutricional y las propiedades fisicoquímicas (pH y CE), tomando como referencia las características reportadas para bioles comerciales. Asimismo, presentó concentraciones favorables de nutrientes esenciales, presencia de microorganismos benéficos y parámetros fisicoquímicos dentro de los rangos recomendados para su aprovechamiento agrícola. En contraste, aunque el tratamiento X_3 registró mayores concentraciones de nutrientes, su CE excedió el límite óptimo recomendado, lo que podría restringir su aplicación directa en determinados tipos de suelos como arcillosos y salinos. En consecuencia, se determinó que el tratamiento X_2 ofrece la mejor combinación entre calidad agronómica, estabilidad fisicoquímica y viabilidad de aplicación agrícola.

VII Recomendaciones

Se recomienda promover el uso de concentraciones intermedias de materia seca durante la digestión anaerobia del lodo de levadura gastada, debido a que permiten obtener bioles con elevados contenidos nutricionales y una adecuada disponibilidad de macro y micronutrientes para las plantas. Asimismo, es conveniente realizar investigaciones complementarias orientadas a evaluar la dinámica de liberación de nutrientes en diferentes cultivos y condiciones edafoclimáticas, con la finalidad de optimizar las dosis y frecuencias de aplicación del biol obtenido.

Se recomienda implementar un monitoreo permanente de los parámetros fisicoquímicos durante el proceso de digestión anaerobia, especialmente del pH, conductividad eléctrica y demanda química de oxígeno, debido a que estos indicadores permiten evaluar la estabilidad y eficiencia del proceso. De igual manera, se sugiere optimizar los tiempos de retención hidráulica para favorecer una mayor degradación de la materia orgánica y mejorar la calidad final del biol producido.

Se sugiere desarrollar estudios comparativos a escala piloto y comercial que incluyan evaluaciones agronómicas en campo, con el propósito de determinar el desempeño del biol obtenido frente a fertilizantes orgánicos y bioles comerciales en términos de productividad, crecimiento vegetal y rentabilidad económica. Además, resulta pertinente establecer estándares de calidad específicos para bioles elaborados a partir de residuos de la industria cervecera, favoreciendo su futura comercialización y uso masivo.

Se recomienda a las industrias cerveceras de la ciudad de Cusco implementar sistemas de valorización de lodos de levadura gastada mediante digestión anaerobia utilizando condiciones equivalentes al tratamiento X_2, debido a que esta alternativa permite transformar un residuo industrial en un biofertilizante de alta calidad, contribuyendo simultáneamente a la economía circular, la reducción de impactos ambientales y el

fortalecimiento de una agricultura sostenible. Asimismo, se sugiere impulsar investigaciones futuras orientadas al escalamiento industrial del proceso, incluyendo análisis técnicos, económicos y ambientales que permitan consolidar esta tecnología como una estrategia sostenible para la gestión de residuo.

Se sugiere realizar un estudio técnico - económico para el escalamiento de una planta de producción de biol, utilizando el insumo predominante lodo de levadura gastada, considerando principalmente la disponibilidad de la materia prima, análisis de costo y beneficio, así como también la evaluación de los impactos ambientales y sociales asociados a su implementación.

VIII Referencias

Abanto Fatama, J., & Ricopa Vela, D. (2021). Producción de biol, en base a sangre de Sus scrofa domesticus, camal municipal, Lamas.

Adekunle, K., & Okolie, J. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *6(3)*, 205. doi:https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020

Admasu, A., Bogale, W., & Mekonnen, Y. (2022). Experimental and simulation analysis of biogas production from beverage wastewater sludge for electricity generation. *Scientific Reports, 12(1)*. doi:https://doi.org/10.1038/s41598-022-12811-3

Aigboje, E. (2022). Effect of the production processed effluence on the environment: A case study of a typical brewery industry in Nigeria. *Journal of Advances in Science and Engineering, 7(1)*, 9-17.

Al Arif, M., Lucia Tri, S., Estoepangestie, A., & Mirni, L. (2017). The Nutrients Contents, Dry Matter Digestibility, Organic Matter Digestibility, Total Digestible Nutrient, and NH3 Rumen Production of Three Kinds of Cattle Feeding Models. KnE Life Sciences. *3(6)*. doi:https://doi.org/10.18502/kls.v3i6.1142

All Garden. (2024). All Garden. From https://www.facebook.com/all.garden.peru/

Alli , A. (2024). Biol fortificado - Abono liquido natural. From https://www.facebook.com/AlliAllpaAbono

Angus, J. (2012). Fertilizer Science and Technology. In R. A. Meyers (Ed.), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology (pp. 3768-3786). Springer New York. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_193

Arancibia, R., Masaro, J., & Coronel, M. (2024). Latin American beer production and import demand for regional malt and malted barley. *International Journal on Food System Dynamics(2), 15*, 185-203.

Atelge, M., Atabani, A., Banu, J., Krisa, D., Kaya , M., Eskicioglu, C., . . . Duman, F. (2020). A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic

digestion and energy recovery. *Fuel, 270*. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494

Bart, R. (2013). The chemistry of beer: the science in the suds. John Wiley & Sons. doi:https://doi.org/10.1002/9781118733745

Başţabak, B., & Koçar , G. (2020). A review of the biogas digestate in agricultural framework. *22(5)*, 1318-1327. doi:https://doi.org/10.1007/s10163-020-01056-9

Beltrán Ruiz, S. (2015). Obtención de Biol a partir del desecho de levadura utilizado en la cervecería de la empresa Brau Supplies. .

Brentrup, F., Hoxha , A., & Christensen, B. (2016). Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. Conference Paper, The 10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food (LCA Food 2016).

CEPLAN . (2020). Mayor demanda de productos orgánicos. From https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/o11

Chataut, G., Bhatta, B., Joshi , D., Subedi , K., & Kafle, K. (2023). Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. *Journal of Agriculture and Food Research, 11*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533

Dayarathne, H., Angove, M., Aryal, R., Abuel Naga , H., & Mainali, B. (2021). Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. *40*. Journal of Water Process Engineering. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820

Devolli, A., Shahinasi, E., Stafassani, M., Feta, D., & Dara, F. (2018). Evaluation of brewery waste and its reduction methods. Yeast (fermentation). *210*.

Dos Santos Mathias, T., Moretzsohn de Mello, P., & Camporese Sérvulo, E. (2014). Solid wastes in brewing process: A review J. Brew. Distill. *(1), 5*, 1-19.

Drosg , B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., & Linke, B. (2015). Nutrient recovery by biogas digestate processing. *2015*. IEA Bioenergy Dublin. .

Dudek, M., Świechowski, K., Manczarski, P., Koziel, J., & Białowiec, A. (2019). The Effect of Biochar Addition on the Biogas Production Kinetics from the Anaerobic Digestion of Brewers' Spent Grain. *ENERGIES*, 1518. (8, Ed.) 12. From ENERGIES

Duguma , A., Bekele, T., & Geda, A. (2024). Biogas Production through Anaerobic Codigestion of Distillery Wastewater Sludge and Disposable Spent Yeast. *International Journal of Chemical Engineering, 2024*, 5510471. From https://doi.org/10.1155/2024/5510471

Ecocampo. (2024). Bio Fertilizantes Perú. From https://biofertilizantesperu.com/site/agricultura/bioestimulantes/

Espinoza Peña, P. (2020). Evaluación de la calidad del biol producido en biodigestores de tipo semicontinuo usando gallinaza y cáscara de naranja en el centro de investigación de tratamiento de agua y ecosistemas contaminados de la universidad de Huánuco.

Feria, J., Álvarez, R., & Rodriguez, J. (2020). Desinfección de agua cruda con radiación solar (SODIS) para la remoción de coliformes totales. ISSN 0798-1015.

FOSAC. (2024). Línea Agrícola. From https://www.fosacperu.com/linea-agricola/

Gebrehiwet, G. (2019). Investigation of Biogas Production by Co-Digestion of Brewery Wastewater and Brewery Spent Yeast Addis Ababa . University Ethiopia.

Gianoli , A., Hung, , A., & Shiva, C. (2019). Relación entre coliformes totales y termotolerantes con factores fisicoquímicos del agua en seis playas de la bahía de Sechura-Piura 2016-2017. *6(2)*, 62. doi:https://doi.org/10.20453/stv.v6i2.3460

Gil Ramírez, L., Leiva Cabrera, F., Lezama Escobedo, M., Bardales Vásquez, C., & León Torres, C. (2023). Biofertilizante "biol": caracterización física, química y microbiológica. *Revista Alfa, 7(20)*, 336 - 345. doi:https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.219

Gonde, L., Wickham, T., Brink, H., & Nicol, W. (2023). pH-Based Control of Anaerobic Digestion to Maximise Ammonium Production in Liquid Digestate. Water. *15(3)*, 417. From https://www.mdpi.com/2073-4441/15/3/417

Gonzales Campos, V., Lau Wong, J., & Quintanilla Ramirez J.A. (2021). Valorización de Unión de Cervecerías Peruanas Backus y Johnston SAA.

Gustiari, R. (2023). Techno-Economic Analysis of Utilization of Tofu Production Liquid Waste into Liquid Organic Fertilizer Using Experimental Methods. *Journal of Economics Business Industry, 1, 1*, 10 - 18. From https://doi.org/10.59976/jebin.v1i1.8

Hernández, J., Tirado, D., & Beltrán, I. (2014). Captura de carbono en los suelos. *Padi Boletín científico del ICBI*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. From https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n2/e4.html

Hosseinzadeh , A., Gitipour, S., & Mehrdadi, N. (2024). The biogas upgrading from landfill leachate pretreated with low-frequency ultrasonic: anaerobic digestion performances and energy balance. *14*, 652. (1, Trans.) doi:https://doi.org/10.1038/s41598-023-42996-0

Hunter, S., Blanco, E., & Borrion , A. (2021). Expanding the anaerobic digestion map: A review of intermediates in the digestion of food waste. *Science of The Total Environment, 767*. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144265

ICMSF. (2000). Microorganismos de los Alimentos 1: Su significado y Métodos de Enumeración. Editorial Acribia.

INEI. (2019). Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) 2019. From https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/encuesta-nacional-agropecuaria-ena-2019-instituto-nacional-de-estad%C3%ADstica-e-inform%C3%A1tica-inei

Jaeger, A., Arendt, E., Zannini, E., & Sahin, A. (2020). Brewer's Spent Yeast (BSY), an Underutilized Brewing By-Product. Fermentation. *6(4)*.

Kanani, F., Heidari, M., Gilroyed, B., & Pelletier, N. (2020). Waste valorization technology options for the egg and broiler industries: A review and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 262.

Karwacka, M., Ciurzyńska , A., Lenart, A., & Janowicz , M. (2020). Sustainable Development in the Agri-Food Sector in Terms of the Carbon Footprint: A Review. Sustainability. *12(16)*, 6463. From https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6463

Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. Sustainability. *15(3)*. From https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2338

Kunz, A., Steinmetz, R., & Do Amaral, A. (2022). Fundamentals of anaerobic digestion, biogas purification, use and treatment of digestate.

Lal, R., Negassa , W., & Lorenz, K. (2015). Carbon sequestration in soil. Current Opinion in Environmental Sustainability. *15*, 79-86.

Leiva Trujillo, B. (2018). Elaboración de biofertilizante a partir de estiércol de ganado vacuno y efluente del proceso de fermentación cervecera mediante fermentación homoláctica.

Liu, M., Wei, Y., & Leng , X. (2021). Improving biogas production using additives in anaerobic digestion: A review. *297*.

Lockhart, S., Keller, C., Evans , R., Carpenter Boggs, L., & Huggins, D. (2023). Soil CO2 in organic and no-till agroecosystems. Agriculture, Ecosystems & Environment. *349*. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108442

Lonhienne, T., Mason, M., Ragan, M., Hugenholtz, P., Schmidt, S., & Paungfoo Lonhienne , C. (2014). Yeast as a Biofertilizer Alters Plant Growth and Morphology. *Crop Science, 54(2)*, 785-790. From https://doi.org/https://doi.org/10.2135/cropsci2013.07.0488

López Astudillo, A., Rodríguez, L., Lubo, C., Abadía López, J., Orozco, O., Sandoval, J., & Arenas, F. (2018). Evaluación de las emisiones de GEI por fertilización del cultivo de caña de azúcar, desde un enfoque en dinámica de sistemas. *Ingeniería y*

Desarrollo, 36, 3 - 17. From http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612018000100003&nrm=iso

Mallki. (2024). Abonos para la agricultura. From http://www.mallki.pe/industria#bloque-productos

Marianna , M., Attila, T., & Viktória , O. (2012). Digestate: A New Nutrient Source - Review. In K. Sunil (Ed.), Biogas (pp. Ch. 14). *IntechOpen*. doi:https://doi.org/10.5772/31355

MIDAGRI. (2022). Panorama nacional e internacional del mercado de fertilizantes inorgánicos. From http://hdl.handle.net/20.500.13036/1226

MIDAGRI. (2023). Reglamento de Fertilizantes y Sustancias Afines. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego Retrieved from. From https://www.gob.pe/institucion/senasa/informes-publicaciones/4281160-proyecto-de-reglamento-de-fertilizantes-y-sustancias-afines

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences, 12(3)*, 242-257.

Moreno, L. (2022). Crisis de fertilizantes: los problemas en Perú para satisfacer su demanda. Diálogo Chino. From https://dialogochino.net/es/agricultura-es/57839-crisis-de-fertilizantes-los-problemas-en-peru-para-satisfacer-su-demanda/

Morgan, D., Styles, D., & Lane, E. (2021). Thirsty work: Assessing the environmental footprint of craft beer. Sustainable Production and Consumption. *27*, 242-253.

Muñoz , H. (2020). Análisis de los parámetros de calidad del agua del efluente del río muerto para su posible reutilización del Cantón Manta, Ecuador. *5(2)*, 579–604.

Neves, A. (2019). Brewery and olive oil industries: wastes valorisation by anaerobic digestion.

Newton, P., Civita , N., Frankel Goldwater, L., Bartel, K., & Johns , C. (2020). What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based

on Processes and Outcomes [Review]. *4*. From https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723

Nie, E., He, P., Zhang, H., Hao, L., Shao, L., & Lü , F. (2021). How does temperature regulate anaerobic digestion? Renewable and sustainable energy reviews. *150*. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111453

Nurliyana, M., Sahdan, M., Wibowo, K., Muslihati, A., Saim, H., Ahmad , S., . . . Mansor , Z. (2018). The Detection Method of Escherichia coli in Water Resources: A Review. *995(1)*. doi:https://doi.org/10.1088/1742-6596/995/1/012065

Olajire, A. (2020). The brewing industry and environmental challenges. Journal of Cleaner Production,. *256(102817)*. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.003

Ozlu, E., Arriaga , F., Bilen, S., Gozukara, G., & Babur, E. (2022). Carbon Footprint Management by Agricultural Practices. *Biology, 11(10)*. From https://www.mdpi.com/2079-7737/11/10/1453

Pérez, W., & Torres Bazurto, J. (2020). Carbon-nitrogen ratio in soils with fertilizer applications and nutrient absorption in banana (Musa spp.) cv. Williams. Agronomía Colombiana. *(38)*, 253-260. From http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652020000200253&nrm=iso

Picó, Y., & Barceló, D. (2020). Pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry in environmental analysis: Focus on organic matter and microplastics. *130*. TrAC Trends in Analytical Chemistry. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115964

Poisson, G., Kortz, H., Field, J., Fleury, N., & Kmiotek, S. (2021). Brewing Process Optimization: Mash Efficiency Worcester Polytechnic . USA: Institute Worcester.

Pramanik, S., Suja, F., Zain , S., & Pramanik , B. (2019). The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. *Bioresource*

Technology Reports, 8. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310

Punia Bangar, S., Suri , S., Trif, M., & Ozogul, F. (2022). Organic acids production from lactic acid bacteria: A preservation approach. 46. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101615

Rehberger, E., West , P., Spillane , C., & McKeown, P. (2023). What climate and environmental benefits of regenerative agriculture practices? an evidence review. *5(5)*. doi:https://doi.org/10.1088/2515-7620/acd6dc

Rivera, M., Caracela, E., & Morales, L. (2020). Proceso de compostaje por Saccharomyces cerevisiae en una institución educativa en Perú. Orbis.

Rodríguez, R. A. (2020). “Descripción de las propiedades insecticidas en el aspecto agrícola .

Rojas Salas, V. (2023). Elaboración de abono liquido (biol) mediante biodigestor a partir de vísceras de pollo y pescado de la zona metropolitana de Huánuco, Huánuco 2022. .

Rubiños, C. (2021). La Desertificación y sequía: una consecuencia directa en nuestras vidas. Centro de investigación Universidad del Pacifico. From https://ciup.up.edu.pe/analisis/la-desertificacion-y-sequia-una-consecuencia-directa-en-nuestras-vidas/#:~:text=En%20Per%C3%BA%2C%20las%20principales%20causas,y%20erosi%C3%B3n%20e%C3%B3lica%20e%20h%C3%ADdrica

Salazar Tijerino, M., San Martín González, M., Velasquez Domingo, J., & Huang, J.-Y. (2023). Life Cycle Assessment of Craft Beer Brewing at Different Scales on a Unit Operation Basis. Sustainability. *(14), 15*, 11416. From https://www.mdpi.com/2071-1050/15/14/11416

San Martin, D., Ibarruri, J., Iñarra, B., Luengo, N., Ferrer, J., Alvarez Ossorio, C., . . . Zufía, J. (2021). Valorisation of Brewer’s Spent Yeasts’ Hydrolysates as High-

Value Bioactive Molecules. Sustainability. *13(12)*. From https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6520

Schreefel, L., Schulte, R., De Boer, I., Schrijver, A., & Van Zanten, H. (n.d.). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security, 26*. doi: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404

Sicchieri, I., De Quadros, , T., Bortoloti, M., Fernandes , F., & Kuroda, E. (2022). Selection, composition, and validation of standard inoculum for anaerobic digestion assays. *Biomass and Bioenergy*, 164. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106558

Sifuentes Estrada, L. (2023). Revaloración de levadura (Saccharomyces cerevisiae) residual del proceso de elaboración de cerveza y obtención de fertilizante orgánico.

Sifuentes Estrada, L. (2023). Revaloración de levadura (Saccharomyces cerevisiae) residual del proceso de elaboración de cerveza y obtención de fertilizante orgánico. .

Sosa Hernández, O., Parameswaran, P., Alemán Nava, G., Torres, C., & Parra Saldívar, R. (2016). Evaluating biochemical methane production from brewer's spent yeast. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 43(39)*, 1950-1204. doi:https://doi.org/10.1007/s10295-016-1792-0

Stewart, G. (2017). Introduction. In Brewing and Distilling Yeasts . *Springer International Publishing, 1*, 1-9. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-69126-8_1

Stewart, G. (2017). Introduction. In Brewing and Distilling Yeasts (1 ed., pp. 1-9). Springer International Publishing. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-69126-8_1

Ullah Khan, I., Hafiz Dzarfan Othman, M., Hashim, H., Matsuura , T., Ismail, A., Rezaei DashtArzhandi, M., & Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy conversion and management, 150*, 277-294. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035

Umego, E., & Barry Ryan, C. (2023). Review of the valorization initiatives of brewing and distilling by-products. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 1-17. From https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2198012

Van, D., Fujiwara, T., Leu Tho, B., Song Toan, P., & Hoang Minh, G. (2020). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research, 25(1)*, 1-17. doi:https://doi.org/10.4491/eer.2018.334

Voisin , R., Horwitz, P., Godrich, S., Sambell, R., Cullerton, K., & Devine, A. (2024). What goes in and what comes out: a scoping review of regenerative agricultural practices. *48(11)*, 124-158.

Wackernagel, M., & Lin, D. (n.d.). Ecological Footprint. In N. Wallenhorst & C. Wulf (Eds.), Handbook of the Anthropocene: Humans between Heritage and Future (pp. 585-590). doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-25910-4_93

Walling, E., & Vaneeckhaute, C. (2020). Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: A review of emission factors and their variability. *276*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111211

Wang, W., & Lee, D. (2021). Valorization of anaerobic digestion digestate: A prospect review. 323. doi:https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124626

Yusuf Abdulkarim, A., Abdulsalam, S., El Nafaty, U., & Muhammad, I. (2019). Bio-Fertilizers via Co-Digestion: a Review. .

Zambrano, K. A. (2020). “Efecto de tierra de diatomeas en el control de gorgojo del maíz (Sitophilus zeamais) en las zonas de Buena Fe, Quevedo y Mocache”. Quevedo, Ecuador.

Zanki, A., Mohammad , F., Hashim, K., Muradov, M., Kot, P., Kareem, M., & Abdulhadi, B. (2020). Removal of organic matter from water using ultrasonic-assisted electrocoagulation method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. *888(1)*. doi:https://doi.org/10.1088/1757-899X/888/1/012033

Zurek, M., Ingram, J., Sanderson Bellamy, A., Goold, C., Lyon, C., Alexander, P., . . . Withers, P. (2022). Food System Resilience: Concepts, Issues, and Challenges. Annual Review of Environment and Resources. *47*, 511-534. doi: https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-050744

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes