



Formulación de un herbicida ecológico a base de *Theobroma cacao* L. e hidróxido de potasio

Formulation of an ecological herbicide based on *Theobroma cacao* L. and potassium hydroxide

Davis Bonilla Luzón^{1*} 
Ariana Sarmiento Cueva¹ 
Jaime Maza Maza¹ 
Hugo Romero Bonilla² 

1. Universidad Técnica de Machala, Carrera de Ingeniería Ambiental,
Machala, Ecuador
2. Universidad Técnica de Machala, Grupo de Investigación de Aplicaciones
Electroanalíticas y Bioenergía, Carrera de Ingeniería Química, Machala,
Ecuador

*Autor para correspondencia: asarmient3@utmachala.edu.ec

RECIBIDO: 26/08/2025

ACEPTADO: 23/10/2025

PUBLICADO: 05/01/2026

RESUMEN

El uso excesivo de herbicidas sintéticos genera impactos negativos en la salud humana, la biodiversidad y la calidad del suelo. En Ecuador, la dependencia de estos productos ha ido en aumento, lo que plantea la necesidad de generar alternativas sostenibles. Este estudio tuvo como objetivo formular un herbicida ecológico a base de mucílago de *Theobroma cacao* L. fermentado y la incorporación de hidróxido de potasio obtenido de cáscaras de banano. La metodología comprendió: recolección y fermentación del mucílago con *Saccharomyces cerevisiae*; obtención de KOH mediante calcinación, extracción y conversión química; formulación de distintos tratamientos combinando mucílago y KOH; y evaluación en campo sobre tres especies de arvenses dominantes: *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Centrathurum punctatum* Cass., y *Cuphea strigulosa* Kunth. Se midió cobertura, biomasa, grado de afectación y parámetros edáficos pre y post aplicación. El mucílago fermentado presentó alta producción de ácidos orgánicos y niveles de potasio capaces de inducir fitotoxicidad. Los tratamientos T0 (100 % mucílago) y T3 (75 % mucílago + KOH) fueron los más efectivos, alcanzando hasta 91 % de control en *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, mientras que *Cuphea strigulosa* Kunth mostró mayor resistencia. Además, el producto no afectó negativamente las propiedades del suelo y, en algunos casos, incrementó carbono y materia orgánica. Se concluye que el herbicida ecológico posee eficacia selectiva y beneficios edáficos, representando una alternativa viable para el manejo agroecológico de arvenses y la reducción del uso de herbicidas sintéticos.

Palabras clave: Herbicida ecológico, Mucílago de cacao, Hidróxido de potasio, *Theobroma cacao* L, arvenses

■ ABSTRACT

The excessive use of synthetic herbicides, particularly glyphosate, negatively affects human health, biodiversity, and soil quality. In Ecuador, dependence on these products has increased, highlighting the need for sustainable alternatives. This study aimed to formulate an ecological herbicide based on fermented *Theobroma cacao* L. mucilage combined with potassium hydroxide derived from banana peels. The methodology included: collection and fermentation of cacao mucilage with *Saccharomyces cerevisiae*; extraction and chemical conversion of KOH from banana peel ash; formulation of treatments with different mucilage to KOH ratios; and field evaluation on three dominant weed species: *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Centratherum punctatum* Cass., y *Cuphea strigulosa* Kunth. Effectiveness was assessed through visual damage, weed coverage, biomass, and soil properties before and after application. Results showed that fermented mucilage produced high levels of organic acids and potassium capable of inducing phytotoxicity. Treatments T0 (100 % mucilage) and T3 (75 % mucilage + KOH) were the most effective, achieving up to 91 % control of *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, whereas *Cuphea strigulosa* Kunth was more resistant. Additionally, soil analysis revealed no adverse effects, with some treatments increasing carbon and organic matter content. The study concludes that the ecological herbicide demonstrates selective efficacy and potential agronomic benefits, making it a viable sustainable alternative for weed management and reducing reliance on synthetic herbicides.

Keywords: Ecological herbicide, Cacao mucilage, Potassium hydroxide, *Theobroma cacao* L, Weeds

■ INTRODUCCIÓN

Los agroecosistemas integran componentes bióticos y abióticos para la producción de alimentos, incluyendo cultivos, suelo, agua y clima. El manejo agroecológico busca reducir la dependencia de agroquímicos y promover prácticas sostenibles, como el reciclaje de nutrientes y la conservación de la biodiversidad, enfocándose en la transición hacia una agricultura sustentable que mejora la salud del suelo y optimiza las funciones de los ecosistemas. (Muentes Rodríguez et al., 2023; Saenz Lituma, 2025)

La expansión de monocultivos y la agricultura tecnificada han incrementado el uso de herbicidas sintéticos, afectando negativamente a los ecosistemas. En este contexto, los bioherbicidas surgen como una alternativa sostenible, reduciendo la dependencia de estos productos químicos y contribuyendo a la preservación de la salud del suelo, la calidad del agua y la biodiversidad, elementos clave para el equilibrio ecológico (Nath et al., 2024; Petraki et al., 2024).

A nivel mundial, los herbicidas representan el 47,5 % de los 2 millones de toneladas de pesticidas aplicados anualmente (Sharma et al., 2019). El glifosato, con ventas superiores a 1 500 millones de dólares y una proyección de 2 000 millones en cinco años, es el más utilizado, lo que equivale a más de 40 000 toneladas de ingrediente activo (Velasco Aguiar, 2024). Su uso ha aumentado la productividad agrícola, pero se asocia con problemas de salud como infertilidad y daños renales y neurológicos. En Francia, los niveles de glifosato en la orina de los agricultores pueden llegar hasta 9,5 µg/L, exponiendo a los trabajadores agrícolas a riesgos significativos (Balderrama Carmona et al., 2020).

En Ecuador, la FAO (2022) reporta que la importación de herbicidas aumentó de 7 634 toneladas en 2000 a 14 215 en 2022, evidenciando una creciente dependencia. El Instituto Nacional de Estadística y Censos (2021) indica que el 79,6 % de los cultivos transitorios y el 56,5 % de los permanentes utilizan insumos químicos. En la provincia de El Oro, los pesticidas se aplican con mayor frecuencia y toxicidad que la recomendada,

lo que incrementa los riesgos ambientales y de salud.

A pesar de las evidencias de impacto, los estudios sobre estrategias sostenibles para el manejo de malezas son limitados. Se han explorado alternativas ecológicas como extractos de aceite de clavo, vinagre de madera (Chu et al., 2022) y productos derivados de subproductos agrícolas. Un ejemplo relevante es el mucílago de cacao, un residuo de *Theobroma cacao* L., que contiene compuestos orgánicos y nutrientes con potencial herbicida (Marín Cuevas et al., 2024).

Por otro lado, Pesticide Research Institute (2015), indica que el hidróxido de potasio altera el equilibrio ácido-base celular y provoca la muerte de las malezas. Además, los compuestos fenólicos y alelo químicos presentes en las cáscaras y hojas de banano inhiben la germinación y el crecimiento de especies indeseadas, contribuyendo a reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos, (Roy et al., 2006; Wani y Dhanya, 2025).

Este estudio tiene como objetivo formular un herbicida ecológico a base de mucílago de *Theobroma cacao* L. e hidróxido de potasio, evaluando su eficacia como alternativa sostenible para el control de arvenses en cultivos agrícolas. Los resultados se centrarán en: i) caracterizar el mucílago de *Theobroma cacao* L. como ingrediente activo en la formulación del herbicida, combinándolo con hidróxido de potasio derivado de cáscaras de banano; ii) evaluar su eficacia en diferentes dosificaciones, midiendo la reducción de cobertura de malezas en transectos y la biomasa verde, aplicando ANOVA y la prueba de Tukey para identificar diferencias significativas entre tratamientos, así como evaluar visualmente su impacto sobre *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Centratherum punctatum* Cass., y *Cuphea strigulosa* Kunth, especies dominantes de la zona; iii) analizar el efecto del herbicida sobre las propiedades edáficas antes y después de su aplicación.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se desarrolló en dos escenarios. El primero, correspondiente a la formulación del herbicida ecológico, se realizó en el laboratorio de electroquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud de la Universidad Técnica de Machala (UTMACH), ubicada en la Avenida Panamericana Km 5½, vía a Pasaje, con un clima cálido (temperaturas entre 26 °C y 31 °C y precipitación anual de 257,7 mm). El segundo escenario, para la aplicación y evaluación del producto, se ubicó en la finca cacaotera Santo Tomás, a 700 metros de Galayacu, en la parroquia Casacay, cantón Pasaje, con una temperatura media anual de 24 °C, precipitación promedio de 943 mm y humedad relativa del 73 % (Figura 1).

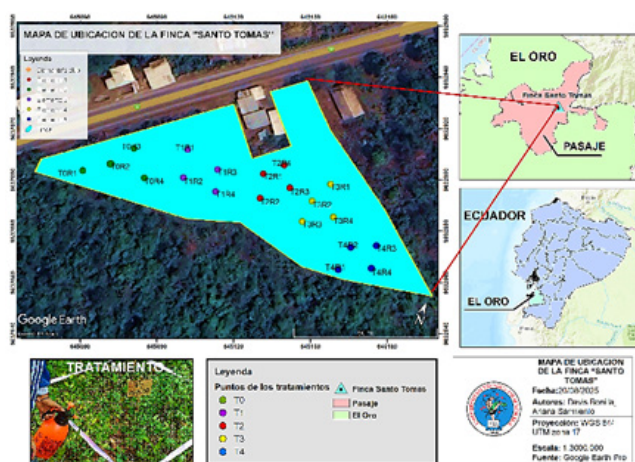


Figura 1. Mapa de ubicación de la finca “Santo Tomás”

Materiales y reactivos

Entre los equipos y materiales empleados en la investigación se incluyen: molino mecánico, mufla, fermentador, cocineta eléctrica, balanza analítica, tamizador, mortero, vasos de precipitación, pipeta, cofia, estufa, papel filtro N° 10, centrifugador, refractómetro digital y tubos de ensayo. Los reactivos utilizados durante la fase experimental fueron *Saccharomyces cerevisiae*, agua destilada, azúcar, fosfato de amonio y ácido clorhídrico.

Metodología

La investigación se desarrolló con un enfoque experimental y cuantitativo. El diseño experimental evaluó el efecto de las variables concentración de mucílago, tiempo de fermentación y proporción de KOH sobre la eficacia del producto en el control de arvenses. El enfoque cuantitativo permitió medir parámetros clave, como la capacidad de quema y el índice de control. Además, se analizaron parámetros edáficos y se aplicaron técnicas de análisis para caracterizar el producto final y verificar su estabilidad y efectividad.

El proceso de producción y evaluación del herbicida ecológico constó de las siguientes etapas: Escenario de laboratorio: i) recolección y selección de la materia prima; ii) formulación del herbicida ecológico, que incluyó la fermentación del mucílago de cacao y la obtención de hidróxido de potasio a partir de cáscaras de banano. Escenario de campo: iii) evaluación de la eficacia del herbicida ecológico; e iv) análisis del efecto del herbicida sobre las propiedades edáficas. A continuación, se presenta un diagrama que ilustra el proceso estructural de la investigación (ver Figura 2).

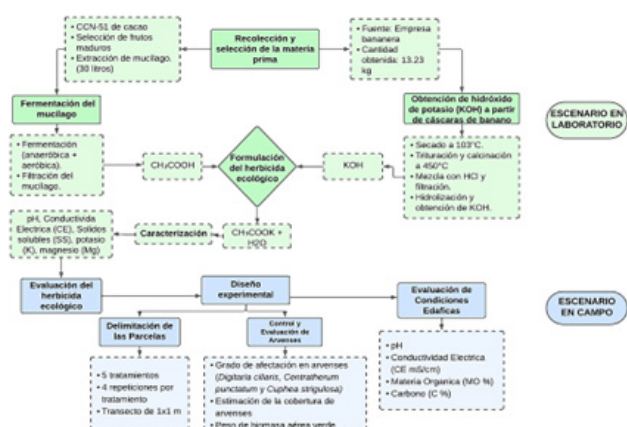


Figura 2. Diagrama de Flujo del Proceso de Producción y Evaluación del herbicida Ecológico

Recolección y selección de la materia prima

Para obtener el mucílago de cacao se utilizó la variedad Colección Castro Naranjal 51 (CCN-51). El proceso comenzó con la recolección de

frutos en su óptimo estado de madurez, lo que garantiza un producto de alta calidad. Luego, los frutos fueron colocados en una superficie inclinada de decantación, permitiendo que el mucílago se separara naturalmente por gravedad hacia un sistema de tuberías, canalizándolo al contenedor de recolección. A partir de 164 kg de frutos frescos se obtuvieron 30 L de mucílago, que fueron almacenados a 24 °C. El KOH se extrajo de 13,23 kg de cáscaras de banano residual de la industria alimentaria, obteniendo finalmente 20 g de KOH.

Formulación del herbicida ecológico

Fermentación del mucílago de *Theobroma cacao* L.

En esta fase se optimizaron las condiciones para favorecer el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*, levadura clave en la transformación de los compuestos del mucílago. Se preparó una solución con 200 mL de agua destilada, 50 g de sacarosa como fuente de carbono y 1 g de fosfato de amonio $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ como fuente de fósforo. Se incorporaron 5 g de *S. cerevisiae*, un microorganismo no patógeno comúnmente utilizado en investigaciones científicas que posee una alta eficiencia en la fermentación de azúcares presentes en el mucílago. Según la normativa ecuatoriana vigente, no fue necesaria aprobación ética ni de bioseguridad, ya que no se emplearon organismos genéticamente modificados ni materiales de riesgo biológico. La mezcla se homogeneizó con el mucílago y se incubó a 25 °C, con 70 % de humedad relativa y en oscuridad, bajo condiciones controladas para garantizar un proceso fermentativo eficiente y libre de contaminación.

La fermentación se desarrolló en dos fases: una anaeróbica de 72 horas seguida de una aeróbica de 96 horas, durante la cual el fermentador se cubrió con una cofia para regular el ingreso de oxígeno. Se realizaron cuatro muestreos para evaluar la dinámica temporal de los azúcares totales (ATC) y la variación del pH durante la actividad microbiana. Los muestreos se realizaron en tres

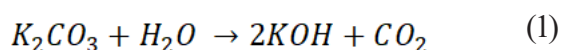
momentos a lo largo de siete días consecutivos: día 1 (29 de abril), día 2 (02 de mayo) y día 3 (05 de mayo), con intervalos de 24 horas. Esto permitió registrar la evolución de las variables bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. Al finalizar ambas fases, el mucílago fermentado se filtró para separar la biomasa de levadura y otros sólidos, obteniendo ácido acético (CH_3COOH) como principal componente activo.

Estadísticamente, el procesamiento de datos se efectuó en OriginPro 2022 (OriginLab Corporation, USA), aplicando una regresión polinómica cuadrática para el ajuste de curvas con un nivel de confianza del 95 %. Las diferencias entre los días de muestreo se analizaron mediante un ANOVA de una vía, complementado con la prueba post hoc de Tukey ($p < 0,05$). Asimismo, la relación entre el contenido de azúcares (ATC) y el pH se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson (r) para determinar la fuerza y dirección de su asociación lineal.

Obtención de hidróxido de potasio (KOH) a partir de cáscaras de banano

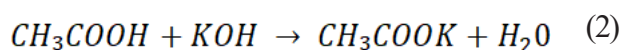
El proceso para obtener hidróxido de potasio (KOH) comenzó con el secado de cáscaras de banano a 103 °C durante 48 h, según la norma ASTM (2024), para reducir su humedad. Luego, el material seco se trituró en un molino, obteniéndose 1 114 g de polvo, que se calcinó a 450 °C durante 2 horas, produciendo 200 g de residuo sólido. Este residuo se mezcló con 800 mL de HCl 2 M y se agitó durante 4 h. La solución obtenida se filtró y concentró por evaporación a 140 °C durante 10 horas, obteniendo 250 g de cristales de carbonato de potasio (K_2CO_3).

La conversión de (K_2CO_3) a KOH se realizó mediante hidrólisis, disolviendo los cristales en 223 mL de agua destilada. Durante esta reacción, que se puede representar químicamente, según la ecuación 1.



La reacción liberó CO_2 , evidenciando la transformación. La solución resultante se evaporó nuevamente a 140 °C durante 10 h, obteniéndose 20 g de cristales de KOH.

Finalmente, la reacción entre ácido acético (CH_3COOH) y KOH dio lugar a la formación de acetato de potasio (CH_3COOK) y agua (H_2O), según la ecuación 2.



Donde el hidróxido de potasio neutraliza al ácido acético, liberando el ion hidrógeno (H^+), que se combina con el ion hidróxido (OH^-) para formar agua, mientras el ion potasio (K^+) se une al anión acetato (CH_3COO^-).

Caracterización del mucílago de cacao

Para la caracterización, se analizaron las propiedades físicas y químicas del mucílago, incluyendo sólidos solubles (SS), conductividad eléctrica (CE), pH, potasio (K) y magnesio (Mg), en el laboratorio certificado LASA (SAE LE 1C 06-002). No se realizaron réplicas debido a que las muestras fueron homogenizadas previamente bajo condiciones controladas, lo que asegura su uniformidad y minimiza la variabilidad, especialmente en materiales líquidos o semilíquidos mantenidos en condiciones constantes (FAO, 2004).

La concentración de sólidos solubles se determinó mediante refractometría, que mide el índice de refracción de la muestra, el cual varía con la concentración de solutos, especialmente azúcares, siendo adecuada para soluciones líquidas como el mucílago (Zentile et al., 2024). La conductividad eléctrica (CE) se midió con un conductímetro calibrado con soluciones patrón de KCl, expresada en $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, reflejando la concentración total de sales disueltas y la capacidad de la solución para conducir corriente (Rebello et al., 2020). El pH se determinó con un potenciómetro digital calibrado con soluciones buffer pH 4, 7 y 10, evaluando la acidez o alcalinidad, factores clave para la estabilidad del mucílago. La cuantificación de K y Mg se realizó mediante espectrometría de

masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), técnica de alta sensibilidad que permite detectar metales en concentraciones traza con alta precisión (Ríos Lugo y Hernández Mendoza, 2020).

Evaluación del herbicida ecológico

Se establecieron cinco tratamientos experimentales: (i) tratamiento testigo (T0), compuesto solo por 100 % de mucílago de cacao; (ii) T1, con 50 % de mucílago y 50 % de agua, sin KOH; (iii) T2, con 50 % de mucílago, 50 % de agua y 50 mL de solución diluida de KOH; (iv) T3, con 75 % de mucílago, 25 % de agua y 50 mL de solución diluida de KOH; y (v) T4, con 25 % de mucílago, 75 % de agua y 50 mL de solución diluida de KOH. La solución de KOH se preparó disolviendo 5 g de cristales en 1 000 mL de agua destilada, obteniendo una concentración al 0,5 % (p/v), para reducir su corrosividad y facilitar su manejo seguro (Basori et al., 2023). De esta solución se extrajeron 50 mL para los tratamientos T2, T3 y T4, según lo indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Formulación del herbicida ecológico por tratamientos

Tratamientos	Mucílago de cacao (mL)	KOH (mL)	Agua (mL)
T0	1 000	0	0
T1	500	0	500
T2	500	50	500
T3	750	50	250
T4	250	50	750

Fuente: Los autores

Diseño experimental

Para el análisis experimental, se establecieron cuatro repeticiones por tratamiento, totalizando 20 unidades experimentales. El número de repeticiones se determinó según criterios estadísticos para garantizar la detección de diferencias significativas con un nivel de confianza del 95 %, siguiendo el diseño completamente al azar (DCA) en estudios de campo. Cada repetición correspondió a un transecto de 1 metro², seleccionado en áreas con distribución homogénea de arvenses, predominando *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Centratherum punctatum*

Cass., y *Cuphea strigulosa* Kunth. Las parcelas fueron delimitadas e identificadas individualmente para facilitar su reconocimiento y manejo durante el experimento.

Se emplearon cinco bombas de fumigación manual tipo pulverizador, asignadas individualmente a cada tratamiento para evitar contaminación cruzada entre soluciones. La dosis se aplicó conforme a la formulación del herbicida ecológico, realizando las aplicaciones a intervalos de siete días, completando un ciclo de tratamiento de 21 días.

Para determinar la efectividad del herbicida, se emplearon tres métodos complementarios: (i) evaluación visual del grado de afectación fitotóxica en arvenses de las especies *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Centratherum punctatum* Cass., y *Cuphea strigulosa* Kunth, mediante una calificación estandarizada del daño inducido por el tratamiento de control (Marín Cuevas et al., 2024); (ii) método de cuadrantes para la estimación de la cobertura de arvenses en los transectos (De Stefano et al., 2021; Loza Del Carpio y Taype Huamán, 2021); e (iii) determinación del peso de la biomasa aérea verde (Fonseca, 2017).

En la evaluación visual del grado de afectación, se asignó un porcentaje de efectividad basado en la apariencia de las arvenses tras la aplicación del herbicida. Previo al tratamiento, se identificaron las especies para observar su respuesta y determinar su susceptibilidad en tres periodos de evaluación: a los 7, 14 y 21 días posteriores, con muestreo semanal. En cada evaluación se registró el porcentaje de afectación foliar o fisiológica. Las categorías de calificación fueron: 0-20 % (Pobre), con daño mínimo y sin control visible; 20-40 % (Regular), con signos de estrés y persistencia de la maleza; 40-60 % (Bueno), con daño parcial; 60-80 % (Muy bueno), con alto daño o mortalidad completa; y 80-100 % (Excelente), con eliminación casi total de la maleza.

La cobertura total de arvenses en los transectos se determinó mediante una metodología combinada. Primero, siguiendo lo propuesto por Loza Del Carpio & Taype Huamán (2021), se establecieron transectos de 1 m² divididos en 16 secciones de 25 × 25 cm, lo que permitió una observación más

precisa de la distribución espacial de las arvenses. Dado que este método no cuantifica porcentajes, la estimación de la cobertura se realizó según lo indicado por De Stefano et al. (2021), calculando la cobertura como el porcentaje de unidades ocupadas en relación con el total de unidades evaluadas, como se detalla en (3).

$$\text{Cobertura de arvenses \%} = (\text{NC} / \text{NTS}) * 100 \quad (3)$$

Donde, *NC*, son los números de secciones cubiertas; *NTS*, es el número total de secciones y 100 es el factor porcentual.

Para la determinación de la biomasa verde, a los 21 días posteriores a la aplicación del tratamiento se recolectaron hojas y tallos de las arvenses sobrevivientes en cada transecto. El material vegetal fue pesado considerando las cuatro repeticiones de cada tratamiento. Con los datos obtenidos se calculó el peso total y el promedio por tratamiento.

El análisis estadístico de los tres métodos de evaluación se realizó en OriginPro 2022. Se verificaron previamente los supuestos de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Luego, se aplicó un ANOVA de dos vías (tratamiento $\times$ tiempo) con un nivel de significancia de $p < 0,05$ para identificar diferencias significativas entre los factores evaluados. Las comparaciones de medias se hicieron mediante la prueba post hoc de Tukey HSD. El grado de afectación se presentó con curvas de tendencia y errores estándar, la cobertura total de arvenses con diagramas de caja, y la biomasa aérea verde con barras $\pm$ EE, utilizando letras distintas para señalar diferencias significativas entre tratamientos.

Evaluación pre y post aplicación sobre las propiedades edáficas.

Se analizaron 10 muestras de suelo correspondientes a cinco tratamientos en dos momentos de muestreo (día 0 y día 30). En cada tratamiento se recolectaron tres submuestras aleatorias a 0–30 cm de profundidad, las cuales se homogenizaron para formar una muestra compuesta por tratamiento y momento.

Las condiciones del suelo medidas fueron el pH y la CE, utilizando un medidor multiparámetro, con una relación suelo:agua de 1:2 (10 g de suelo y 20 mL de H₂O) (Delgado, 2019). El contenido de C se determinó mediante el método de ignición, pesando la muestra, calentándola a 600 °C en una mufla y volviendo a pesarla; la pérdida de peso correspondió al contenido de C (Boyle et al., 2024). La MO se estimó multiplicando el valor de C (%) por el factor 1,724 para evaluar los efectos de los tratamientos sobre la calidad y composición del suelo (Izquierdo Bautista Jaime y Arévalo Hernández, 2021). Para el análisis estadístico, se aplicó un ANOVA de medidas repetidas (tratamiento $\times$ tiempo) con un nivel de significancia de $p < 0,05$, con análisis de medias y representación mediante curvas comparativas Pre–Post, integrando los resultados inferenciales y descriptivos para mostrar los efectos del tratamiento sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo.

■ RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica del mucílago de cacao fermentado

En la figura 3, el análisis del gráfico combinado revela que la dinámica de consumo de azúcares (ATC) durante la fermentación presenta patrones contrastantes entre las muestras, correlacionados con la variación del pH. En las muestras 3 y 4, se observó una fase de máxima actividad fermentativa entre los días 2 y 4, con reducciones de azúcares del 60 % al 69 %, coincidiendo con la caída del pH de 4 a 3, lo que indica alta producción de ácidos orgánicos y mayor eficiencia microbiana. En contraste, las muestras 1 y 2 mostraron un consumo más gradual (-2 % a -20 %), con disminuciones significativas solo entre los días 4 y 7, sugiriendo una fermentación más lenta, posiblemente debido a una menor concentración de azúcares fermentables o a menor actividad enzimática. La correlación temporal entre la reducción de azúcares y la acidificación confirma que los días 2–4 constituyen la etapa crítica del proceso.

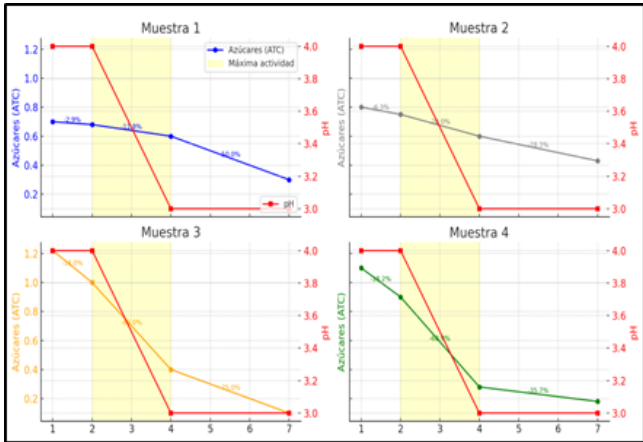


Figura 3. Evolución de azúcares y pH por muestra con tasas de consumo (%); máxima actividad fermentativa.

Al término de la fermentación (Tabla 2), el extracto revela un alto potencial por efectos fisicoquímicos y fisiológicos combinados. La CE fue de $0,55 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, reflejando alta concentración de iones disueltos derivados de la degradación de azúcares y compuestos orgánicos del mucílago. El contenido de SS alcanzó $5,5^\circ \text{Brix}$, coherente con el consumo de azúcares por *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de ácidos orgánicos. El K^+ presentó niveles inferiores a $3\,411 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, suficientes para inducir fitotoxicidad al alterar la osmorregulación celular y provocar estrés hídrico. El Mg^{2+} ($269,4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), aunque menos fitotóxico, es esencial para la fotosíntesis y funciones enzimáticas.

Tabla 2. Medición de propiedades fisicoquímicas del extracto fermentado de mucílago

Parámetros físico-químicos	Cantidad
CE (dS/m)	0,55
SS ($^\circ \text{Brix}$)	5,5
K^+ (mg/kg)	<3 411
Mg^{2+} (mg/kg)	269,4

Fuente: Los autores

Eficacia del herbicida ecológico por tratamientos sobre las arvenses

La figura 4 y el análisis estadístico mostraron diferencias significativas ($p < 0,001$) en el grado de afectación de *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Centratherum punctatum* Cass. y *Cuphea strigulosa*

Kunth entre los tratamientos. La magnitud del efecto varió según la especie y el momento de evaluación, indicando una respuesta no uniforme de las arvenses. *Digitaria ciliaris* mostró la mayor susceptibilidad, alcanzando un $91,25 \pm 1,26 \%$ de control con T3 a los 21 días, superando el umbral del 70 %. *Centratherum punctatum* se acercó al umbral con T0 y T3, registrando un máximo de $63,00 \pm 1,83 \%$ a los 21 días. *Cuphea strigulosa* tuvo la menor respuesta, sin alcanzar el umbral en ningún tratamiento, aunque T0 y T3 mostraron incrementos progresivos, mientras que T4 registró el valor más bajo, $5,00 \pm 1,41 \%$. En términos generales, los tratamientos T3 y T0 se destacaron como los más efectivos en las tres especies, mientras que T4 resultó consistentemente ineficaz.

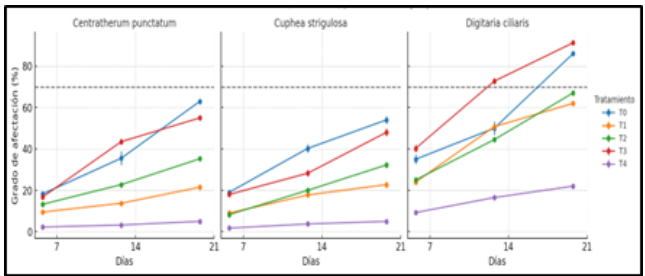


Figura 4. Grado de afectación (media $\pm$ Error estándar) por tratamientos, tiempo y especie

Evaluación de la reducción de cobertura de arvenses en transectos

La evaluación de la cobertura de arvenses en la figura 5 mostró diferencias significativas entre los tratamientos. El análisis post-hoc de Tukey ($\alpha = 0,05$) indicó que las diferencias variaron según el tiempo de evaluación. A los 7 días, T0 y T3 presentaron los valores más bajos de cobertura, significativamente menores que T4, que mantuvo la mayor cobertura ($>90 \%$). A los 14 días, T0 mostró una reducción marcada en comparación con el resto, mientras que T1, T2 y T4 mantuvieron niveles elevados y similares. A los 21 días, T0 fue el único tratamiento con diferencias significativas (letra “a”), con una cobertura $<25 \%$, en contraste con T1, T2, T3 y especialmente T4, que conservaron mayor cobertura ($\geq 50-80 \%$) y compartieron la letra “b”. Esto confirma que la reducción de arvenses depende tanto del tratamiento como del

tiempo, siendo T0 el más eficaz, mientras que T4 mostró la mayor persistencia de arvenses.

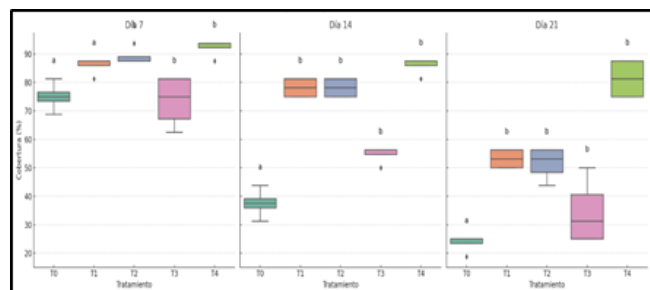


Figura 5. Cobertura de arvenses; Prueba post-hoc de Tukey por día y tratamiento

Determinación de la biomasa verde

La figura 6 muestra diferencias significativas entre los tratamientos (ANOVA, $F(4,15) = 68,50$; $p < 0,001$), confirmando que el crecimiento de las plantas depende del manejo aplicado. La prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) indicó que T0, T2 y T3 presentaron los valores más bajos de biomasa (entre 11,5–29 g), sin diferencias estadísticas entre ellos, lo que sugiere una eficacia similar en la reducción de biomasa. En contraste, T1 alcanzó 57,8 g, mostrando menor capacidad de control, y T4 presentó la mayor acumulación de biomasa (74,8 g), siendo el tratamiento menos eficiente y sin diferencias con T1. Estos resultados confirman que T0, T2 y T3 fueron los más efectivos en limitar el crecimiento de la biomasa verde, mientras que T1 y T4 fueron ineficaces, destacándose la baja efectividad de T4.

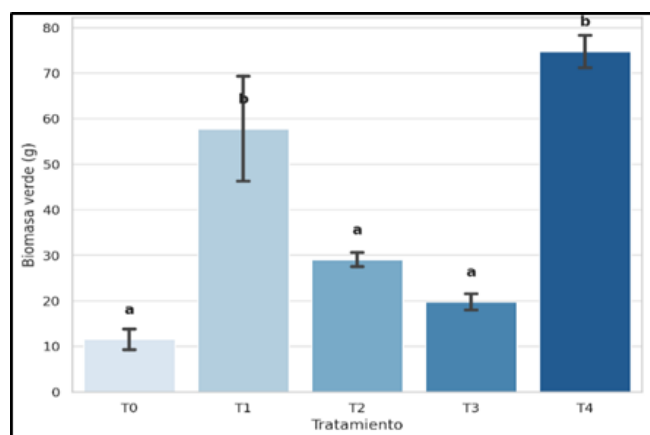


Figura 6. Peso de biomasa verde a los 21 días por tratamiento

Variación de las propiedades edáficas pre y post aplicación del herbicida

El análisis comparativo de las propiedades edáficas pre y post aplicación del herbicida ecológico (figura 7) mostró variaciones específicas por tratamiento, con diferencias significativas ($p < 0,05$) en varios casos. El pH disminuyó levemente en T0 (-0,4) y se mantuvo estable en T1–T4, dentro del rango neutro–ligeramente ácido. La CE se mantuvo estable ($\leq 0,1$ dS/m), sin riesgo de salinización. El C aumentó en T2 (+0,2 %), mientras que T0 y T1 no presentaron cambios significativos. La MO incrementó en T2 (+0,4 %) y T3 (+0,3 %), con significancia estadística, sugiriendo un aporte de compuestos orgánicos derivados del herbicida, lo que podría mejorar la fertilidad del suelo. En general, los resultados indican que el producto no afecta negativamente las propiedades edáficas y que algunos tratamientos, como T2 y T3, podrían ofrecer beneficios agronómicos adicionales.

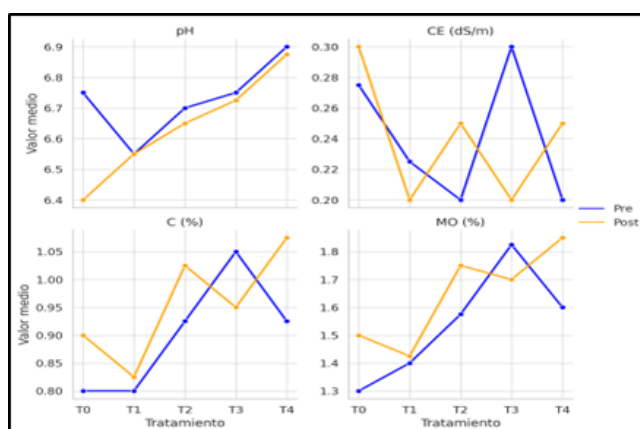


Figura 7. Dinámica de las propiedades edáficas pre y post aplicación del herbicida

DISCUSIÓN

Los resultados de la evolución de azúcares y pH durante la fermentación evidencian diferencias marcadas en la cinética del proceso entre las muestras evaluadas. Las muestras 3 y 4 mostraron un mayor periodo de actividad fermentativa entre los días 2 y 4, con una disminución notable de azúcares superiores al 60 %, coincidiendo con una disminución del pH de 4 a 3. Este patrón es consistente con una elevada producción de

ácidos orgánicos, principalmente acético y láctico, resultado de la actividad metabólica de *Saccharomyces cerevisiae* y posibles bacterias ácido-lácticas, que transforman los carbohidratos en compuestos orgánicos de bajo peso molecular (Mendes Ferreira y Mendes Faia, 2020). En cambio, las muestras 1 y 2 presentaron una reducción más lenta de azúcares, lo que podría asociarse a menor carga microbiana inicial o a limitaciones en la disponibilidad de sustratos fermentables, prolongando la fase de adaptación y reduciendo la velocidad de acidificación (Vaquero et al., 2020).

La correlación significativa entre la disminución de azúcares y el descenso del pH en las muestras de mayor actividad confirma que la acidificación es un indicador robusto del progreso fermentativo, en concordancia con estudios previos en matrices ricas en carbohidratos (Kamal et al., 2020). Estos resultados indican que la etapa crítica de control y optimización del proceso se concentra en el intervalo de 48 a 96 horas, donde ajustes en la temperatura, oxigenación o inóculo podrían maximizar la eficiencia fermentativa y el perfil químico final del producto.

Estadísticamente los valores confirman que la eficacia del herbicida ecológico depende significativamente de la especie de arvenses, el tratamiento aplicado y el tiempo de evaluación, con una interacción triple altamente significativa ($p < 0,001$). *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler superó el umbral de control efectivo (≥ 70 %) con T3 desde el día 14 y con T0 al día 21, lo que coincide con reportes sobre la sensibilidad de gramíneas anuales a extractos alcalinos y compuestos fenólicos derivados de residuos agroindustriales (El Metwally et al., 2022). *Centratherum punctatum* Cass., presentó una respuesta moderada, acercándose al umbral con T0 y T3 al día 21, mientras que *Cuphea strigulosa* Kunth, alcanzó valores máximos de 49–53 % y evidenciando la ineficacia de T4 ($5,00 \pm 1,41$ %) siendo poco susceptible. Estas diferencias reflejan variaciones fisiológicas y bioquímicas asociadas a la estructura cuticular, densidad estomática y capacidad de detoxificación metabólica (Faria et al., 2024). Asimismo, la dinámica temporal reveló que T0 y

T3 fueron los más consistentes en la reducción de cobertura y biomasa de arvenses, en contraste con T4, que mostró una elevada persistencia (>75 %).

Estos resultados coinciden con la investigación de Muñoz Alcívar et al. (2024), el cual demostró que la aplicación de mucílago de cacao al 100 % alcanzó hasta un 97 % de mortalidad tras la tercera aplicación, evidenciando la capacidad de este subproducto para suprimir el desarrollo de malezas. Tal efecto se atribuye a la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides y taninos que ejercen acción fitotóxica.

En términos productivos, T4 favoreció el mayor registro de biomasa verde, seguido de T1 como alternativa intermedia, mientras que T0, T2 y T3 fueron significativamente menores, confirmando el efecto fitotóxico del mucílago de cacao, cuyos compuestos fenólicos y taninos han demostrado inhibir el crecimiento de arvenses (Hipo et al., 2017). En contraste, T1 y T4 registraron los valores más altos (57,8–74,8 g), evidenciando baja eficacia, posiblemente por concentraciones inadecuadas o formulaciones menos estables, lo que concuerda con estudios que destacan la importancia de la dosis, proporciones de ingredientes y tiempos de aplicación para maximizar la efectividad del bioherbicida (Marín Cuevas et al., 2024; Sulistiani et al., 2021).

Se evidencia que la aplicación del herbicida ecológico no generó alteraciones negativas en las propiedades fisicoquímicas del suelo, manteniendo el pH en rangos neutros–ligeramente ácidos y la CE en niveles estables, lo que descarta riesgos de acidificación extrema o salinización. Destaca el incremento significativo del C y la MO en T2 y T3, lo que sugiere un posible aporte de compuestos orgánicos provenientes del bioherbicida, favoreciendo la mejora de la estructura edáfica, la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes. Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que indican que insumos orgánicos o formulaciones biológicas, además de ejercer control sobre las malezas, pueden mejorar indicadores de calidad del suelo y favorecer la actividad microbiana (Hefner et al., 2024).

El K aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CEC), lo que favorece la retención de nutrientes esenciales y mejora su disponibilidad. Su presencia adecuada optimiza la estructura del suelo, promoviendo una mejor aireación y retención de agua, creando un ambiente más favorable para el desarrollo de los sistemas radiculares (Poonpakdee et al., 2025). Lo que resalta la innovación de este estudio y lo diferencia de otros, como el de Marín Cuevas et al. (2024) y Muñoz Alcívar et al. (2024), al utilizar KOH como complemento al mucílago de cacao, debido a que este altera el equilibrio ácido-base celular y provoca la muerte de los arvenses (Pesticide Research Institute, 2015). El presente estudio guarda similitudes con investigaciones previas en las que se han empleado aditivos químicos como el cloruro de sodio (NaCl) y el vinagre (C₂H₄O₂), los cuales han demostrado eficacia tanto en el control de malezas como en la mejora del rendimiento del cacao (Santos Imbago, 2020; Vera Montoya et al., 2025).

Los bioherbicidas ofrecen a los pequeños productores una alternativa sostenible frente a los herbicidas sintéticos, al reducir la contaminación, conservar la microbiota del suelo y evitar la resistencia en malezas. Su origen biológico y biodegradabilidad disminuyen los riesgos para la salud y el ambiente, favoreciendo la producción orgánica y el acceso a mercados diferenciados (Liang et al., 2025). Además, su elaboración local promueve la autonomía productiva y la economía circular rural (Islam et al., 2024).

Aunque esta investigación ha demostrado beneficios, es importante destacar ciertas limitaciones que deben ser consideradas, como la restricción en la escala de los resultados, ya que el herbicida se probó solo en 20 parcelas de 1 m², lo que dificulta su extrapolación a áreas mayores. Además, el análisis de los efectos se limitó a 21 días, lo que impide evaluar su persistencia y los impactos ambientales a largo plazo. Para futuras investigaciones, sería necesario ampliar el periodo de observación a 3 meses y realizar pruebas en diferentes cultivos y arvenses, lo que proporcionaría una mejor comprensión de su efectividad y de sus efectos en el suelo. También sería útil realizar un

análisis costo-beneficio para evaluar su viabilidad en producción a gran escala.

■ CONCLUSIONES

El mucílago fermentado de *Theobroma cacao* L. presentó un comportamiento fermentativo definido, donde la etapa crítica se concentró entre las 48 y 96 horas, evidenciando una marcada reducción de azúcares y una acidificación intensa asociada a una elevada actividad microbiana. Estas condiciones, junto con la acumulación de iones como K⁺ en concentraciones fitotóxicas, confirman su potencial como ingrediente activo en formulaciones herbicidas de origen biológico, capaces de inducir estrés osmótico y alteraciones fisiológicas en las plantas. En cuanto a su eficacia, el prototipo demostró un control diferencial sobre las arvenses evaluadas, siendo *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, la especie más susceptible con porcentajes de control superiores al 90 %, mientras que *Cuphea strigulosa* Kunth mostró la mayor resistencia, lo que evidencia que la efectividad depende tanto de la especie como de la dosis y el tiempo de exposición, destacando la necesidad de optimizar la formulación para garantizar un espectro de acción más amplio. Finalmente, la aplicación del herbicida no generó efectos adversos en las propiedades edáficas, manteniendo estables parámetros críticos como el pH y la conductividad eléctrica y mostrando incrementos de carbono y materia orgánica en algunos tratamientos, lo cual representa un beneficio adicional al mejorar la calidad del suelo y favorecer su sostenibilidad agroecológica.

Este estudio revela que el herbicida formulado tiene un gran potencial para los cultivos de cacao tradicionales, donde el control de malezas es un desafío. Al incorporar materiales orgánicos como el mucílago de cacao y las cáscaras de banano, se presenta una alternativa sostenible a los herbicidas sintéticos, lo que mejora las condiciones del suelo. Aunque las pruebas se llevaron a cabo en un clima cálido y húmedo en Galayacu, Pasaje (Ecuador), los resultados indican que podría ser aplicable en otras regiones tropicales con condiciones similares.

■ CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

B.D., Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, escritura borrador

S.A., Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, escritura borrador.

M.J., Escritura revisión edición, visualización, supervisión, administración del proyecto.

R.H., Escritura revisión edición, visualización, supervisión, administración del proyecto.

■ REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balderrama Carmona, A. P., Silva Beltrán, N. P., Zamora Alvarez, L. A., Adan Bante, N. P., & Moran Palacio, F. E. (2020). Consequences of Herbicide Use in Rural Environments and Their Effect on Agricultural Workers. In S. N. Kulshreshtha (Ed.), *Sustainability Concept In Developing Countries*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90546>
- Basori, B., Mohamad, W. M. F. W., Mansor, M. R., Tamaldin, N., Iswadi, A., Ajiriyanto, M. K., & Susetyo, F. B. (2023). Effect of KOH concentration on corrosion behavior and surface morphology of stainless steel 316L for HHO generator application. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 13(3), 451–467. <https://doi.org/10.5599/jese.1615>
- Chu, L., Liu, H., Zhang, Z., Zhan, Y., Wang, K., Yang, D., Liu, Z., & Yu, J. (2022). Evaluation of Wood Vinegar as an Herbicide for Weed Control. *Agronomy*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy12123120>
- Delgado, J. (2019). Influencia de la dilución y concentración de los electrolitos en la medición del pH en suelos ácidos. *Revista Científica Pakamuros*, 7(2), 13–21. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v7i2.89>
- De Stefano, A., Fowers, B., & Meador, B. A. (2021). Comparison of visual estimation and line-point intercept vegetation survey methods on annual grass-invaded rangelands of Wyoming. *Invasive Plant Science and Management*, 14(4), 240–252. <https://doi.org/10.1017/inp.2021.36>
- El Metwally, I. M., Shehata, S. A., Abdelgawad, K. F., & Elkhawaga, F. A. (2022). Utilization of phenolic compounds extracted from agro-industrial wastes as natural herbicides. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(2), 265–274. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.85380.4167>
- FAO. (2004). General Guidelines On Sampling. https://www.fao.org/uploads/media/Codex_2004_sampling_CAC_GL_50.pdf?utm
- FAO. (2022). Plaguicidas comercio. FAOSTAT DATA. <https://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Faria, G. S., Carlos, L., Vasconcelos-Filho, S. C., Freitas, S. T. F., Lourenço, L. L., Sousa, A. C. D., Bessa, L. A., & Vitorino, L. C. (2024). Tolerance of *Hymenaea stigonocarpa* mart. Ex Hayne. To glyphosate. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.279984>
- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/9481>
- Hefner, M., Gebremikael, M. T., & Kristensen, H. L. (2024). Soil microbial activity improved while intensifying vegetable production by use of plant-based fertilisers, cover crops and reduced tillage. *Pedobiologia*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2023.150926>
- Hipo, H., Rosa, M., & Segundo Curay, I. M. (2017). Aplicación de mucílago de semillas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el control de malezas [Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25048>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2021). Módulo de Información Ambiental y Tecnificación Agropecuaria. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/informacion-agroambiental/>
- Islam, A. K. M. M., Karim, S. M. R., Kheya, S. A., & Yeasmin, S. (2024). Unlocking the potential of bioherbicides for sustainable and environment friendly weed management. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36088>
- Izquierdo Bautista Jaime, & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación de la materia orgánica del suelo (MOS) por el método químico y por calcinación - Izquierdo Jaime. *Ingeniería Y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Kamal, M., Zaied, K. A., Abd El. Hadi, A. H., & El. Baz, M. E. (2020). Correlation between Ph with Saccharification and Ethanol Fermentation of Sugarcane Juice Industrial Wastes by Genotypic Hybrids of *Saccharomyces cerevisiae* as Ph Determining Factor. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 11(7), 209–218. <https://doi.org/10.21608/jacb.2020.108782>
- Liang, X., Yu, S., Ju, Y., Wang, Y., & Yin, D. (2025). Integrated Management Practices Foster Soil Health, Productivity, and Agroecosystem

- Bonilla, D., Sarmiento, A., Maza, J., Romero, H. (2026). Formulación de un Herbicida Ecológico a Base de *Theobroma cacao* L. e Hidróxido de Potasio. *Bosques Latitud Cero*, 16(1), 53-66. <https://doi.org/10.54753/blc.v16i1.2565>
- Resilience. *Agronomy*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy15081816>
- Loza Del Carpio, A., & Taype Huamán, I. (2021). Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú. *Uniciencia*, 35(2). <https://doi.org/10.15359/RU.35-2.3>
- Marín Cuevas, C. V., Menace Almea, M. A., Carranza Patiño, M., Herrera Feijoo, R. J., & Tuárez Villacís, G. J. (2024). Fitotoxicidad del mucílago de cacao sobre malezas en el cultivo de cacao CCN-51 *Theobroma cacao* L. *Código Científico Revista de Investigación*, 5(1), 710–729. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n1/405>
- Mendes Ferreira, A. M., & Mendes Faia, A. (2020). The role of yeasts and lactic acid bacteria on the metabolism of organic acids during winemaking. In *Foods* (Vol. 9, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/foods9091231>
- Muentes Rodríguez, R. B., Montilla Pacheco, A. de J., & Pacheco Gil, H. A. (2023). Importancia de la agroecología en la mitigación de impactos ambientales derivados del uso de agroquímicos en Ecuador. *Revista de Ciencias Agropecuarias ALLPA*, 6(12), 25–39. <https://doi.org/10.56124/allpa.v6i12.0062>
- Muñoz Alcívar, C. M., Yépez Véliz, G. T., & Molina Giler, J. M. (2024). Aprovechamiento de residuos de mucílago de cacao (*Theobroma cacao* L.) Y café (*Coffea Arabica*) como herbicida para el control de malezas [Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí Manuel Félix López]. <http://repositorio.espa.edu.ec/handle/42000/2643>
- Nath, C. P., Singh, R. G., Choudhary, V. K., Datta, D., Nandan, R., & Singh, S. S. (2024). Challenges and Alternatives of Herbicide-Based Weed Management. In *Agronomy* (Vol. 14, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/agronomy14010126>
- Pesticide Research Institute. (2015). Soap Based Herbicides. <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Soaps%20H%20report%202015.pdf>
- Petraki, D., Kanatas, P., Zannopoulos, S., Kokkini, M., Antonopoulos, N., Gazoulis, I., & Travlos, I. (2024). Agroecological Weed Management and the Potential Role of Fungi-Based Bioherbicides in Conservation: Advantages, Applications and Future Prospects. In *Conservation* (Vol. 4, Issue 4, pp. 847–859). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/conservation4040050>
- Poonpakdee, C., Weng, C. H., Wolde, G. S., Chen, Y. C., Tzeng, J. H., & Lin, Y. T. (2025). Soil potassium adsorption and speciation dynamics with associated clay microstructural changes revealed by synchrotron X-ray microscopy. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18494-w>
- Rebello, L. R. B., Siepmann, T., & Drexler, S. (2020). Correlations between TDS and electrical conductivity for high-salinity formation brines characteristic of south Atlantic pre-salt basins. *Water SA*, 46(4), 602–609. <https://doi.org/10.17159/wsa/2020.v46.i4.9073>
- Ríos Lugo, M. J., & Hernández Mendoza, H. (2020). Fundamentos teóricos de icp-ms y su importancia en el análisis de elementos tóxicos en agua subterránea. *Revistaglosa*, 14, 4–15. https://www.researchgate.net/publication/341310570_FUNDAMENTOS_TEORICOS_DE_ICP-MS_Y_SU_IMPORTANCIA_EN_EL_ANALISIS_DE_ELEMENTOS_TOXICOS_EN_AGUA_SUBTERRANEA
- Roy, S., Asaduzzaman, M., Pramanik, H. R., & Prodhan, K. H. (2006). Effect of banana plant extracts on germination and seedling growth of some vegetable crops. <https://www.researchgate.net/publication/225037198>
- Saenz Lituma, G. (2025). The Agroecological Transition of Farms in the Ecuadorian Andes Through the Lens of the Main Agroecological Structure. *Land Degradation and Development*, 36(2), 424–440. <https://doi.org/10.1002/ldr.5368>
- Santos Imbago, G. A. (2020). Estudio de prefactibilidad de una planta de producción de un herbicida orgánico a partir del mucílago del cacao. [Universidad San Francisco De Quito]. <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/9275/1/123516.pdf>
- Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, A. S., Parihar, R. D., Dar, O. I., Singh, K., Jasrotia, S., Bakshi, P., Ramakrishnan, M., Kumar, S., Bhardwaj, R., & Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. In *SN Applied Sciences* (Vol. 1, Issue 11). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1485-1>
- Sulistiani, A. I., Chozin, M. A., Guntoro, D., & Suwanto. (2021). The effectiveness of bioherbicide made from nutsedge tuber powder (*Cyperus rotundus* L.) in various dosage and application time. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 694(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/694/1/012042>
- Vaquero, C., Loira, I., Bañuelos, M. A., Heras, J. M., Cuerda, R., & Morata, A. (2020). Industrial performance of several lachancea thermotolerans strains for ph control in white wines from warm areas. *Microorganisms*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060830>

- Bonilla, D., Sarmiento, A., Maza, J., Romero, H. (2026). Formulación de un Herbicida Ecológico a Base de *Theobroma cacao* L. e Hidróxido de Potasio. *Bosques Latitud Cero*, 16(1), 53-66. <https://doi.org/10.54753/blc.v16i1.2565>
- Velasco Aguiar, F. J. (2024). Herbicida glifosato y su impacto negativo en el Ecuador [Universidad Técnica De Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17076>
- Vera Montoya, R. E., Vera Chang, J. F., Vásquez Cortez, L. H., Cobos Mora, F. J., Rodríguez Cevallos, S., Pazmiño Pérez, Á., & Villamarín Barreiro, J. (2025). Efectos Del Mucílago De Cacao Adicionando Con Tres Niveles De Vinagre Y Melaza Como Herbicida En El Cultivo Del Cacao (*Theobroma Cacao* L.). *Sociedad Científica Del Paraguay*, 30. <https://doi.org/10.32480/rscp.2025.30.1.0113>
- Wani, K. M., & Dhanya, M. (2025). Unlocking the potential of banana peel bioactives: extraction methods, benefits, and industrial applications. In *Discover Food* (Vol. 5, Issue 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s44187-025-00276-y>
- Zentile, M. A., Offermans, P., Young, D., & Zhang, X. U. (2024). Fibre Refractometry for Minimally Invasive Sugar Content Measurements within Produce. *Sensors*, 24(19). <https://doi.org/10.3390/s24196336>