

Análisis de la bioprospección como herramienta del agricultor para el manejo de
***Echinochloa crus-galli* en cultivos de arroz**

Alix Tatiana Barragán Calderón

Director

Javier David Buitrago Villamil

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Especialización en Biotecnología Agroambiental

2025

Resumen

Las gramíneas arvenses constituyen una de las principales limitantes para la productividad en los cultivos de arroz, generando competencia por nutrientes, agua y luz, además de aumentar la dependencia de herbicidas sintéticos con efectos directos sobre los ecosistemas debido a la resistencia adquirida por el uso indiscriminado. La bioprospección, entendida como la exploración y caracterización de recursos biológicos con potencial de uso, ofrece oportunidades para identificar compuestos vegetales y microorganismos presentes en el propio ecosistema productivo con actividad alelopática o fitotóxica contra gramíneas. Esta revisión plantea un análisis del potencial de la bioprospección como herramienta accesible a los agricultores para el manejo de *Echinochloa crus-galli* en arroz *Oryza sativa*, considerando estudios a nivel global y regional, con énfasis en las condiciones agroambientales de las zonas arroceras colombianas. Se estudia la literatura científica sobre metodologías de prospección, experiencias exitosas y consideraciones técnicas para su implementación en plantaciones arroceras. Se identificaron fuentes biológicas promisorias y se planteó una estrategia de apropiación del conocimiento que permitió transmitir los principios de la bioprospección al agricultor local. Los resultados de la revisión podrán orientar estrategias de manejo integrado de *Echinochloa crus-galli*, reducir el uso de herbicidas y disminuir el impacto ambiental.

Palabras clave: Arvenses, alelopatía, bioherbicidas, control de malezas, fitotoxicidad.

Abstract

Grass weeds are among the main constraints to rice productivity, competing for nutrients, water, and light, while increasing dependence on synthetic herbicides that have direct effects on ecosystems due to resistance developed through indiscriminate use. Bioprospecting, understood as the exploration and characterization of biological resources with potential applications, offers opportunities to identify plant compounds and microorganisms present within the production ecosystem that exhibit allelopathic or phytotoxic activity against grasses. This review analyzes the potential of bioprospecting as an accessible tool for farmers to manage *Echinochloa crus-galli* in *Oryza sativa* rice crops, considering global and regional studies with emphasis on the agro-environmental conditions of Colombian rice-growing areas. The scientific literature on prospecting methodologies, successful experiences, and technical considerations for its implementation in rice plantations is examined. Promising biological sources were identified, and a knowledge appropriation strategy was formulated to facilitate the transfer of bioprospecting principles to local farmers. The results of the review provide guidance for integrated management strategies of *Echinochloa crus-galli*, contributing to the reduction of synthetic herbicide use and the mitigation of the environmental impact associated with their application.

Keywords: Allelopathy, bioherbicides, phytotoxicity, weed control, weeds.

Tabla de Contenido

Introducción.....	8
Planteamiento del Problema.....	11
Justificación.....	15
Objetivos.....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos.....	19
Metodología.....	20
Marco Conceptual y Teórico.....	22
Gramíneas Arvenses en Arroz	22
<i>Resistencia a Herbicidas</i>	25
Aplicación de la Bioprospección al Manejo de Malezas.....	28
Estrategias Biológicas para el Control de Malezas.....	30
Resultados.....	36
Fuentes Biológicas con Potencial Bioherbicida para el Control de <i>Echinochloa sp.</i>	43
Guía sobre Reconocimiento de Potenciales Fuentes Biológicas de Compuestos para el Control de <i>Echinochloa crus-galli</i>	56
<i>Manejo del Muestreo: Recolección y Acondicionamiento</i>	57
<i>Procesamiento y Extracción Preliminar</i>	58
<i>Evaluación de la Actividad Fitotóxica</i>	60
Estrategia de Apropiación del Conocimiento.....	61
Discusión.....	63
Plantas como Agentes de Biocontrol.....	63

Hongos como Agentes de Biocontrol.....	66
Bacterias como Agentes de Biocontrol	68
Principales Retos de Aplicación.....	72
Conclusiones y Futuras Recomendaciones	78
Referencias Bibliográficas.....	80

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Plantas como Agentes de Biocontrol de Echinochloa sp</i>	44
Tabla 2 <i>Hongos como Agentes de Biocontrol de Echinochloa sp</i>	49
Tabla 3 <i>Bacterias como Agentes de Biocontrol de Echinochloa crus-galli</i>	53
Tabla 4 <i>Bacterias como Agentes de Biocontrol de Otras Malezas con Metabolismo Fotosintético C₄</i>	55

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Forma de Crecimiento de Echinochloa crus-galli var. crus-galli</i>	23
Figura 2 <i>Esquema General del Proceso de Bioprospección de Microorganismos con Potencial Bioherbicida</i>	29
Figura 3 <i>Inhibición de Echinochloa colona y Echinochloa crus-galli por Extracto Metanólico de Cosmos bipinnatus</i>	48
Figura 4 <i>Efecto Bioherbicida de los Metabolitos Producidos por Diaporthe schini</i>	52
Figura 5 <i>Ensayo de Patogenicidad de Brucella pseudorignonensis sobre Echinochloa crus-galli</i>	54

Introducción

El arroz no solo constituye un pilar fundamental en la dieta de millones de personas, sino que también representa un componente estratégico vital para la seguridad alimentaria global y la economía agrícola de numerosos países. A nivel mundial, el cultivo de arroz ocupa una vasta extensión registrando aproximadamente 168 millones de hectáreas (ha) cosechadas en el 2023, con países como India, China, Bangladesh, Tailandia e Indonesia liderando (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2025). En América, Brasil y Estados Unidos tienen las mayores extensiones, entre tanto, Colombia para ese mismo año registra una superficie importante de 667.500 ha, aproximadamente el equivalente a 58% del área cosechada en Estados Unidos (FAO, 2025). Por otra parte, la curva histórica de la productividad mundial de arroz ha mostrado un crecimiento ininterrumpido, alcanzando 5,2 toneladas por hectárea (t/ha) en 2018; sin embargo, en Colombia, aunque la productividad también ha crecido, su comportamiento ha sido más irregular comparado con el ritmo de avance global, registrando 5 t/ha (Becerra et al., 2020).

Estas cifras evidencian tanto el potencial como las limitaciones del sistema productivo arrocero nacional, el cual se enfrenta a condiciones de alta variabilidad climática, costos crecientes de insumos (Federación Nacional de Arroceros[FEDEARROZ], s. f.), degradación del suelo y aparición de plagas y enfermedades que a su vez conllevan a la dependencia de agroquímicos (Becerra et al., 2020). En particular, las malezas constituyen uno de los problemas más persistentes y difíciles de controlar, ya que compiten directamente con el cultivo por nutrientes, agua, luz y espacio. Se estima que, cada año, las malezas causan pérdidas de rendimiento en el arroz que oscilan entre el 15% y el 76% (Singh et al., 2020).

Entre las arvenses que afectan al arroz, *Echinochloa crus-galli* (pata de gallo o barnyardgrass) se destaca como la más problemática y competitiva a nivel mundial. Esta especie es capaz de reducir los rendimientos del cultivo entre un 35 % y un 75 % dependiendo de la densidad y el momento de infestación (Suliman & Singh, 2022). Su alta similitud morfológica con el arroz en las etapas iniciales de crecimiento dificulta la identificación y el control oportuno, especialmente en sistemas de siembra directa. Además, posee una elevada capacidad de adaptación a diferentes ambientes, un ciclo de vida corto, rápida germinación y una producción de semillas abundante, lo que la convierte en una arvense altamente persistente y de difícil erradicación (Marchesi & Saldain, 2019).

En las últimas décadas, el manejo de las malezas en los sistemas arroceros ha estado dominado por el uso de herbicidas sintéticos, debido a su eficacia, rapidez y relativa facilidad de aplicación. No obstante, la dependencia prolongada de estos productos ha derivado en una serie de consecuencias no deseadas. Por un lado, la evolución de resistencias en especies arvenses ha disminuido la efectividad de los herbicidas disponibles, generando una espiral de incremento en dosis, costos y frecuencia de aplicación. Por otra parte, los efectos colaterales sobre el ambiente, entre ellos, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la pérdida de biodiversidad y la alteración de las comunidades microbianas del suelo han puesto en evidencia la necesidad de replantear los modelos de manejo agrícola hacia prácticas más sostenibles (Mohd Ghazi et al., 2023).

En este contexto, la bioprospección de recursos vegetales y microbianos se presenta como una estrategia innovadora que permite identificar compuestos bioactivos de origen natural con potencial aplicación en el manejo de malezas.

El avance de la biotecnología y de las ciencias ambientales ha permitido reconocer que la biodiversidad no solo representa un patrimonio ecológico, sino también una fuente invaluable de soluciones naturales para los desafíos agrícolas contemporáneos. Particularmente, Colombia, por su condición de país megadiverso (Sierra et al., 2018), dispone de una amplia gama de especies vegetales y microorganismos con capacidad de producir metabolitos secundarios con propiedades alelopáticas o biocidas, que podrían ser aprovechados para desarrollar bioinsumos agrícolas sostenibles.

En este marco, la presente investigación documental no solo aborda un problema crítico para la producción de arroz a nivel nacional e internacional, sino que también promueve un enfoque de desarrollo agrícola más holístico y sostenible, empoderando a los agricultores con conocimientos y herramientas que les permitan enfrentar los desafíos actuales y futuros.

Planteamiento del Problema

La producción de arroz (*Oryza sativa* L.) se ve gravemente afectada por la proliferación de gramíneas arvenses que ejercen una intensa competencia con el cultivo por espacio, nutrientes, agua y luz desde las primeras etapas de crecimiento (Rao et al., 2017). Esto se traduce en una posterior reducción del rendimiento del arroz, ligada a la densidad y el tipo de la flora arvense, con una clara correlación lineal entre la población de malezas y la disminución de la cosecha (Parameswari & Srinivas, 2017), lo que a su vez representa pérdidas económicas para los agricultores.

De manera significativa, *Echinochloa crus-galli* constituye uno de los principales factores que limitan la productividad del arroz en sistemas tropicales y subtropicales. Esta especie, perteneciente a la familia *Poaceae*, presenta una notable tolerancia ecológica que le permite adaptarse a diversas condiciones de humedad, temperatura y fertilidad del suelo, lo que le confiere ventaja competitiva frente al cultivo (Suliman & Singh, 2022). Su morfología similar al arroz en las etapas iniciales de crecimiento hace que las labores de control manual sean ineficaces, mientras que su alta tasa de germinación y producción de semillas asegura su persistencia entre ciclos de cultivo (Bajwa et al., 2015). Adicionalmente, desde el punto de vista fisiológico, *E. crus-galli* posee una vía fotosintética tipo C_4 que le confiere una ventaja competitiva sobre el arroz (C_3), especialmente en condiciones de alta radiación y temperatura, lo que incrementa su eficiencia en el uso de agua y nutrientes (Mennan et al., 2012).

Por otro lado, el uso intensivo de herbicidas sintéticos, aunque inicialmente efectivo, ha provocado la selección de biotipos resistentes. A nivel mundial, se ha reportado que la resistencia a herbicidas afecta a 66 cultivos en 61 países, siendo el arroz particularmente vulnerable, con 39

especies de malezas que han desarrollado resistencia (Heap, 2014). A nivel de Latinoamérica, 21 especies de gramíneas arvenses han desarrollado resistencia a herbicidas (Valverde, 2007).

De manera general, esta resistencia puede manifestarse por dos grandes tipos de mecanismos: resistencia de sitio de acción (target-site) y resistencia metabólica (non-target site). En el primer caso, mutaciones puntuales en genes que codifican enzimas blanco (por ejemplo, ALS o ACCase) reducen la afinidad del herbicida por su objetivo, permitiendo que la planta sobreviva. En el segundo, se observan incrementos en rutas de detoxificación (como citocromo P450 monooxigenasas, glutatión-S-transferasas, glicoproteínas de transporte tipo ABC, etc), que metabolizan o expulsan el herbicida antes de que alcance su sitio de acción (Powles & Yu, 2010; Bajwa et al., 2015).

E. crus-galli ha desarrollado resistencia a herbicidas pertenecientes a múltiples grupos, incluyendo inhibidores de ACCase que afectan la síntesis de ácidos grasos esenciales para membranas y estructuras de la célula (HRAC/HRAC/IRAC grupo 1), inhibidores de ALS que impiden la biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada (valina, leucina, isoleucina) (grupo 2), inhibidores del fotosistema II que interfieren en la cadena de transporte electrónico fotosintético y producción de especies reactivas (PSII, grupo 5), y auxinocidas como quinclorac (grupo 4) y en algunos casos muestra resistencia múltiple o cruzada (Bajwa et al., 2015; Valverde, 2007). Bajwa et al. (2015) señalan además que los mecanismos metabólicos (como incremento de actividad de P450 y GST) son frecuentes en poblaciones resistentes de *E. crus-galli*, contribuyendo a la eficacia reducida de herbicidas de distintos modos de acción en una misma población.

Por otro lado, *Echinochloa colona* ha evolucionado resistencia a propanil, herbicidas inhibidores de la acetil-coenzima A carboxilasa (ACCase), quinclorac e imazapyr en regiones

como Centroamérica, Colombia y Venezuela. Otras malezas resistentes en arroz incluyen *Echinochloa crus-galli* e *Ischaemum rugosum* (Valverde, 2007). Incluso, poblaciones de arroz maleza están emergiendo con resistencia a imidazolinonas, debido a la transferencia de resistencia por flujo génico desde cultivares de arroz diseñados como resistentes a herbicidas (tecnología Clearfield®) hacia poblaciones silvestres o arroz maleza (*Oryza sativa* var. *sylvatica* o red rice), esto se asocia a la transferencia de alelos mutados de ALS/imazethapyr u otros genes de resistencia entre cultivo y maleza, generando poblaciones de arroz maleza que portan el alelo de resistencia (Rajguru et al., 2005; Shivrain et al., 2007).

Se estima que en Brasil, más de 2 millones de hectáreas están infestadas con malezas resistentes a herbicidas, generando daños a los cultivos de alrededor de 80 millones de dólares anuales (Valverde, 2007). Esta realidad limita severamente la efectividad de las prácticas de control convencionales, llevando a un incremento en las dosis de aplicación o a la necesidad de rotar productos, lo que dificulta el manejo y eleva los costos de producción.

Además, el uso continuado e intensivo de herbicidas acarrea consecuencias ambientales significativas. La dispersión de estos productos sobre el follaje, los suelos y los sistemas acuáticos puede resultar en la contaminación de aguas superficiales y subterráneas a través de la escorrentía o la lixiviación, comprometiendo la salud biológica de los cuerpos de agua y los ecosistemas circundantes (Parven et al., 2025). La persistencia de muchos herbicidas, debido a su estabilidad química y fotoquímica, dificulta su degradación en las plantas de tratamiento, permitiendo su acumulación en el suelo, donde pueden ejercer efectos adversos sobre la vida edáfica por décadas. Asimismo, la aplicación generalizada de estos compuestos expone a organismos no objetivo, incluyendo plantas, animales y humanos, lo que puede provocar

impactos profundos en las funciones ecosistémicas y las comunidades microbianas del ambiente (Mohd Ghazi et al., 2023).

Frente a la importancia de abordar estas pérdidas económicas, la problemática de la resistencia de malezas y los impactos ambientales derivados del manejo tradicional, se hace necesario explorar alternativas que sean sostenibles, eficientes y accesibles para el agricultor. Bajo este contexto, en la presente monografía se propone responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo puede la bioprospección ser una herramienta del agricultor para el manejo sostenible de *Echinochloa crus-galli* en cultivos de arroz?

Justificación

El arroz (*Oryza sativa* L.) es el alimento básico primordial para más de la mitad de la población mundial, siendo Asia, África Subsahariana y Sudamérica las regiones con mayor consumo según el *Economic Research Service* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2025). En Colombia, para el 2024 la cantidad de arroz semanal consumido para el total nacional se estimó en 91.913 miles de libras (DANE, 2025). En términos de producción, la actividad arrocera se desarrolla en 211 municipios de los 23 departamentos de Colombia, siendo el tercer cultivo con mayor área sembrada después del café y el maíz (Becerra et al., 2020). De acuerdo con el quinto Censo Nacional Arrocero, el área nacional sembrada en arroz mecanizado para el 2023 fue 589.848 hectáreas, en donde la mayor área sembrada la registró el departamento de Casanare con una participación del 35,0% (206.689 ha), seguido por el departamento del Tolima con una participación del 17,1% (100.589 ha) y el departamento del Meta con una participación del 14,7% (86.449 ha) (DANE, 2024a). La sostenibilidad de su producción es entonces prioritaria para garantizar el abastecimiento y la estabilidad del sector.

Sin embargo, la producción arrocera enfrenta desafíos persistentes como las malezas no controladas, que pueden causar una reducción en el rendimiento de los cultivos superior a la de cualquier otra plaga agrícola (Dayan et al., 2009). Si bien la labor manual fue históricamente la principal estrategia, la agricultura moderna ha llegado a depender en gran medida del uso de herbicidas sintéticos para el manejo de estas arvenses (Dayan et al., 2009). No obstante, el uso de estos compuestos ha sido controversial debido a sus impactos potenciales sobre la salud humana y el medio ambiente y, aunado a ello, la adaptación fisiológica que presentan las malezas para generar resistencia a estos productos.

El control de malezas ha mostrado una tendencia creciente a encarecerse debido a la necesidad de aplicar cada vez más cantidad de producto y de usar moléculas de reciente desarrollo, protegidas por patentes, que transfieren el costo de la investigación y altas utilidades al agricultor (Becerra et al., 2020). Ante esta compleja problemática, que combina desafíos económicos, agronómicos y ambientales, surge la necesidad de investigar y desarrollar alternativas de manejo sostenibles para las malezas en arrozales. En este sentido, la bioprospección de recursos vegetales y microbianos se perfila como una herramienta innovadora y prometedora para abordar el control de malezas (Cotes et al., 2012).

La bioprospección, entendida como una estrategia que permite adquirir nuevos conocimientos, mejorar la calidad de vida, brindar seguridad alimentaria, producir ganancias económicas, conservar la biodiversidad, evitar la erosión genética y respetar los derechos de las comunidades al reconocer su conocimiento tradicional, es crucial para explorar y validar soluciones naturales (Torres, 2021). Estas soluciones buscan minimizar la dependencia de productos químicos sintéticos, mitigar los efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana, y contribuir a sistemas agrícolas más resilientes (Isman, 2006). De hecho, el mercado global de bioplaguicidas está experimentando un crecimiento sustancial, con estimaciones que lo sitúan en USD 8.15 mil millones en 2024 y proyectan que alcance aproximadamente USD 19.48 mil millones para 2034, con una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) de alrededor del 9.1% entre 2025 y 2034 (Zion Market Research, 2024). Este auge refleja una creciente demanda de soluciones sostenibles y refuerza la pertinencia de la bioprospección como vía para satisfacer las necesidades de una agricultura más ecológica y sostenible.

Aunado a lo anterior, es importante considerar la brecha de conocimiento y la percepción limitada que muchos agricultores tienen sobre la bioprospección y la aplicación de bioinsumos.

Comúnmente, los productores desconocen los beneficios y el potencial de las herramientas biológicas, o perciben que su implementación es un proceso complejo y costoso, inalcanzable para su aplicación en el cultivo común (Lagler et al., 2017). La adopción de nuevas tecnologías en la agricultura, como el control biológico, enfrenta barreras significativas relacionadas con la carencia de información y promoción adecuada, así como la aversión al riesgo por parte de los agricultores, quienes están acostumbrados a la eficacia inmediata de los productos químicos (Santos et al., 2018).

Adicionalmente, es importante considerar que los productores de arroz en Colombia tienen un perfil demográfico específico, particularmente en la zona de los Llanos Orientales, el grupo etario con mayor cantidad de productores es el de 40 a 49 años (624), seguido de los productores con 50 a 59 años (560); y en el colectivo nacional, el nivel de educación más alto fue el de Básica Primaria alcanzado por 4.436 hombres y 649 mujeres productoras de arroz mecanizado. Por su parte, 2.253 hombres y 424 mujeres alcanzaron la educación Media mientras que 1.508 hombres y 237 mujeres cursaron hasta Básica Secundaria. En el nivel universitario se encontraron 1.356 productores (1.090 hombres y 266 mujeres) (DANE, 2024b).

Otro punto a contemplar es que la práctica del control integrado de plagas y malezas se desfavorece con el arrendamiento de tierras, lo que lleva a los arrendatarios a considerar costoso y dispendioso el control integrado y, en su lugar, realizan grandes aplicaciones de herbicidas químicos de manera indiscriminada, una práctica que agrava el problema y deteriora los suelos (Becerra et al., 2020). Esta monografía busca precisamente desmitificar esta percepción, al analizar la bioprospección de manera que pueda incluir potenciales estrategias basadas en el uso de la alelopatía y productos naturales derivados del metabolismo secundario de plantas y

microorganismos, cerrando la brecha entre la investigación científica y la práctica agrícola en el campo.

Al identificar y proponer estrategias basadas en la bioprospección, se espera ofrecer a los agricultores herramientas más seguras y sostenibles para el manejo de malezas. Esto podría traducirse en una mejora de la rentabilidad y la estabilidad económica para las familias arroceras al reducir la necesidad de herbicidas costosos y de resistencia inminente.

Además, este enfoque se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2 (Hambre Cero) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres) al impulsar la implementación de sistemas de producción agrícola sostenibles y resilientes que contribuyan a la seguridad alimentaria y a la protección de los ecosistemas, junto con promover el uso responsable de los recursos biológicos, la conservación de la biodiversidad y la restauración de suelos degradados. En Colombia, la estrategia nacional para el cumplimiento de los ODS, liderada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), reconoce la relevancia del sector agropecuario en la transición hacia prácticas de producción sostenibles que reduzcan los impactos ambientales y optimicen el uso de los recursos naturales (Departamento Nacional de Planeación [DNP], s. f.).

Objetivos

Objetivo General

Analizar el potencial de la bioprospección como herramienta del agricultor para el manejo de *Echinochloa crus-galli* en cultivos de arroz.

Objetivos Específicos

Caracterizar los rasgos ecofisiológicos de *Echinochloa crus-galli* como arvense de importancia económica para el cultivo de arroz.

Revisar las fuentes biológicas con potencial alelopático o herbicida documentadas en la literatura científica para control de *Echinochloa crus-galli*.

Proponer, a partir de la revisión de literatura, una estrategia de apropiación del conocimiento que acerque los principios de la bioprospección al agricultor local para el manejo autónomo y sostenible de *Echinochloa crus-galli* en arroz.

Metodología

La presente monografía corresponde a una investigación documental de tipo descriptivo, orientada a la compilación, análisis y síntesis crítica de información científica y técnica relacionada con la bioprospección de fuentes biológicas como alternativa sostenible para el manejo de *Echinochloa crus-galli* en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.).

El proceso metodológico se desarrolló en tres fases:

1. Búsqueda y recopilación de información. Se efectuó una revisión bibliográfica exhaustiva de literatura científica publicada en los últimos veinte años (2005-2025), priorizando artículos de investigación, revisiones, capítulos de libros académicos, informes institucionales y documentos técnicos. Las fuentes se consultaron principalmente en bases de datos y repositorios de acceso abierto o académico, incluyendo Google Académico, Scopus, Web of Science, PubMed, MDPI Journals, SpringerLink, ScienceDirect, ResearchGate, y repositorios institucionales de organismos como la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el United States Department of Agriculture (USDA).

Los descriptores de búsqueda se formularon en inglés y español, combinando términos clave mediante operadores booleanos. Se utilizaron expresiones como “bioprospecting” AND “bioherbicide”, “allelopathy” AND “*Echinochloa crus-galli*”, “weed resistance” AND “*Oryza sativa*”, “biological weed management” OR “microbial control”, y “plant extracts” AND (“weed control” OR “bioherbicides”). Asimismo, se aplicó el operador NOT para excluir estudios no pertinentes, como “NOT insect NOT pathogen”, con el fin de centrar la búsqueda exclusivamente en investigaciones sobre manejo y control de malezas.

2. Criterios de selección y exclusión. Se incluyeron documentos que abordaran directamente la identificación de gramíneas arvenses presentes en cultivos de arroz; los mecanismos de acción de especies vegetales y microorganismos con potencial alelopático o herbicida; y las estrategias de bioprospección orientadas a la obtención de bioinsumos agrícolas.

Se excluyeron publicaciones sin respaldo académico, informes comerciales sin rigor metodológico, y documentos centrados exclusivamente en herbicidas sintéticos. Asimismo, se descartaron aquellos estudios enfocados únicamente en el control de insectos, hongos fitopatógenos, bacterias u otras enfermedades de las plantas, así como aquellos que no abordaran el manejo de malezas, por no estar relacionados con el objeto de esta revisión.

3. Análisis e integración de la información. Se realizó un análisis comparativo de enfoques, metodologías y resultados reportados en los diferentes estudios, lo que permitió construir un panorama integral de los avances, limitaciones y oportunidades en el uso de la bioprospección para el manejo de malezas resistentes. Finalmente, se integraron los hallazgos en función de los objetivos específicos del estudio, elaborando una propuesta conceptual de guía simplificada de bioprospección aplicable al contexto de la agricultura colombiana.

Marco Conceptual y Teórico

Gramíneas Arvenses en Arroz

Rao et al. (2007), citado en Rao & Matsumoto (2017), compilaron una lista de las principales malezas, 140 especies monocotiledóneas y dicotiledóneas, en 27 familias, reportadas como importantes a nivel global en sistemas de arroz de siembra directa. Las gramíneas (Familia *Poaceae*) son las malezas más comunes en los arrozales, seguidas por las ciperáceas (*Cyperaceae*) como el segundo grupo más abundante. Gramíneas como *Echinochloa colona*, arroz rojo, *Digitaria sanguinalis*, *Leptochloa filiformis* e *Ischaemum rugosum*, son particularmente problemáticas en Colombia dado que sus características físicas, fisiológicas y biológicas son muy similares a las de la planta de arroz (Becerra et al., 2020).

El género *Echinochloa sp.* comprende aproximadamente 50 especies anuales y perennes, ampliamente reconocidas como malezas problemáticas en el arroz tropical y templado, siendo *Echinochloa crus-galli* más competitiva en arroz de siembra directa que en arroz trasplantado. Esta especie ha desarrollado adaptaciones a bajas temperaturas a pesar de su vía fotosintética C₄ y se ha extendido por Europa, Norteamérica y China (Rao et al., 2007).

Las especies *Echinochloa phyllopogon* y *Echinochloa oryzoides* son las principales malezas gramíneas en California, y *E. phyllopogon* ha desarrollado resistencia a la mayoría de los herbicidas usados por los agricultores, lo que es indicativo de su diversidad genética. Se ha reportado resistencia a butaclor en China y a propanil en Sri Lanka (Rao et al., 2007). Además, tiene una tasa de germinación rápida, un crecimiento inicial vigoroso y la capacidad de producir entre 40.000 y 42.000 semillas por planta, las cuales pueden permanecer viables en el suelo durante varios años (Marchesi & Saldain, 2019). Las semillas de *E. crus-galli* recién producidas

presentan dormancia innata hasta por 8 o 9 años y germinan de forma escalonada, lo que dificulta su control en una sola aplicación (Bajwa et al., 2015).

Figura 1

Forma de Crecimiento de Echinochloa crus-galli var. crus-galli



Nota. Ejemplar de *Echinochloa crus-galli var. crus-galli* creciendo como maleza ruderal en borde de carretera, Bélgica. Fuente: Hoste & Verloove (2022).

La competencia que ejerce sobre el arroz se evidencia desde las etapas iniciales de desarrollo, donde compite por luz, agua y nutrientes, afectando la altura, el ahijamiento y la acumulación de biomasa del cultivo. En condiciones de alta infestación, *E. crus-galli* puede reducir el rendimiento de grano entre un 35 % y un 75 %, dependiendo del momento de emergencia y densidad poblacional (Suliman & Singh, 2022). Su parecido morfológico con el

arroz en los primeros estadios dificulta la identificación temprana, especialmente en los sistemas de siembra directa, lo que agrava el problema. Adicionalmente, posee un fuerte potencial alelopático, liberando sustancias químicas (ácidos fenólicos como el ácido p-hidroxibenzoico, el p-hidroxibenzaldehído y el ácido vanílico, exudados por las raíces, así como el ácido p-hidroximandélico, liberado por las semillas en germinación) que inhiben el crecimiento de las plantas de arroz cercanas, lo que aumenta su ventaja competitiva (Bajwa et al., 2015).

La presencia de *E. crus-galli* reduce significativamente la capacidad fotosintética y las características fisiológicas del arroz a medida que aumenta la densidad de la maleza. Esta competencia disminuye la actividad de la enzima Rubisco, la capacidad fotosintética de las hojas y la eficiencia de conversión de energía en el arroz. Como consecuencia directa, el rendimiento de grano del arroz se ve severamente afectado, llegando a disminuir hasta en un 58% cuando la densidad de la maleza alcanza 8 plantas por metro cuadrado (Wang et al., 2019).

En términos morfológicos, *Echinochloa crus-galli* es una gramínea anual, cespitosa, de porte variable, que puede alcanzar entre 30 y 130 cm de altura. Presenta tallos robustos, erectos o ascendentes, con base geniculada y capacidad de enraizamiento en los nudos inferiores, lo que favorece su rápida expansión en ambientes agrícolas. Las hojas son largas y estrechas, de lámina lineal a lanceolada, sin lígula, con textura flexible y coloración verde a glaucescente, ocasionalmente con tonalidades purpúreas. La inflorescencia corresponde a una panícula compuesta por numerosos racimos, generalmente de disposición erguida o ligeramente péndula, con espiguillas ovoides provistas de setas, rasgo distintivo del género. Estas características morfológicas contribuyen a su capacidad competitiva en el cultivo de arroz, facilitando su establecimiento y persistencia (Azorín & Crespo, 2021).

Desde el punto de vista ecológico, esta maleza presenta un ciclo de vida corto y una gran capacidad de adaptación a diferentes regímenes de humedad. Se ha observado que germina tanto en suelos saturados como en condiciones de menor disponibilidad hídrica, manteniendo tasas de fotosíntesis y transpiración elevadas. Esta flexibilidad fisiológica le otorga ventaja frente al arroz, especialmente bajo escenarios de estrés hídrico o cambios climáticos. Además, estudios recientes indican que *E. crus-galli* puede modificar su arquitectura radicular y la eficiencia en el uso de nitrógeno en respuesta a la competencia con el cultivo, reforzando su carácter invasivo y competitivo (Suliman & Singh, 2022).

Hamim et al. (2016) concluye que *E. crus-galli* mantiene su función fotosintética de manera más eficaz que el arroz bajo estrés por sequía. En su investigación, la eficiencia máxima de la fotosíntesis disminuyó significativamente menos en *E. crus-galli* (34.40%) en comparación con el arroz (48.04%) después de 6 días de sequía. Además, *E. crus-galli* pudo recuperar su eficiencia fotosintética después de ser regada nuevamente, mientras que el arroz no mostró recuperación, lo que indica un daño más severo en su aparato fotosintético. Esta mayor resistencia se asocia con la capacidad de *E. crus-galli* para mantener un contenido relativo de agua (RWC) más alto durante el período de sequía. Su vía fotosintética C₄ le confiere una ventaja fisiológica, permitiéndole utilizar la luz de manera más eficiente que el arroz (una planta C₃), especialmente en condiciones de alta irradiación y temperaturas elevadas. Esto le otorga una superioridad competitiva en la captación de energía lumínica (Bajwa et al., 2015).

Resistencia a Herbicidas

La resistencia de las malezas a los herbicidas es un problema creciente que compromete seriamente la eficacia de los programas de manejo de malezas y amenaza la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Este fenómeno se define como la capacidad heredable de una población de

malezas de sobrevivir y reproducirse después de la exposición a una dosis de herbicida que, bajo condiciones normales, sería letal para la población original de esa misma especie (Powles & Yu, 2010).

De acuerdo con Valverde (2007), en América Latina se han documentado al menos 21 especies de gramíneas resistentes a herbicidas, siendo *Echinochloa crus-galli* y *Echinochloa colona* las más extendidas y económicamente importantes en los sistemas arroceros. En Colombia, la situación no es ajena a esta problemática global. Diversas especies de malezas han desarrollado resistencia a múltiples modos de acción de herbicidas, lo que complica aún más su control. Según lo indicado por Heap (2025) los casos de resistencia reportados en Colombia incluyen:

-*Echinochloa colona*: Ha mostrado resistencia a Propanil (Inhibidor de PSII - Serina 264, HRAC Grupo 5), Quinclorac (Auxina Mimética, HRAC Grupo 4), y resistencia múltiple a Cyhalofop-butyl (Inhibidor de ACCasa, HRAC Grupo 1), Bispyribac-sodium (Inhibidor de ALS, HRAC Grupo 2) y Quinclorac (Inhibidor de la Síntesis de Celulosa, HRAC Grupo 29, específicamente en monocotiledóneas).

-*Echinochloa crus-galli*: Ha desarrollado resistencia a múltiples herbicidas con diferentes modos de acción. Se han reportado biotipos resistentes a propanil (inhibidor del fotosistema II, HRAC Grupo 5), quinclorac (auxina sintética, HRAC Grupo 4), cyhalofop-butyl (inhibidor de ACCasa, HRAC Grupo 1), penoxsulam y bispyribac-sodium (inhibidores de ALS, HRAC Grupo 2), así como resistencia cruzada a glifosato (inhibidor de EPSPS, HRAC Grupo 9) en poblaciones de Asia y América Latina. El mecanismo de resistencia incluye alteraciones en el sitio de acción en las enzimas acetolactato sintasa (ALS) y acetil-CoA carboxilasa (ACCCase), junto con una mayor actividad de enzimas detoxificantes como citocromo P450 monooxigenasas

y glutatión S-transferasas, que degradan o inactivan el herbicida antes de que interfiera en los procesos fotosintéticos o metabólicos (Valverde, 2007; Suliman & Singh, 2022).

-*Ischaemum rugosum*: Presenta resistencia a Fenoxaprop-ethyl (Inhibidor de Acetil CoA Carboxilasa, HRAC Grupo 1) y Bispyribac-sodium (Inhibidor de Acetolactato Sintasa, HRAC Grupo 2).

-*Chloris radiata*: Ha desarrollado resistencia a Glifosato (Inhibidor de EPSPS, HRAC Grupo9) y a Imazamox (Inhibidor de ALS, HRAC Grupo2).

-*Steinichisma laxum*: Ha desarrollado resistencia a Glifosato (Inhibidor de EPSPS, HRAC Grupo 9).

-*Oryza sativa var. sylvatica*: Ha mostrado resistencia a Imazapyr y Imazamox (ambos inhibidores de ALS, HRAC Grupo 2).

Estos casos evidencian una presión de selección significativa en el agroecosistema arrocero colombiano, impulsada por el uso continuado de los mismos herbicidas o herbicidas con el mismo modo de acción.

En síntesis, dentro de los modos de acción herbicida que afectan procesos fisiológicos clave en las malezas gramíneas se encuentra la inhibición del FOTOSISTEMA II (FS II), ejemplificado por el propanil, que interrumpe el transporte de electrones en la fotosíntesis. La resistencia documentada a este herbicida no se debe a una alteración del sitio de acción, sino a un metabolismo acelerado del compuesto a través de la enzima arilacil amidasa (AAA). Los otros dos modos de acción principales son la inhibición de enzimas específicas: los herbicidas inhibidores de la ACCase bloquean la síntesis de lípidos (ácidos grasos), mientras que los inhibidores de la ALS impiden la producción de aminoácidos esenciales. En estos dos últimos

casos, la resistencia en las malezas suele originarse por mutaciones que alteran la estructura de la enzima objetivo, haciéndola insensible a la acción del herbicida (Valverde, 2007).

Aplicación de la Bioprospección al Manejo de Malezas

La bioprospección emerge como una estrategia fundamental para el desarrollo de soluciones sostenibles en el sector agropecuario, especialmente ante desafíos como la resistencia a herbicidas. Colombia, reconocida por su megadiversidad, posee un potencial significativo para la aplicación de la bioprospección en su vocación agrícola.

Según el CONPES de Biotecnología 3697 de junio de 2011 (Cotes et al., 2012), la bioprospección se define como la "Exploración sistemática y sostenible de la biodiversidad para identificar y obtener nuevas fuentes de compuestos químicos, genes, proteínas, microorganismos y otros productos que tienen potencial de ser aprovechados comercialmente". Esta definición subraya la importancia de un enfoque integral que va más allá de la búsqueda de compuestos, incluyendo su aprovechamiento comercial de manera sostenible.

La integración de productos derivados de la biodiversidad es una opción viable para mejorar la producción agropecuaria y fomentar el desarrollo económico y social de Colombia. La agrobiodiversidad del país permite generar ventajas competitivas a través de recursos promisorios que, con una gestión adecuada de los aspectos jurídicos, económicos, científicos, tecnológicos y comerciales, pueden posicionarse en mercados tanto nacionales como internacionales (Cotes et al., 2012).

El proceso de bioprospección involucra tres etapas o ejes principales, según Melgarejo et al. (2002b), citado en Cotes et al. (2012):

-Investigar (o conocer): Esta primera fase se centra en la exploración de especies agrícolas, animales o microorganismos con el fin de identificar y obtener productos de alta

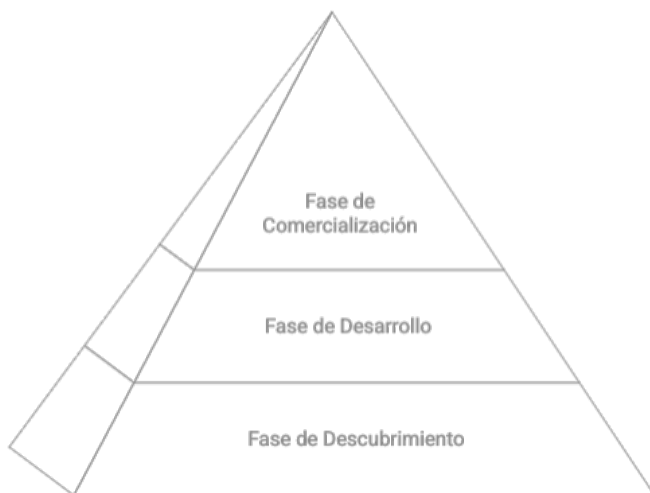
calidad con potencial de aplicación. En el contexto de las malezas, esto implica la búsqueda de compuestos con actividad alelopática o herbicida de origen natural.

-Transformar en producto: Una vez identificados los compuestos o el material biológico de interés, esta etapa se refiere a todos los procesos necesarios para convertir estos descubrimientos en productos agroindustriales (por ejemplo, pulpas, semillas, conservas, productos lácteos, cárnicos) o bioindustriales (como plantas o animales mejorados genéticamente, bioplaguicidas, biofertilizantes, probióticos, prebióticos, aceites esenciales, entre otros). Para el manejo de malezas, esto implicaría el desarrollo de bioherbicidas.

-Comercializar: La etapa final se enfoca en la inserción de estos productos en los mercados, ya sean regionales, nacionales o internacionales, asegurando su viabilidad económica y su impacto en la cadena de valor.

Figura 2

Esquema General del Proceso de Bioprospección de Microorganismos con Potencial Bioherbicida



Nota. El diagrama resume las principales fases desde el reconocimiento de fuentes biológicas hasta la distribución/comercialización del bioinsumo. Adaptado de Aneja et al. (2017).

Para que este proceso avance exitosamente, Cotes et al. (2012) enfatizan la necesidad de un trabajo conjunto y coordinado entre diversos actores: el sector académico, el sector empresarial (regional, nacional o internacional), la comunidad y el gobierno. Esta colaboración intersectorial es crucial para superar los desafíos técnicos, regulatorios y de mercado asociados con el desarrollo y la implementación de soluciones a través de la bioprospección en el campo.

Justamente, la bioprospección en la agricultura, se aplica para el desarrollo de bioherbicidas, biofertilizantes o biopesticidas, aprovechando metabolitos secundarios y microorganismos presentes en plantas, suelos o ambientes específicos. En el contexto de la problemática de las malezas resistentes en el cultivo de arroz, estas estrategias han cobrado interés por su potencial para reducir la dependencia de herbicidas sintéticos y sus impactos negativos.

Arachi (2023) definen tres categorías principales de bioprospección: bioprospección química/ bioquímica, orientada a la búsqueda de compuestos activos; bioprospección genética, centrada en genes o secuencias útiles; y bioprospección biónica, que busca mecanismos biológicos que puedan inspirar tecnologías nuevas.

Al identificar y desarrollar bioherbicidas, se busca disminuir la presión de selección que lleva a la resistencia de las malezas y reducir la contaminación ambiental asociada al uso intensivo de agroquímicos (Schein et al., 2022). Esto se alinea con un manejo sostenible de malezas y los principios de la economía circular en la agricultura.

Estrategias Biológicas para el Control de Malezas

Particularmente, la prospección de bioherbicidas abarca diversas metodologías enfocadas en descubrir agentes de control biológico con actividad fitotóxica. Estos bioherbicidas

representan un conjunto diverso de herramientas para el manejo de malezas, clasificados por su origen, modo de acción y aplicación (Islam et al., 2024):

-Bioherbicidas microbianos: poseen propiedades únicas que les permiten suprimir el desarrollo de malezas o inducir enfermedades en ellas. Estudios recientes han demostrado la viabilidad de aislar microorganismos directamente de malezas que presentan síntomas de enfermedad. Por ejemplo, en un estudio realizado en Brasil, se aislaron sesenta y tres (63) microorganismos de malezas como *Conyza sp.*, *Bidens pilosa* y *Echinochloa crus-galli*. De estas cepas, 21 mostraron efectos fitotóxicos visibles en plantas de ensayo, como necrosis, amarillamiento y manchas foliares. Las cepas más prometedoras identificadas fueron de *Nigrospora sphaerica*, *Bacillus velezensis* y *Aspergillus flavus*, las cuales lograron una fitotoxicidad igual o superior al 80% en las plantas de ensayo (Schein et al., 2022).

Es importante resaltar que, a diferencia de la resistencia a las malezas, que evoluciona rápidamente, hasta la fecha no se ha desarrollado resistencia a ningún bioherbicida microbiano (Islam et al., 2024). Lo anterior, se puede asociar a la complejidad de sus mecanismos de acción, ya que a diferencia de los herbicidas sintéticos, que suelen dirigirse a un único blanco enzimático o metabólico, los bioherbicidas actúan a través de múltiples rutas y procesos a nivel tisular y celular, generando daños estructurales y metabólicos simultáneos. Estos incluyen la producción de mezclas de toxinas y metabolitos secundarios, la degradación de componentes de la pared celular, la inducción de necrosis o el bloqueo del transporte de fotoasimilados, entre otros efectos. Esta complejidad fisiológica reduce la probabilidad de que una sola mutación en la maleza sea suficiente para conferir resistencia, lo que da cuenta de la baja velocidad con que este fenómeno evoluciona en comparación con los herbicidas químicos convencionales (Becerra-Alvarez, 2025).

Otros estudios para el control de *Echinochloa crus-galli* se han realizado con cepas de *Colletotrichum echinocloeae* (Gu et al., 2023) y *Exserohilum monoceras* (Tosiah et al., 2010). Adicionalmente, un aislado de *Colletotrichum echinocloeae* ha demostrado alta patogenicidad en etapas de tres a cuatro hojas, logrando una reducción de peso fresco de más del 50% con una concentración de 1×10^7 esporas/mL (Gu et al., 2023). De igual forma, cepas de rizobacterias deletéreas (DRB) como *Pseudomonas fluorescens* han mostrado potencial para reducir el crecimiento de *Echinochloa* sp., inhibiendo la germinación y el desarrollo de raíces y brotes (Hoesain et al., 2024).

Por otro lado, para el control de *Leptochloa chinensis* se han evaluado hongos indígenas en Kyushu, Japón, aislados de *Bipolaris* sp. y *Exserohilum* sp., que mostraron patogenicidad específica para las plántulas de esta maleza, sin afectar el arroz (Yamaguchi et al., 2011).

-Bioherbicidas de extractos de plantas: utilizan los componentes bioactivos presentes en las plantas para interrumpir eficazmente el crecimiento y el metabolismo de las malezas. Ejemplos comunes incluyen extractos de neem, clavo, canela o vinagre, todos los cuales han demostrado potentes efectos herbicidas. Un ejemplo es el extracto acuoso de *Sorghum bicolor*, que redujo la biomasa de *E. crus-galli* en un 40%, aumentando la producción de arroz en un 18% (Islam et al., 2024).

Otros estudios han explorado la eficacia de extractos de malezas como *Ageratum conyzoides* y *Chromolaena odorata* como bioherbicidas de pre-emergencia en el cultivo de arroz. En *Ageratum conyzoides* se han reportado compuestos como precocene I y II, cumarinas, chromenos y diversos terpenoides, los cuales explican su actividad fitotóxica sobre la germinación y el crecimiento de plántulas al interferir en la síntesis proteica y la elongación celular (Erida et al., 2023). De forma similar, *Chromolaena odorata* contiene ácidos fenólicos,

flavonoides y terpenoides volátiles, asociados con efectos alelopáticos que reducen la fotosíntesis y causan daño tisular en malezas, evidenciando una acción multifactorial de su extracto crudo (Poonpaiboonpipat et al., 2021).

Adicionalmente, en *Sorghum bicolor*, se destaca la presencia de sorgoleona, un aleloquímico de tipo benzoquinona, junto con varios ácidos fenólicos como el p-coumárico, ferúlico, cafeico y p-hidroxibenzoico, que inhiben la germinación y la elongación radicular de *E. crus-galli* (Afzal et al., 2023). Finalmente, en los aceites esenciales de *Syzygium aromaticum* (clavo) se han identificado eugenol, α -cariofileno y β -cariofileno como los principales compuestos activos, responsables de alterar la permeabilidad de membranas celulares y la actividad enzimática de la maleza (Ni et al., 2024).

-Bioherbicidas bioquímicos: se formulan utilizando compuestos específicos extraídos o sintetizados a partir de fuentes naturales. Estos compuestos interfieren con los procesos bioquímicos de las malezas, inhibiendo su crecimiento y desarrollo. Ejemplos incluyen enzimas específicas, hormonas vegetales o metabolitos secundarios con efectos herbicidas (Islam et al., 2024).

Por otra parte, la biomimesis representa una estrategia emergente en el diseño de bioherbicidas bioquímicos, orientada a desarrollar moléculas inspiradas en los metabolitos naturales que intervienen en los mecanismos de defensa de las plantas. Este enfoque busca reproducir o adaptar reacciones enzimáticas propias de los sistemas biológicos mediante rutas sintéticas dentro del marco de la química orgánica, permitiendo obtener compuestos con estructuras y funciones análogas a las de productos naturales con actividad herbicida (Adou et al., 2022). La síntesis biomimética, fue introducida inicialmente por Robinson en 1917 y posteriormente desarrollada por Van Tamelen en 1961, y ha permitido el diseño de diversas

familias de compuestos bioactivos, como alcaloides, terpenoides, polifenoles y policétidos, con potencial para el control de plagas y malezas (Adou et al., 2022).

-Agentes de biocontrol: emplean organismos vivos, como insectos, nematodos o animales herbívoros, para manejar las poblaciones de malezas. Estos organismos actúan como enemigos naturales de las malezas, consumiéndolas o interrumpiendo su crecimiento (Islam et al., 2024).

-Bioherbicidas basados en semillas: controlan las malezas durante la germinación y el crecimiento temprano del cultivo mediante la aplicación de ingredientes específicos a las semillas antes de la siembra. Protegen los cultivos emergentes de la competencia de las malezas y ayudan a establecer las plantas deseadas (Islam et al., 2024).

-Aleloquímicos como bioherbicidas: son compuestos naturales producidos por ciertas plantas que pueden inhibir el crecimiento y desarrollo de las plantas competidoras circundantes, proporcionando una solución ecológica para el manejo de malezas. Se han identificado varios aleloquímicos con propiedades bioherbicidas, incluyendo la juglona del nogal negro, la sorgoleona del sorgo, los benzoxazinoides del centeno, la catequina de varias plantas y el eucaliptol de los árboles de eucalipto. Estos aleloquímicos han demostrado una inhibición efectiva contra una amplia gama de malezas objetivo, tanto gramíneas como de hoja ancha, ofreciendo potencial para estrategias sostenibles de control de malezas. Su origen natural reduce el riesgo de efectos nocivos en organismos no objetivo y minimiza los residuos químicos en el ambiente (Islam et al., 2024).

Especies como *Leucaena leucocephala*, a pesar de ser invasoras, producen aleloquímicos que inhiben la germinación y el crecimiento de otras plantas, incluyendo malezas. La exploración de estos compuestos puede proporcionar nuevas moléculas para el desarrollo de herbicidas naturales (Kato-Noguchi & Kurniadie, 2022). Un ejemplo de aplicación práctica es la

integración de residuos de paja de arroz o plantas de mostaza como mulch o cultivos de cobertura, que liberan compuestos alelopáticos reduciendo la emergencia y el crecimiento de malezas como *Echinochloa crus-galli* y *Cyperus difformis* (Singh et al., 2020).

-Aceites esenciales como bioherbicidas: Moléculas volátiles naturales extraídas de diversas partes de plantas (hojas, corteza, flores, frutos, semillas, raíces). Los terpenoides, principalmente mono y sesquiterpenos, son los principales componentes activos de los aceites esenciales y pueden ser buenos candidatos para futuras formulaciones de bioherbicidas debido a su alta acción fitotóxica contra varias especies de malezas. Sus efectos fitotóxicos incluyen clorosis, quemaduras de hojas, disminución del desarrollo de la planta, supresión de la mitosis, despolarización de la membrana, pérdida de contenido de clorofila, respiración celular y daño oxidativo (Islam et al., 2024).

Resultados

Las sabanas de América del Sur cubren alrededor de 270 millones de hectáreas (Mha), de las cuales 17 Mha están ubicadas en los Llanos Orientales de Colombia, entre los diferentes paisajes que componen el ecosistema productivo, y cuyos suelos están dominados por Oxisoles y Ultisoles, caracterizados por una baja fertilidad natural como resultado de un avanzado estado de meteorización y lixiviación. Químicamente, estos suelos presentan alta acidez, toxicidad por aluminio intercambiable y una baja capacidad de intercambio catiónico. El fósforo es considerado el elemento más limitante para el desarrollo de las plantas en estos suelos ácidos (Rivera et al., 2012).

En estudios realizados sobre Oxisoles franco-arcillosos en esta región, la de mayor producción arrocerá en Colombia, se ha reportado la presencia de bacterias Gram-positivas y Gram-negativas, actinomicetos y microorganismos asociados a procesos clave como la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fósforo. Entre los hongos filamentosos predominantes destacan géneros como *Penicillium* spp., *Fusarium* spp. y *Trichoderma* spp., reconocidos por su papel en la descomposición de materia orgánica, el control biológico de fitopatógenos y la promoción del crecimiento vegetal (Chaves-Bedoya et al., 2013).

Particularmente, en los suelos arroceros del departamento del Meta se identificó una elevada diversidad de microorganismos rizosféricos, incluyendo tanto especies cultivables como no cultivables. Dentro de las bacterias predominantes se destacan géneros con funciones agroecológicas relevantes como *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Burkholderia cepacia*, *Klebsiella oxytoca* y *Rhizobium leguminosarum*, asociados a la fijación biológica de nitrógeno, la producción de fitohormonas y el control biológico de patógenos. Entre los hongos se reportaron *Aspergillus niger*, *Penicillium janthinellum*, *Trichoderma harzianum* y *Fusarium*

oxysporum, con actividades destacadas en la descomposición de residuos orgánicos y la solubilización de fósforo. También se registró la presencia de actinomicetos del género *Streptomyces sp.*, reconocidos por su capacidad de producir metabolitos antimicrobianos y enzimas hidrolíticas (Uribe & Melgarejo, 2012).

Aunque diversas bacterias rizosféricas tradicionalmente se asocian con la promoción del crecimiento vegetal, pueden manifestar efectos fitotóxicos bajo determinadas condiciones edáficas y fisiológicas que conllevan a desequilibrios hormonales y la producción de metabolitos fitotóxicos (Etesami, 2025). Por ejemplo, una sobreproducción de auxinas (AIA) o etileno puede alterar el equilibrio hormonal de la planta, provocando un crecimiento atrofiado, inhibición del desarrollo radicular o incluso necrosis en los tejidos. Asimismo, ciertas cepas de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) pueden producir compuestos como el cianuro de hidrógeno (HCN), que interfiere con la función mitocondrial e induce estrés oxidativo, causando la muerte celular. Dichas consecuencias negativas se amplifican en condiciones de riesgo, que incluyen sequía, temperaturas extremas, suelos muy ácidos ($\text{pH} < 5.5$) o alcalinos ($\text{pH} > 8.5$) y alta competencia microbiana (Etesami, 2025).

Esta dualidad funcional también se manifiesta en la producción microbiana de metabolitos secundarios con actividad herbicida directa, muchos de los cuales presentan mecanismos de acción comparables a los de los herbicidas sintéticos, aunque con mayor especificidad biológica y menor persistencia ambiental (Duke & Dayan, 2011). Dichos compuestos actúan sobre rutas metabólicas esenciales en las plantas, interfiriendo en procesos como la síntesis de aminoácidos, la fotosíntesis, la división celular o la integridad de membranas, provocando la inhibición del crecimiento, necrosis o muerte celular (Shi et al., 2019; Cimmino et al., 2015).

Uno de los modos de acción más comunes entre los metabolitos bacterianos es la inhibición de la síntesis de aminoácidos esenciales. Por ejemplo, la bialafos y la fosfotricina, producidas por *Streptomyces hygroscopicus* y *Streptomyces viridochromogenes*, bloquean la actividad de la enzima glutamina sintetasa, generando acumulación de amonio y desintegración celular (Shi et al., 2019). Este mecanismo es análogo al del herbicida glufosinato y conduce a la inhibición de la fotosíntesis y la muerte del tejido vegetal. Otros metabolitos bacterianos, como el ácido 2,4-diacetilfloroglucinol sintetizado por *Pseudomonas fluorescens*, inducen estrés oxidativo y peroxidación lipídica, afectando la integridad de las membranas y los sistemas enzimáticos dependientes de NADPH (Duke & Dayan, 2011).

Por otro lado, numerosas toxinas fúngicas interfieren directamente en el transporte de electrones fotosintético. Cimmino et al. (2015) señalan que metabolitos como la tenuazona y la tentoxina, producidos por *Alternaria alternata*, bloquean la ATP sintasa del cloroplasto e inhiben la fosforilación oxidativa, lo que genera una reducción drástica en la producción de energía y, por ende, en la síntesis de biomasa. Otros compuestos, como la ascaulitoxina y la cercosporina, actúan como fotosensibilizadores que inducen la generación de especies reactivas de oxígeno, provocando necrosis en los tejidos expuestos a la luz (Cimmino et al., 2015; Duke & Dayan, 2011).

De igual forma, algunos metabolitos bacterianos como la herbicidina A, aislada de *Streptomyces saganonensis*, inhiben la biosíntesis de clorofila y la actividad de la enzima protox, interfiriendo con la ruta del ácido tetrapirrólico y generando síntomas de blanqueamiento y marchitez (Shi et al., 2019).

Ciertos hongos fitopatógenos producen compuestos que afectan directamente la división y elongación celular, impidiendo el desarrollo normal de las raíces o los brotes. Entre ellos,

destacan las nonenólidas, como la stagonolida A y la modiolida, sintetizadas por especies de *Stagonospora sp.* y *Cochliobolus sp.*, que interfieren con el ensamblaje de microtúbulos y el funcionamiento del citoesqueleto (Cimmino et al., 2015). Estas moléculas limitan la expansión de las paredes celulares y el crecimiento apical, afectando principalmente a las malezas monocotiledóneas.

Otros sintetizan metabolitos como la ophiobolina A, producida por *Helminthosporium gramineum* f.sp. *echinocloae*, que alteran la integridad de la membrana plasmática al interactuar con los fosfolípidos, lo que provoca pérdida de iones y colapso osmótico (Duke & Dayan, 2011). De manera similar, algunas toxinas de *Fusarium sp.* y *Trichoderma sp.* actúan sobre las mitocondrias vegetales, inhibiendo las enzimas del ciclo de Krebs o de la cadena respiratoria, lo que genera deficiencias energéticas y acumulación de radicales libres (Cimmino et al., 2015).

Muchas de estas fitotoxinas no son completamente selectivas y pueden producir efectos tóxicos similares tanto en plantas hospedantes como en no hospedantes, lo que dificulta su aplicación directa en campo y requiere estudios adicionales para lograr un control específico y seguro (Duke & Dayan, 2011; Cimmino et al., 2015). Lo anterior depende de su estructura química y del tipo de interacción con las células del hospedante (Aung Bo Bo, 2020). Las fitotoxinas específicas del hospedante actúan sobre receptores o enzimas concretas presentes únicamente en determinadas especies. En contraste, las fitotoxinas no específicas presentan actividad sobre múltiples especies vegetales al interferir en procesos metabólicos universales, como la fotosíntesis, la respiración o la integridad de las membranas celulares (Cimmino et al., 2015). Este grupo incluye compuestos como la tenuazona y la tentoxina, que inhiben la transferencia de electrones en el fotosistema II y bloquean la fosforilación en los cloroplastos, afectando tanto a hospedantes como a no hospedantes (Aung Bo Bo, 2020).

Cabe resaltar que según Nečajeva et al. (2023), las semillas de *Echinochloa crus-galli* poseen un sistema de defensa complejo que combina mecanismos físicos y químicos frente a la infección causada por especies del género *Fusarium sp.* Entre las barreras físicas más relevantes se encuentra una cubierta seminal densa y resistente, que limita la penetración del micelio y retrasa la degradación de los tejidos. En cuanto a las defensas químicas, se ha identificado la presencia de compuestos fenólicos y péptidos con actividad antifúngica, los cuales inhiben la germinación de esporas y restringen su crecimiento. Además, se observa una variabilidad intraespecífica en la resistencia de *E. crus-galli*, ya que las poblaciones con semillas de mayor grosor o con un contenido elevado de fenoles muestran una menor tasa de infección y degradación, evidenciando una relación directa entre las características estructurales y bioquímicas de las semillas y su capacidad de defensa frente a los patógenos fúngicos (Necajeva et al., 2023).

En cuanto a los efectos de los bioherbicidas vegetales sobre el crecimiento de las malezas, estos se manifiestan principalmente en la inhibición de la germinación y en la reducción del desarrollo radicular y foliar. Según Hasan et al. (2021), los extractos acuosos y metanólicos ricos en compuestos fenólicos y terpenoides interfieren en la absorción de agua y nutrientes, alteran la permeabilidad de las membranas celulares y provocan un retraso en la emergencia de plántulas. En *Echinochloa crus-galli*, estos efectos se traducen en una disminución de la tasa de germinación y en un crecimiento más lento, reduciendo su competitividad frente al arroz (*Oryza sativa*). La fitotoxicidad observada en estos tratamientos está asociada a la acción sinérgica de diversos metabolitos secundarios, que afectan no solo la estructura anatómica de la planta, sino también sus procesos fisiológicos clave, evidenciando un alto potencial para su aplicación en estrategias de manejo integrado de malezas (Hasan et al., 2021; Islam et al., 2024).

Desde una perspectiva bioquímica, los bioherbicidas de origen vegetal actúan alterando el equilibrio metabólico y redox de las malezas. Hasan et al. (2021) reportan que compuestos como el eugenol, el timol y la carvacrol inhiben la actividad del fotosistema II (PSII), reduciendo la eficiencia cuántica y la producción de ATP, lo que desencadena estrés oxidativo severo y daño en los cloroplastos. Adicionalmente, algunos compuestos fenólicos interfieren con la actividad de la H⁺-ATPasa de membrana, comprometiendo el transporte de iones y la homeostasis celular, mientras que los terpenoides modifican la estructura lipídica de las membranas, generando fugas de electrolitos y pérdida de turgencia celular.

Estos efectos bioquímicos conllevan a la inhibición de la fotosíntesis, la reducción del contenido de clorofila y la degradación de proteínas estructurales, que en conjunto provocan el colapso funcional de los tejidos vegetales de las malezas (Hasan et al., 2021). En consecuencia, los bioherbicidas vegetales no solo actúan como inhibidores del crecimiento, sino también como disruptores metabólicos, afectando simultáneamente múltiples rutas fisiológicas. Este modo de acción complejo no solo confiere una elevada eficacia fitotóxica, sino que además limita la aparición de resistencia adaptativa, lo que posiciona a los bioherbicidas como una alternativa estratégica frente a los herbicidas sintéticos convencionales.

Por otro lado, el arroz (*Oryza sativa* L.) posee la capacidad natural de suprimir el crecimiento de malezas competidoras, entre ellas *Echinochloa crus-galli*, mediante mecanismos de alelopatía, que le permiten inhibir la germinación y el desarrollo de otras plantas cercanas, aunque esta capacidad varía considerablemente entre variedades y grupos genéticos (Khanh et al., 2007). La variedad Japónica presenta una actividad inhibitoria significativamente mayor que Índica y los híbridos Índica–Japónica, lo que se atribuye a una mayor capacidad de biosíntesis y liberación de momilactonas A y B, ácidos fenólicos y otros diterpenoides con efecto fitotóxico.

En ensayos a gran escala, de más de 5000 cultivares analizados, solo 94 mostraron actividad alelopática efectiva contra *E. crus-galli*, mientras que 412 de 12000 resultaron activas frente a otras especies de malezas, lo que evidencia la elevada heterogeneidad genética y fisiológica (Khanh et al., 2007).

Además de la base genética, factores agronómicos y morfológicos influyen en la intensidad alelopática. Las variedades de madurez intermedia, con menor número de panículas y mayor altura de planta, tienden a presentar mayor potencial inhibitorio, al igual que aquellas con cáscaras de grano sin pigmentación, posiblemente asociado a las diferencias en la acumulación y liberación de compuestos fenólicos. De forma complementaria, los residuos de cosecha de cultivares alelopáticos como hojas, tallos y cáscaras, también muestran actividad supresora: su incorporación al suelo puede reducir la germinación y vigor de *E. crus-galli* entre un 60 y 95 %, lo que sugiere su aprovechamiento como bioresiduo herbicida natural (Khanh et al., 2007; Rahaman et al., 2022).

De manera reciente, Rahaman et al. (2022) ampliaron esta perspectiva demostrando que la alelopatía del arroz no solo depende de la composición química, sino también de la expresión inducible de genes defensivos bajo competencia con malezas. Los autores señalan que las variedades alelopáticas activan rutas de señalización del ácido jasmónico y la fenilpropanoide, incrementando la síntesis de momilactonas y compuestos fenólicos en respuesta a la presencia de *E. crus-galli*.

Asimismo, Bajwa et al. (2015) destacan que la alelopatía del arroz frente a *E. crus-galli* constituye un mecanismo de competencia ecológica fundamental, mediado por la liberación de compuestos secundarios con efecto fitotóxico, como los ácidos fenólicos y las momilactonas, señalando que la intensidad del efecto alelopático varía entre cultivares, dependiendo de su

capacidad de biosíntesis y exudación de metabolitos al rizosferio. Además, indican que la interacción entre ambas especies genera respuestas fisiológicas y bioquímicas en el arroz que refuerzan su potencial inhibitorio, modificando las condiciones del suelo y la dinámica microbiana en torno a las raíces. En este sentido, la alelopatía se consolida como una herramienta natural que puede aprovecharse dentro de estrategias de manejo integrado, permitiendo reducir la dependencia de herbicidas y favorecer sistemas de cultivo más sostenibles (Bajwa et al., 2015).

Fuentes Biológicas con Potencial Bioherbicida para el Control de *Echinochloa sp.*

Diferentes estudios han evidenciado un creciente interés en el uso de organismos vegetales y microbianos como agentes de biocontrol (BCAs, *Biological Control Agents*) para el manejo sostenible de *Echinochloa sp.* en cultivos de arroz. En las Tablas 1, 2, 3 y 4 se sintetizan algunas de las especies evaluadas por su potencial alelopático o bioherbicida, agrupadas según tipo de agente.

Tabla 1*Plantas como Agentes de Biocontrol de Echinochloa sp.*

Especie	Modo de acción/Uso	Agente usado	Malezas objetivo	Localización	Referencia
<i>Fagopyrum esculentum</i>	Aleloquímicos (Ácido araquídico, ácido behénico, ácido cafeico, ácido cromogénico, ácido ferúlico, ácido palmítico)	Extractos acuosos de hojas/tallo	<i>Echinochloa crus-galli</i> , <i>Cyperus difformis</i>	Japón	(Fahad et al., 2021)
<i>Sorghum bicolor</i>	Inhiben la germinación y la elongación radicular	Extractos de hojas/tallo/raíz	<i>Echinocloa colona</i> , <i>Cyperus rotundus</i>	Pakistán	(Fahad et al., 2021)
<i>Tagetes minuta</i>	Aleloquímicos (α pineno, ocimenona, limoneno)	Extractos de hojas y tallo	<i>Cyperus rotundus</i> , <i>Echinochloa crus-galli</i>	India, Pakistán	(Fahad et al., 2021)
<i>Cucumis sativus L</i>	Inhibición de germinación y crecimiento	Extractos acuosos de hojas/tallo	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Vietnam	(Thi et al., 2008)
<i>Cakile maritima</i>	Reducción en germinación, y crecimiento de raíz y tallo	Extractos metanólicos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Egipto	(El-Amier and Abdullah, 2014)
<i>Calligonum polygonoides</i>	Reducción en germinación, y crecimiento de raíz y tallo	Extractos metanólicos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Egipto	(El-Amier and Abdullah, 2014)
<i>Senecio glaucus</i>	Reducción en germinación, y crecimiento de raíz y tallo	Extractos metanólicos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Egipto	(El-Amier and Abdullah, 2014)
<i>Zygophyllum album</i>	Reducción en germinación, y crecimiento de raíz y tallo	Extractos metanólicos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Egipto	(El-Amier and Abdullah, 2014)

<i>Leucas aspera</i> L.	Inhibición del crecimiento de la plúmula y de la raíz	Extractos metanólicos acuosos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Bangladesh	(Islam & Kato-Noguchi, 2013)
<i>Leonurus sibiricus</i> L.	Inhibición del crecimiento de la plúmula y de la raíz	Extractos metanólicos acuosos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Bangladesh	(Islam & Kato-Noguchi, 2013)
<i>Ocimum tenuiflorum</i> L.	Inhibición del crecimiento de la plúmula y de la raíz	Extractos metanólicos acuosos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Bangladesh	(Islam & Kato-Noguchi, 2013)
<i>Mentha sylvestris</i> L.	Inhibición del crecimiento de la plúmula y de la raíz	Extractos metanólicos acuosos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Bangladesh	(Islam & Kato-Noguchi, 2013)
<i>Hyptis suaveolens</i> L.	Inhibición del crecimiento de la plúmula y de la raíz	Extractos metanólicos acuosos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Bangladesh	(Islam & Kato-Noguchi, 2013)
<i>Rapanea umbellate</i>	Reducción en germinación y crecimiento	Extractos de hojas acuosos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Brasil	(Novaes et al., 2013)
<i>Cymbopogon citratus</i>	Reducción en germinación, crecimiento, actividad fotosintética y proceso metabólico	Aceite esencial fitotóxico	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Tailandia	(Poonpaiboonpipat et al., 2013)
<i>Juglans nigra</i>	Inhibe la actividad de la H ⁺ -ATPasa, disminuye la fotosíntesis y reduce la producción de raíces, hojas y cotiledones.	Extractos de nuez negra	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Estados Unidos	(Shrestha, A, 2009)
<i>Ageratum conyzoides</i> L.	Reducción de crecimiento.	Mezcla en suelo (polvo)	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Vietnam	(Wato, 2020)
<i>Cosmos bipinnatus</i>	Inhibición de crecimiento. Producción de	Extracto metanólico de hojas	<i>Echinochloa crus-galli</i> ,	Vietnam	(Trang et al., 2024)

	compuestos fenólicos como ácido cafeico, ferúlico, cumárico, cinámico, salicílico y 2,4- dimetoxibenzoico.		<i>Echinochloa colona</i>		
<i>Tithonia diversifolia</i>	Inhibición de crecimiento radicular	Extracto metanólico de hojas.	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Vietnam	(Trang et al., 2024)
<i>Wedelia chinensis</i>	Reducción de germinación y crecimiento	Extracto metanólico de planta entera.	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Vietnam	(Trang et al., 2024)
<i>Carum carvi L</i>	Lesiones foliares y reducción de la eficiencia fotosintética del fotosistema II Reducción de la germinación y del crecimiento mediante	Emulsión aceite en agua a partir de las semillas	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Polonia	(Synowieck et al., 2019)
<i>Chromolaena odorata</i>	disminución de clorofilas a, b y carotenoides, inducción de peroxidación lipídica y daño en membranas celulares Inhibición de germinación y crecimiento mediante	Extracto etanólico crudo de hojas (fracción hexánica), formulado como suspensión concentrada	<i>Echinochloa crus-galli, Amaranthus viridis</i>	Tailandia	(Poonpaiboonpi pat et al., 2021)
<i>Syzygium aromaticum</i>	alteraciones en la integridad de membranas, daño oxidativo y reducción de la eficiencia fotosintética (PSII)	Aceite esencial rico en eugenol y β -cariofileno	<i>Echinochloa crus-galli</i>	China	(Ni et al., 2024)
<i>Alocasia cucullata</i>	Reducción de germinación y crecimiento.	Material vegetal (hojas, tallos, raíces)	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Japón	(Khanh et al., 2005)

		incorporado o extractos acuosos			
<i>Nerium oleander*</i>	Reducción de germinación y crecimiento.	Extracto acuoso de material vegetal	<i>Echinochloa crus-galli, M. vaginalis</i>	Japón	(Khanh et al., 2005)
<i>Helianthus tuberosus*</i>	Reducción de germinación y crecimiento.	Extracto acuoso de material vegetal	<i>Echinochloa crus-galli, M. vaginalis</i>	Japón	(Khanh et al., 2005)
<i>Sophora japónica*</i>	Reducción de germinación y crecimiento.	Extracto acuoso de material vegetal	<i>Echinochloa crus-galli, M. vaginalis</i>	Japón	(Khanh et al., 2005)
<i>Passiflora incarnata</i>	Reducción de germinación y crecimiento.	Extracto acuoso de material vegetal	<i>Echinochloa crus-galli, M. vaginalis</i>	Japón	(Khanh et al., 2005)
<i>Brassica napus L.</i>	Inhibición de germinación y crecimiento	cobertura superficial del suelo (paja de colza 1-3cm)	<i>Echinochloa crus-galli, Cyperus difformis, Monochoria vaginalis</i>	China	(Zhu et al., 2020)
<i>Reichardia tingitana</i>	Inhibición de la germinación y del crecimiento radicular y foliar	Extractos metanólicos y acuosos de hojas	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Egipto	(El-Amier et al., 2015)
<i>Dieffenbachia amoena W. Bull</i>	Inhibición de la germinación y del crecimiento radicular	Extractos metanólicos de tallos y hojas frescas	<i>Echinochloa crus-galli</i>	México	(Díaz-Mota et al., 2017)
<i>Raphanus sativus L.</i>	Inhibición de la germinación y elongación de plúmula y radícula	Extractos metanólicos de raíces	<i>Echinochloa crus-galli</i>	México	(Díaz-Mota et al., 2017)

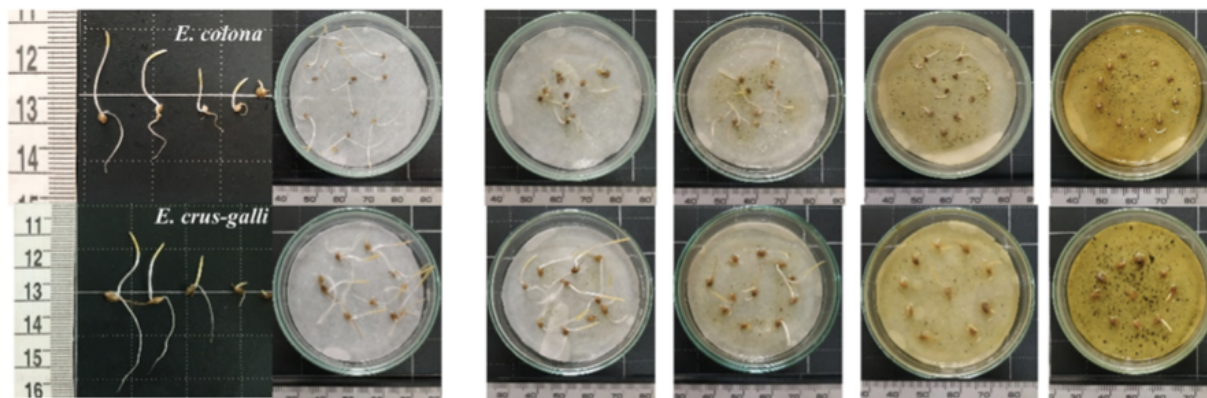
Nota. *Khanh et al. (2005) demostraron que la incorporación de grandes cantidades (1–1.5

t·ha⁻¹) de material vegetal de especies medicinales y leguminosas (*Nerium oleander*, *Helianthus tuberosus* y *Sophora japónica*) reduce significativamente la biomasa de malezas como *Echinochloa crus-galli* en condiciones de invernadero y campo, y además aumenta el rendimiento del arroz.

Se presenta a continuación un ejemplo experimental que ilustra el efecto bioherbicida del extracto de *Cosmos bipinnatus* sobre *E. colona* y *E. crus-galli*.

Figura 3

Inhibición de Echinochloa colona y Echinochloa crus-galli por Extracto Metanólico de Cosmos bipinnatus



Nota. *E. colona* (arriba) y *E. crus-galli* (abajo). De izquierda a derecha, la concentración del extracto se incrementa progresivamente a 0, 0,03, 0,1, 0,3 y 1,0 g/mL. Fuente: Trang et al., 2024.

De manera complementaria al potencial bioherbicida identificado en especies vegetales, la literatura también reporta numerosos hongos con capacidad para producir metabolitos con actividad fitotóxica frente a *Echinochloa* sp., los cuales se sintetizan en la Tabla 2.

Tabla 2*Hongos como Agentes de Biocontrol de Echinochloa sp.*

Especie	Modo de acción/Uso	Agente usado	Malezas objetivo	Localización	Referencia
<i>Exserohilum monoceras</i>	Inhibición de crecimiento	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Malasia	(Hailmi et al., 2011)
<i>Drechslera monoceras</i>	Inhibición de crecimiento	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	China	(Huang et al., 2012)
<i>Exserohilum longirostratum</i>	Inhibición de crecimiento, menor producción de macollas	Suspensión de conidias/micelio	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Malasia	(Ng et al., 2011)
<i>Fusarium equiseti</i>	Inhibición de emergencia y desarrollo de plántulas	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa spp.</i>	Iran	(Motlagh, 2010)
<i>Curvularia lunata</i>	Control en las etapas de 1 a 2,5 hojas.	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Beijing	(Jing et al., 2013)
<i>Helminthosporium gramineum</i>	Producción de un metabolito secundario, ofiobolina A*	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	China	(Geng et al., 2009)
<i>Cochliobolus lunatus</i>	Inhibición de crecimiento	Suspensión de esporas	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Países bajos	(Bandara & Kavindi, 2023)
<i>Nigrospora sphaerica</i>	Inhibición de crecimiento	Caldo fermentativo	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Brasil	(Schein et al., 2022)
<i>Aspergillus flavus</i>	Inhibición de crecimiento	Caldo fermentativo	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Brasil	(Schein et al., 2022)
<i>Nigrospora oryzae</i>	Inhibición de germinación de semillas	Filtrados fúngicos crudos	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Egipto	(Mohammed & Badawy, 2020)
<i>Alternaria alternata</i>	Producción de toxina AAC	Formulación de toxina AAC	<i>Echinochloa crus-galli</i>	China	(Qiang et al., 2010)
<i>Colletotrichum echinochloae</i> **	Inhibición de crecimiento	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	China	(Gu et al., 2023)
<i>Fusarium culmorum</i>	Inhibición de germinación de semillas	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Letonia	(Nečajeva et al., 2023)

<i>Fusarium sporotrichioides</i>	Inhibición de germinación de semillas	Suspensión de conidias	<i>Echinochloa crus-galli</i>	Letonia	(Nečajeva et al., 2023)
<i>Bipolaris yamadae</i>	Inhibición de crecimiento	Suspensión de conidias Caldo fermentativo del hongo	<i>Echinochloa crus-galli</i> <i>Echinochloa crus-galli, maranthus</i>	China	(Tan et al., 2024)
<i>Diaporthe schini</i>	Inhibición de crecimiento	(fermentación sumergida y fermentación en estado sólido) Caldo fermentativo del hongo	<i>viridis,</i> <i>Bidens pilosa,</i> <i>Lolium multiflorum</i> <i>Echinochloa s</i>	Brasil	(Brun et al., 2020)
<i>Phoma dimorpha</i>	Inhibición de crecimiento	Caldo fermentativo del hongo	p.	Brasil	(Neto et al., 2021)
<i>Trichoderma afroharzianum</i>	Inhibición de germinación y crecimiento. Producción de éster etílico del ácido linoleico/alteración de la regulación del ácido abscísico	Método de cámara de doble placa/ placas Petri divididas (I-plates)	<i>Echinochloa colona</i>	China	(Zheng et al., 2023)
<i>Trichoderma asperelloides</i>	Inhibición de germinación y crecimiento. Producción de éster etílico del ácido linoleico/alteración de la regulación del ácido abscísico	Método de cámara de doble placa/ placas Petri divididas (I-plates)	<i>Echinochloa colona</i>	China	(Zheng et al., 2023)
<i>Trichoderma atroviride</i>	Inhibición de germinación y crecimiento. Producción de éster etílico del ácido linoleico/alteración de la regulación del ácido abscísico	Método de cámara de doble placa/ placas Petri divididas (I-plates)	<i>Echinochloa colona</i>	China	(Zheng et al., 2023)
<i>Trichoderma koningiopsis</i>	Inhibición de germinación y crecimiento. Producción de éster	Método de cámara de doble placa/	<i>Echinochloa colona</i>	China	(Zheng et al., 2023)

	etílico del ácido linoleico/alteración de la regulación del ácido abscísico Inhibición de germinación y crecimiento.	placas Petri divididas (I- plates)			
<i>Trichoderma virens</i>	Producción de éster etílico del ácido linoleico/alteración de la regulación del ácido abscísico	Método de cámara de doble placa/ placas Petri divididas (I- plates)	<i>Echinochloa colona</i>	China	(Zheng et al., 2023)

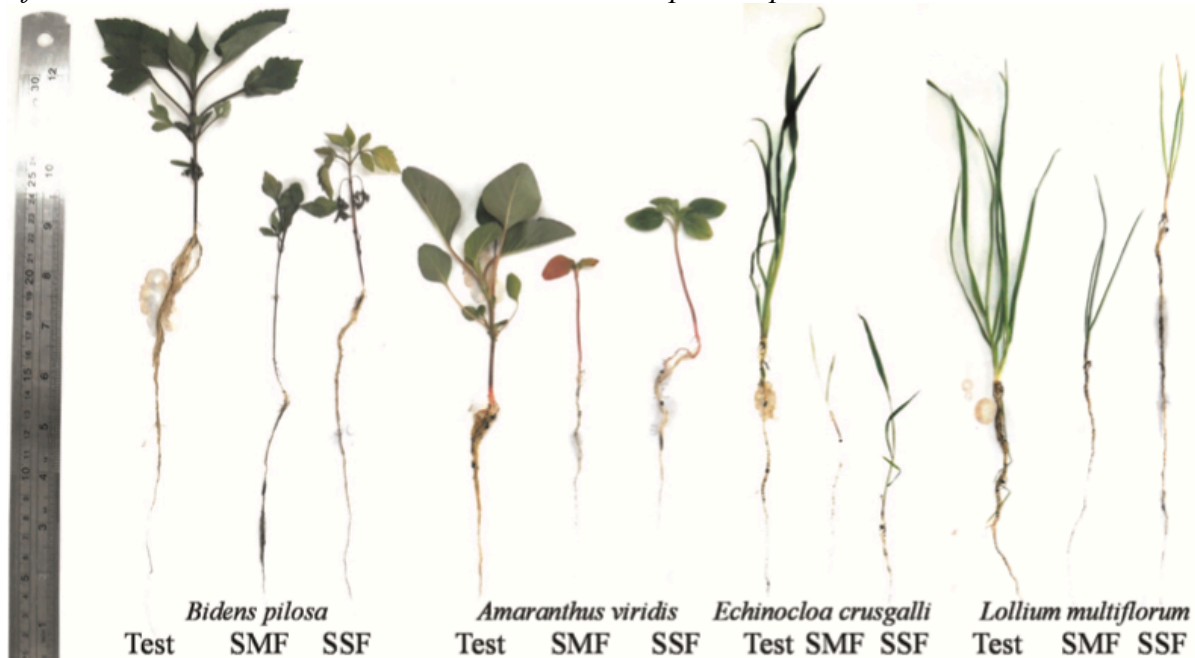
Nota. * Sesterpenoide que causa deformación celular y pérdida de la ultraestructura de las hojas, fitotoxina no específica (Geng et al., 2009; Bo et al., 2020).

** El hongo *Colletotrichum echinochloae* ha demostrado ser altamente específico hacia *Echinochloa crus-galli*, causando infecciones severas y necrosis foliar en esta maleza, pero mostrando una patogenicidad muy limitada en otros cultivos evaluados. El reaislamiento del patógeno no fue posible, lo que sugiere la activación de mecanismos de defensa localizados en el hospedante (Qiongnan et al., 2022).

A partir de los hongos identificados en la Tabla 2 con potencial bioherbicida, se presenta a continuación un ejemplo que ilustra el efecto de los metabolitos producidos por *Diaporthe schini* sobre diferentes especies de malezas, incluida *Echinochloa crus-galli*.

Figura 4

Efecto Bioherbicida de los Metabolitos Producidos por Diaporthe schini



Nota. Comparación visual de los tratamientos evaluados para el efecto bioherbicida de los metabolitos producidos por *Diaporthe schini* sobre *Bidens pilosa*, *Amaranthus viridis*, *Echinochloa crus-galli* y *Lolium multiflorum*. SMF: fermentación sumergida; SSF: fermentación en estado sólido. Fuente: Brun et al., 2020.

Asimismo, la revisión de literatura permitió identificar bacterias con potencial para el control biológico de *Echinochloa crus-galli*, consolidadas en la Tabla 3.

Tabla 3*Bacterias como Agentes de Biocontrol de Echinochloa crus-galli*

Especie	Modo de Acción/Uso	Agente Usado	Localización	Referencia
<i>Kluyvera intermedia</i>	Compuestos activos (ésteres del ácido ftálico, derivados de pirazina y derivados de quinolina)	Sobrenadantes del cultivo	India	(Sivadasan & Shaikmoideen, 2025)
<i>Pseudomonas kilonensis/brassicacearum</i>	Producción de cianuro de hidrógeno	Solución UFC	Suiza	(Zeller et al., 2007)
<i>Brucella pseudorignonensis</i> BFYBC-8*	Inhibición de crecimiento	Sobrenadantes del cultivo	China	(Yang et al., 2025)
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Inhibición de crecimiento	Suspensión de bacterias	Estados Unidos	(Li & Kremer, 2006)
<i>Enterobacter sp. I-3</i>	Inhibe la biosíntesis de giberelinas (GA ₁₂ , GA ₁₉ , GA ₂₀ , GA ₈) y regula el equilibrio hormonal aumentando el ácido abscísico (ABA); altera la síntesis de aminoácidos esenciales (Asp, Glu, Gly, Thr, Ala, Ser, Leu, Ile, Tyr)	Cultivo bacteriano	Corea del sur	(Radhakrishnan et al., 2016)
<i>Pseudomonas aeruginosa B2</i>	Inhibición de crecimiento	Fracción del extracto etil-acetato del cultivo bacteriano en caldo Mueller Hinton.	Nigeria	(Adetunji et al., 2018)
<i>Streptomyces sp. DDBH019</i>	Producción de metabolito fitotóxico (Diethyl 7-hydroxytrideca-2,5,8,11-tetraenedioate)	Suspensión de conidias / filtrado de cultivo / extracto etil-acetato del cultivo	India	(Priya Dharsini et al., 2017)

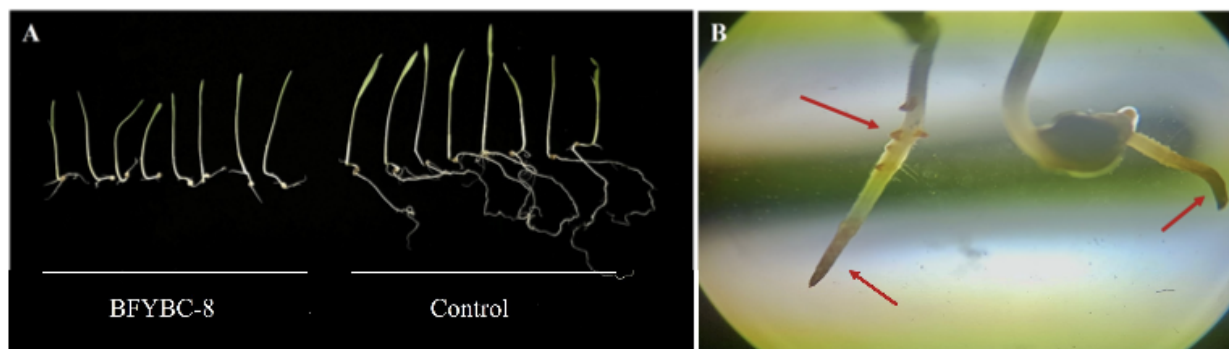
<i>Bacillus velezensis</i> (Cepa B14)	Inhibición de crecimiento	Caldo fermentativo (sobrenadante)	Brasil	(Schein et al., 2022)
------------------------------------------	------------------------------	-----------------------------------------	--------	--------------------------

Nota. * No presentó fitotoxicidad frente al cultivo del arroz asociada a las diferencias en la composición de los polisacáridos de la pared celular y en los umbrales de activación de la vía de defensa mediada por el ácido salicílico (Yang et al., 2025).

Como complemento a la información presentada en la Tabla 3, se incluye a continuación un ensayo experimental que ejemplifica el efecto patogénico de *Brucella pseudorigonensis* sobre *Echinochloa crus-galli*.

Figura 5

Ensayo de Patogenicidad de Brucella pseudorigonensis BFYBC-8 sobre *Echinochloa crus-galli*



Nota. (A) Comparación de la biomasa acumulada entre el tratamiento con sobrenadante bacteriano y el control (tratamiento con agua). (B) Micrografías electrónicas de raíces de *Echinochloa crus-galli* infectadas por la cepa BFYBC-8; el área señalada con la flecha indica la zona posiblemente afectada por la infección bacteriana. Fuente: Yang et al., 2025.

Por último, se encontraron bacterias con potencial de biocontrol frente a otras malezas con metabolismo fotosintético C₄, sintetizados en la Tabla 4.

Tabla 4

Bacterias Agentes de Biocontrol de Otras Malezas con Metabolismo Fotosintético C₄

Especie	Modo de Acción/Uso	Agente Usado	Malezas Objetivo	Localización	Referencia
<i>Bacillus sp. 6</i>	Reducción de germinación	Cultivo bacteriano	<i>Cynodon dactylon</i>	Pakistán	(Raza et al., 2021)
<i>Bacillus sp. TR25</i>	Inhibición de crecimiento	Cultivo bacteriano	<i>Amaranthus palmeri</i> S. Wats.	México	(Verdugo-Navarrete et al., 2021)
<i>Enterobacter sp. TR18</i>	Inhibición de germinación y crecimiento	Cultivo bacteriano	<i>Amaranthus palmeri</i> S. Wats.	México	(Verdugo-Navarrete et al., 2021)
<i>Pseudomonas sp. TR10</i>	Inhibición de germinación y crecimiento	Cultivo bacteriano	<i>Amaranthus palmeri</i> S. Wats.	México	(Verdugo-Navarrete et al., 2021)
<i>Pseudomonas sp. TR36</i>	Inhibición de crecimiento	Cultivo bacteriano	<i>Amaranthus palmeri</i> S. Wats.	México	(Verdugo-Navarrete et al., 2021)
<i>Serratia marcescens</i> Ha1	Inhibición de crecimiento	Suspensión celular/ formulación granular	<i>Digitaria sanguinalis</i>	China	(Juan et al., 2015)
<i>Streptomyces olivochromogenes</i> KRA17-580	Inhibición de crecimiento. Producción de cinolina-4-carboxamida y ácido cinolina-4-carboxílico	Filtrado de cultivo	<i>Digitaria ciliaris</i>	Corea del Sur	(Kim et al., 2020)
<i>Streptomyces scabies</i>	Producción de la fitotoxina thaxtomina A Inhibición de germinación y crecimiento.	Aplicación de thaxtomina A purificada	<i>Digitaria ischaemum</i>	Estados Unidos	(Wolfe et al., 2016)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> H6	Producción de HCN, quinolina y derivados	Extractos crudos de metabolitos secundarios	<i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher	India	(Lawrance et al., 2019)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> C1501	Inhibición de germinación y crecimiento.	Compuesto purificado 2-(hydroxymethyl)phenol	<i>Amaranthus hybridus</i>	Nigeria	(Adetunji et al., 2019)

	Producción de 2-(hidroximetil fenol)	obtenido del sobrenadante de cultivo bacteriano			
<i>Pseudomonas fluorescens BRG100</i>	Supresión del crecimiento radicular. Producción de metabolitos secundarios (pseudophomina A y B, lipodepsipéptidos)	Pesta granule formulation (gránulos de avena, malta y turba con células viables del microorganismo)	<i>Setaria viridis</i> , <i>Digitaria sanguinalis</i>	Canadá	(Caldwell et al., 2012)
<i>Streptomyces anulatus strain-329</i>	Inhibición del crecimiento radicular y foliar. Producción de anhydropentamycin, tetrangomycin y tetrangulol	Extracto metanólico del caldo fermentativo	<i>Digitaria sanguinalis</i>	Corea del Sur	(Bo et al., 2019)
<i>Burkholderia rinojensis</i> *	Inhibición del crecimiento. Producción de romidepsina	Caldo de cultivo de la cepa A396	<i>Amaranthus palmeri</i> L, <i>Amaranthus tuberculatus</i>	Estados Unidos	(Owens et al., 2020)

Nota. * Los resultados de las pruebas de eficacia foliar muestran un control completo (100%) para las dos especies de *Amaranthus spp.* (una maleza de hoja ancha C₄) evaluadas. En contraste, el control de *Echinochloa crus-galli* (una gramínea C₄) fue muy bajo, alcanzando solo un 10% (Owens et al., 2020).

Guía sobre Reconocimiento de Potenciales Fuentes Biológicas de Compuestos para el Control de *Echinochloa crus-galli*

El proceso de bioprospección de recursos vegetales y microbianos, en su etapa inicial, puede adaptarse a un enfoque simplificado que permita a los agricultores identificar posibles agentes bioherbicidas en su propio entorno agrícola a partir de la observación directa en campo de interacciones biológicas que sugieren actividad fitotóxica o alelopática. Esta observación debe

centrarse en las malezas que presenten síntomas visibles de enfermedad, tales como necrosis, clorosis, manchas foliares, o marchitamiento localizado (Khakimov et al., 2022). Estos síntomas son indicativos de la presencia de fitopatógenos, especialmente hongos, o de compuestos naturales (aleloquímicos) que podrían ser desarrollados como agentes de biocontrol (Ariza Mancio, 2009).

Manejo del Muestreo: Recolección y Acondicionamiento

El éxito del diagnóstico y la caracterización posterior depende directamente de la calidad del material recolectado, que debe ser lo suficientemente representativo para reflejar la población bajo estudio. La recolección debe ser dirigida, buscando específicamente los síntomas o signos del agente causal, aunque en el caso de patógenos o aleloquímicos poco visibles, puede requerirse un muestreo al azar (Vargas Gil et al., 2025). Para la prospección de agentes microbianos, el agricultor debe seleccionar cuidadosamente fragmentos de hojas, tallos o raíces con lesiones visibles e incluso semillas de la maleza, priorizando siempre el tejido que se encuentra en la zona de avance del síntoma o en la transición entre el tejido sano y el enfermo (Conforto et al., 2025).

Para tejidos vegetales en general, si se desea estudiar la morfología y características del material, se debe realizar una colección general tomando una rama con buen follaje, flores y/o frutos. Es importante recolectar al menos 3 a 5 especímenes por planta. Para malezas como *E. crus-galli* (clasificada como hierba o pasto), se recomienda coleccionar la planta entera o la parte aérea cortando cerca de la base, o incluso desarraigar la planta si no es demasiado voluminosa (Damas & Kiapranis, 2017). Es importante evitar tomar tejidos en estado de necrosis avanzada o plantas muertas, a menos que el objetivo sea aislar estructuras de sobrevivencia, ya que esto podría llevar a resultados falsos (Vargas Gil et al., 2025).

Para el acondicionamiento y transporte, es fundamental evitar la manipulación excesiva del material, las muestras deben mantenerse lo más limpias y secas posible, conservadas en bolsas de polietileno o papel (Damas & Kiapranis, 2017). Para preservar la viabilidad de los microorganismos y prevenir la degradación de los tejidos, las muestras deben etiquetarse y almacenarse rápidamente en condiciones de refrigeración, idealmente a 4° C hasta su procesamiento en el centro técnico o de investigación más cercano (De Souza et al., 2016). El transporte debe realizarse en un recipiente rígido y refrigerado, asegurando que no haya contacto directo con el hielo para evitar la congelación y la consecuente pérdida de material biológico viable (Vargas Gil et al., 2025).

Procesamiento y Extracción Preliminar

Una vez recolectadas, las muestras pueden ser procesadas para aislar microorganismos o para obtener extractos vegetales con compuestos alelopáticos. En el caso del aislamiento de microorganismos, si se cuenta con apoyo de un centro de investigación, se recomienda lavar las muestras con agua corriente y desinfectar la superficie con soluciones como alcohol al 70 % o hipoclorito de sodio (0.7 – 3 %) durante uno a cuatro minutos, seguido de un enjuague con agua destilada estéril (Conforto et al., 2025). Posteriormente, el tejido afectado se puede transferir a placas de Petri que contengan un medio de cultivo como Agar Dextrosa de Papa (PDA) e incubarse a una temperatura de 25 °C/28°C con un fotoperiodo de 12 horas, permitiendo la observación preliminar del crecimiento de colonias fúngicas o bacterianas (De Souza et al., 2016; Schein et al., 2022).

Si se desea realizar ensayos de patogenicidad, se requiere preparar un inóculo viable. Para hongos que producen esporas (como *Diaporthe* sp. o *Alternaria* spp.), se puede obtener una suspensión de conidios a partir del cultivo puro. Para este propósito, el micelio puede ser

macerado y filtrado, y la concentración de las esporas debe ajustarse y cuantificarse para asegurar resultados reproducibles en los ensayos de inoculación (Conforto et al., 2025). Tras el aislamiento primario, se puede realizar la confirmación taxonómica en un laboratorio de fitopatología mediante identificación molecular-genética, un método que ofrece alta precisión, especificidad, y fiabilidad (Khakimov et al., 2022).

De forma complementaria, el potencial bioherbicida de extractos vegetales puede explorarse triturando hojas o tallos frescos y mezclándolos con un solvente como agua o etanol al 70 % en una proporción aproximada de 1:5 (peso:volumen) (Poonpaiboonpipat et al., 2021). Este procedimiento facilita la extracción de metabolitos secundarios solubles (Poonpaiboonpipat et al., 2021). Después de un periodo de reposo, la mezcla debe filtrarse, y el extracto resultante debe conservarse en frascos oscuros y frescos para evitar la degradación fotoquímica de los compuestos activos, dada su inestabilidad frente a la luz y el calor. Este es un aspecto crítico, ya que los compuestos naturales suelen tener una vida media corta (Roberts et al., 2022).

La caracterización de metabolitos en dichos extractos vegetales, conocidos como aleloquímicos, constituye la fase de elucidación química para completar el proceso de descubrimiento en la bioprospección (Ariza Mancio, 2009). Estos compuestos de bajo peso molecular, que incluyen flavonoides, taninos, quinonas, cumarinas, saponinas, alcaloides y terpenoides, se identifican mediante la Marcha Fitoquímica (González Calderón & Ojeda Riaños, 2019). Esta prueba cualitativa puede ser llevada a cabo en un centro experimental, se basa en reacciones de color y precipitación: por ejemplo, los taninos se identifican mediante la Prueba de Gelatina-Sal (generando turbidez o precipitado) o la Prueba de Tricloruro Férrico (produciendo una coloración verde o azul). Para la cuantificación de compuestos específicos, como los carotenoides y la Vitamina C, se emplea la Espectrofotometría UV-VIS (González Calderón &

Ojeda Riaños, 2019). Finalmente, para la separación y determinación estructural de los aleloquímicos en los extractos, se suele recurrir a la Cromatografía Líquida de Alta Eficacia (HPLC) y la Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS) (Ocántorres et al., 2024).

Evaluación de la Actividad Fitotóxica

El extracto crudo o el caldo de fermentación resultante puede evaluarse mediante ensayos de fitotoxicidad en vivero o invernadero. En estos ensayos, se siembran semillas o trasplantan plántulas de la maleza evaluada (*E. crus-galli*) en pequeños contenedores o bandejas, y el extracto se aplica sobre el follaje, preferiblemente cuando alcanzan las dos a tres hojas (etapa de post-emergencia temprana), un momento en el que se ha demostrado una mayor eficacia (Poonpaiboonpipat et al., 2021; Roberts et al., 2022). Durante una o dos semanas, se deben monitorear los síntomas de marchitamiento, amarillamiento o inhibición del crecimiento (Roberts et al., 2022). Algunos tratamientos pueden causar el marchitamiento de la hoja en tan solo seis horas tras la aplicación, con la muerte de la planta ocurriendo entre cuatro y siete días después (Poonpaiboonpipat et al., 2021). Los tratamientos que presenten efectos visibles sobre las malezas, sin afectar plantas de arroz o cultivos cercanos, pueden considerarse prometedores y ser sometidos a evaluaciones adicionales en colaboración con instituciones académicas o técnicas.

Es fundamental resaltar que este ejercicio práctico de reconocimiento, muestreo y evaluación preliminar constituye solamente la Fase de Descubrimiento en el proceso integral de bioprospección de un bioherbicida (Aneja et al., 2017). Si bien esta fase proporciona información valiosa sobre la existencia de candidatos potenciales, no completa el ciclo de desarrollo de un producto biológico comercial. El proceso riguroso de bioprospección, una vez identificados los

agentes prometedores, requiere avanzar hacia la Fase de Desarrollo, que implica la optimización de las condiciones de fermentación y formulación, la determinación precisa del rango de hospedantes, y la elucidación del mecanismo de acción (Aneja et al., 2017). Finalmente, la Fase de Comercialización demanda pruebas de campo más amplias, la escalabilidad de la producción y la aprobación regulatoria, elementos que están fuera del alcance de esta guía inicial (Aneja et al., 2017; Roberts et al., 2022; Tijjani et al., 2016).

La guía propuesta busca que la bioprospección pueda integrarse al conocimiento empírico del agricultor. A través de la observación sistemática y el aprovechamiento de los recursos disponibles en su propio entorno, el productor puede identificar indicios de control biológico natural y, con la asesoría adecuada, contribuir a la validación de soluciones sostenibles de manejo de malezas. Este enfoque práctico no solo promueve la autonomía del agricultor, sino que además fortalece la conexión entre la ciencia y la agricultura tradicional, al propiciar la generación de conocimientos aplicados desde la base productiva.

Estrategia de Apropiación del Conocimiento

Como parte del compromiso con la apropiación social del conocimiento y con el propósito de trascender los límites del documento escrito, se desarrolló una sesión radial en el programa Agroparlante, de Radio UNAD Virtual, dirigido por la Maestría en Agronegocios de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). La participación correspondió a la edición número 54, un espacio destinado a la divulgación de contenidos agropecuarios de interés para agricultores, estudiantes y público general.

La sesión, con una duración aproximada de 30 minutos, se estructuró en tres bloques temáticos diseñados para comunicar de manera clara, narrativa y accesible los principales resultados de la presente monografía.

-Primer bloque (Introducción): Se presentó el concepto de bioprospección y su relevancia para el manejo sostenible de malezas, explicando sus fundamentos de manera sencilla y contextualizada.

-Segundo bloque: Se abordó el potencial de diversas especies vegetales con propiedades alelopáticas o fitotóxicas capaces de generar compuestos útiles para el control de *Echinochloa crus-galli*, destacando ejemplos y posibilidades de uso local.

-Tercer bloque: Se explicó el papel de microorganismos, en particular hongos y bacterias como agentes de biocontrol, resaltando su relevancia para la innovación en bioherbicidas sostenibles.

El objetivo fundamental de esta estrategia fue acercar la bioprospección al agricultor y al público en general, utilizando un medio de comunicación más directo, dinámico y accesible que permitiera transmitir el contenido de manera comprensible y práctica. La sesión radial se convirtió en un recurso esencial para facilitar la difusión del conocimiento, fomentar el interés por alternativas sostenibles y promover la reflexión sobre el manejo ecológico de malezas.

El contenido de la emisión puede consultarse en el siguiente enlace:

<https://ruv.unad.edu.co/ruvwp/programas/agroparlante-54-bioprospeccion-para-el-agro/?t=1.Acad%C3%A9mica>

En conjunto, esta estrategia contribuyó a ampliar el alcance del trabajo académico, transformando la revisión de literatura en un ejercicio de divulgación responsable y pertinente, orientado a generar impacto real en el territorio y entre los actores vinculados al sector agrícola.

Discusión

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), para alimentar a una población mundial estimada en 9100 millones de personas en 2050 será necesaria una expansión de la producción de alimentos de aproximadamente el 70 % respecto de los niveles de 2005 (FAO, 2009). Este desafío obliga a repensar las estrategias de producción agrícola y control de plagas dentro de un marco sostenible. Para el 2022, el mercado global de biocontrol ascendía a 1.6 mil millones de euros, con un crecimiento proyectado del 15% hacia 2050. Sin embargo, el avance de los bioherbicidas sigue siendo incipiente: representan apenas 1.3 % de todos los plaguicidas producidos a nivel mundial, mientras que el 90 % corresponde a bioinsecticidas (Kubiak et al., 2022). Lo anterior asociado a la complejidad fisiológica de las malezas, la baja coevolución con sus enemigos naturales y las dificultades regulatorias para su registro (Razaq & Shah, 2022).

La búsqueda ampliada permitió confirmar que *Echinochloa crus-galli* es una de las malezas más resistentes y adaptables del arroz, gracias a su fisiología C₄, su plasticidad ecológica y su capacidad de inducir resistencia cruzada a diferentes modos de acción herbicida (Bajwa et al., 2015; Mennan et al., 2012). Adicionalmente, los estudios de prospección biológica revisados condujeron a la identificación de una diversidad de agentes con potencial para el control de *Echinochloa crus-galli*.

Plantas como Agentes de Biocontrol

La bioprospección de plantas como agentes de biocontrol de *Echinochloa crus-galli* en el cultivo de arroz revela una línea de investigación fundamental en la alelopatía, ofreciendo una alternativa ecológica a los herbicidas sintéticos convencionales (Wato, 2020). Los principales hallazgos recopilados en la Tabla 1 se fundamentan en la amplia diversidad taxonómica y la

potente actividad de los compuestos secundarios de diversas especies. Se ha demostrado la eficacia de los extractos acuosos y metanólicos de plantas de distintas familias: los extractos de especies como *Sophora japonica* mostraron una fuerte capacidad supresora (Khanh et al., 2005); y de manera más reciente, se ha reportado una fuerte acción herbicida en el extracto crudo de *Chromolaena odorata* (Poonpaiboonpipat et al., 2021) y en extractos de Asteraceae como *Wedelia chinensis* y *Tithonia diversifolia* (Trang et al., 2024). Un avance crucial es la identificación de los mecanismos de acción de los compuestos activos, particularmente los aceites esenciales (EOs). El EO de limoncillo (*Cymbopogon citratus*) y el de caraway (*Carum carvi*) ejercen su efecto fitotóxico induciendo un profundo estrés oxidativo en la maleza, afectando la integridad de la membrana celular y la maquinaria fotosintética (Poonpaiboonpipat et al., 2013; Synowiec et al., 2019). Esta especificidad es importante, ya que se ha encontrado que el EO de *Carum carvi* puede exhibir selectividad, inhibiendo el crecimiento de *E. crus-galli* sin afectar significativamente al cultivo de maíz (Synowiec et al., 2019). Además también se destaca la estrategia de incorporar residuos de cultivos alelopáticos, como el *mulch* de paja de colza (*Brassica napus*) (Zhu et al., 2020) o la biomasa de pepino (*Cucumis sativus*) (Thi et al., 2008), como prácticas culturales dentro de un Manejo Integrado de Malezas (MIM).

A pesar de estos hallazgos promisorios, la traslación comercial y la implementación a gran escala enfrentan importantes retos que delinean las futuras líneas de investigación. El principal obstáculo es la inestabilidad y la rápida degradación de los aleloquímicos en el ambiente de campo (por luz, temperatura y microbiota), lo que se traduce en una eficacia inconsistente (Wato, 2020). Por ello, los nuevos estudios deben centrarse en la formulación, explorando el uso de tecnologías como la nanoencapsulación para mejorar la estabilidad y persistencia de los aceites esenciales (Fahad et al., 2021). Un segundo reto es la necesidad de

validar los resultados *in vitro* y en macetas en ensayos rigurosos de campo, asegurando la ecotoxicología del producto final y su inocuidad en el agroecosistema del arroz (Fahad et al., 2021). Finalmente, para la producción estandarizada y masiva, es esencial aislar, identificar y sintetizar las moléculas alelopáticas específicas con mayor concentración (Wato, 2020), lo que permitiría su desarrollo como bioherbicidas sintéticos o la bioingeniería de su producción.

La lección de los estudios internacionales es que la efectividad a largo plazo radicará en la integración de la alelopatía con prácticas culturales y, potencialmente, el uso de variedades de arroz mejoradas genéticamente con una mayor capacidad alelopática intrínseca contra *E. crus-galli*, una estrategia ya implementada en Asia (Fahad et al., 2021).

En la región de los Llanos Orientales de Colombia, el escenario más propicio para la aplicación de agentes de biocontrol debe centrarse en la bioprospección de especies nativas o naturalizadas de la Orinoquía y en el uso estratégico de residuos de cultivos. Dada la naturaleza tropical de los Llanos, la transferencia directa de productos desarrollados en otras latitudes puede presentar limitaciones en eficacia y persistencia. Especies presentes o naturalizadas en la zona que podrían explorarse incluyen *Chromolaena odorata*, *Ageratum conyzoides*, *Hyptis suaveolens* y *Cymbopogon citratus*. A nivel nacional, aunque no siempre reportadas específicamente en los Llanos Orientales, especies como *Tithonia diversifolia*, *Ocimum tenuiflorum*, *Tagetes minuta*, *Brassica napus* y *Raphanus sativus* ofrecen un valioso banco de metabolitos o modelos de estudio para el desarrollo de formulaciones adaptadas al trópico colombiano. La integración del conocimiento ecológico regional con la caracterización fitoquímica de estas especies permitirá fortalecer estrategias sostenibles de manejo de malezas y promover la innovación en bioproductos agroambientales adaptados a la Orinoquía colombiana (Suárez-Suárez et al., 2025.; GBIF, 2025).

Hongos como Agentes de Biocontrol

La bioprospección de hongos como agentes de biocontrol para el manejo de *Echinochloa crus-galli* ha revelado un prometedor catálogo de microorganismos patógenos y productores de metabolitos con alta actividad bioherbicida principalmente en Asia (Tabla 2). Los principales hallazgos giran en torno a la alta virulencia de géneros como *Exserohilum sp.*, *Bipolaris sp.*, *Curvularia sp.* y *Colletotrichum sp.*, los cuales han demostrado ser efectivos en el control de la maleza en campos de arroz. Por ejemplo, cepas como *Exserohilum monoceras* y *Curvularia lunata* B6 mostraron ser altamente patogénicas, logrando un control excelente en arrozales con capa de agua al ser aplicadas en las primeras etapas de crecimiento de la maleza (1 a 2.5 hojas), con la ventaja de ser inocuas para el arroz (*Oryza sativa*) (Huang et al., 2012; Jing et al., 2013). El hallazgo de *Bipolaris yamadae* cepa HXDC-1-2 es especialmente relevante, ya que no solo alcanzó un 97.5% de control en campos de arroz, sino que también fue efectiva en campos secos, lo que sugiere un potencial para sistemas de labranza diversa y ofrece un control seguro para el cultivo (Tan et al., 2024).

Por otro lado, la prospección también se ha centrado en los metabolitos secundarios fúngicos, como el AAC-Toxin (que contiene ácido tenuazónico, un inhibidor natural del Fotosistema II) producido por *Alternaria alternata* (Qiang et al., 2010), o los compuestos del caldo de fermentación de *Phoma dimorpha* y *Diaporthe schini*, cuya actividad fitotóxica puede ser optimizada mediante formulaciones con aceites vegetales y adyuvantes (Neto et al., 2021; Brun et al., 2020; Schein et al., 2022). Un enfoque innovador lo constituye el uso de compuestos orgánicos volátiles (COVs) de especies de *Trichoderma sp.* que han inhibido la germinación de semillas de *Echinochloa colona*, proponiendo una estrategia de biocontrol que actúa a nivel del suelo y no se basa únicamente en la espora como patógeno (Zheng et al., 2023). Adicionalmente,

se ha identificado el potencial de hongos como *Fusarium* spp. para degradar semillas de la maleza *in vitro*, lo que es una vía para el control pre-emergente (Nečajeva et al., 2023).

No obstante, la implementación de micoherbicidas enfrenta retos significativos como la dependencia de la eficacia del hongo a condiciones ambientales específicas, particularmente la necesidad de períodos prolongados de alta humedad o rocío para la germinación de las esporas y la infección del hospedero (Jing et al., 2013). Futuros trabajos deben orientarse a la investigación de formulaciones avanzadas que puedan proteger el inóculo de la desecación y la radiación UV, simulando el ambiente de rocío y mejorando la consistencia de la actividad de campo, un área donde la adición de adyuvantes ya ha mostrado mejorar la efectividad de agentes como *Exserohilum longirostratum* (Ng et al., 2011). Otro reto crítico es el escalamiento y la estabilidad de la producción de los fitotóxicos en sistemas comerciales, lo que requiere la optimización de los procesos de fermentación (sólida o sumergida) para maximizar el rendimiento y la pureza del metabolito activo (Schein et al., 2022). Finalmente, se ha reportado que cepas como *Curvularia lunata* B6 pueden ser tóxicas para otros cultivos de gramíneas como el trigo, la cebada y el maíz, por lo que es imperativo realizar estudios de amplio rango de hospedantes, especialmente en sistemas de rotación de cultivos (Jing et al., 2013).

Al contrastar estos hallazgos con la región de los Llanos Orientales de Colombia, donde el cultivo de arroz se desarrolla bajo condiciones tropicales con alta radiación y ciclos de humedad diferenciados (secano y riego), el escenario más propicio para aplicar los agentes de biocontrol fúngico sería durante la estación húmeda o en los sistemas de riego continuo con capa de agua. Estas condiciones replicarían el ambiente ideal de alta humedad que favoreció la alta eficacia de patógenos como *E. monoceras* y *C. lunata* en estudios asiáticos (Huang et al., 2012; Jing et al., 2013). Sin embargo, considerando la alta variabilidad climática y los períodos de

sequía, la prospección y desarrollo de bioherbicidas basados en fitotoxinas y metabolitos representa un escenario de aplicación más robusto y adaptable a la región, ya que la molécula activa, y no la spora viva, es el agente de control, simplificando la formulación para resistir las condiciones adversas de los trópicos (Qiang et al., 2010; Neto et al., 2021).

La revisión de las bases de datos asociadas al Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia (SiB) confirma la presencia o relevancia de muchos de estos géneros en el territorio nacional. Especies de distribución cosmopolita y asociadas a cultivos, como *Alternaria alternata* y *Aspergillus flavus*, son ubicuas. El género *Fusarium* sp. está extensamente documentado en el país como fitopatógeno de frutales y otros cultivos, incluyendo registros de especies como *Fusarium equiseti*. De manera similar, *Curvularia lunata* y otros patógenos foliares han sido reportados a través de la plataforma. En el ámbito del control biológico, el género *Trichoderma* sp. exhibe una alta diversidad y sus especies, como *Trichoderma atroviride* y *Trichoderma asperelloides*, son objeto de estudios de biodiversidad y bioprospección con información disponible en los datos de ocurrencia del sistema (SiB Colombia, 2025).

Finalmente, un nuevo estudio esencial para los Llanos Orientales consiste en una intensa bioprospección local de hongos nativos aislados de malezas locales, ya que estos estarían mejor adaptados a las condiciones edáficas (suelos ácidos) y climáticas, y tendrían una mayor virulencia contra los biotipos de *Echinochloa crus-galli* prevalentes en la región (Motlagh, 2010; Tan et al., 2024).

Bacterias como Agentes de Biocontrol

El análisis de la bioprospección bacteriana revela un campo de investigación dinámico y prometedor en la búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo de malezas como *Echinochloa crus-galli* y otras especies C₄ (Adetunji et al., 2018). Los agentes de biocontrol

bacterianos, principalmente las rizobacterias deletéreas (DRB) y las actinobacterias, ejercen su efecto herbicida a través de la producción de diversos metabolitos secundarios fitotóxicos que interrumpen procesos fisiológicos clave en las malezas.

Los hallazgos específicos dirigidos a *Echinochloa crus-galli* demuestran la existencia de cepas con alta eficacia herbicida. Por ejemplo, la cepa *Kluyvera intermedia* MA2 (aislada en India) indujo clorosis y muerte completa de la maleza en solo siete días, efecto atribuido a la producción de derivados de pirazina y quinolina, lo que indica un rápido modo de acción químico (Sivadasan & Shaikmoideen, 2025). Otra cepa prometedora, *Enterobacter sp.* I-3 (aislada en Corea), mostró un mecanismo de acción más complejo, inhibiendo la germinación y el crecimiento al interferir con la biosíntesis de giberelinas (hormonas promotoras del crecimiento) y regulando el ácido abscísico y los aminoácidos en la plántula (Radhakrishnan et al., 2016). Adicionalmente, se ha confirmado la actividad del endófito *Bacillus pseudorignoneensis* BFYBC-8 contra esta maleza, reforzando el potencial de la microflora interna de la propia planta (Yang et al., 2025). Se ha encontrado que el extracto de *Streptomyces sp.* DDBH019 exhibió actividad contra *E. crus-galli*, la espinosa *Amaranthus spinosus* (hoja ancha C₄) y *Cyperus rotundus*, logrando aislar un compuesto activo identificado como dietil 7-hidroxitrideca-2, 5, 8, 11-tetraenedioato (Priya Dharsini et al., 2017).

Al expandir el espectro a otras malezas C₄ problemáticas (Tabla 4), la investigación revela la versatilidad de los agentes bacterianos. Las actinobacterias del género *Streptomyces sp.*, conocidas por su capacidad biosintética, han sido centrales en esta bioprospección. En un ámbito más amplio, se ha evaluado la toxina Thaxtomin A (producida por *Streptomyces scabies*), que mostró ser un eficaz bioherbicida de pre-emergencia contra gramíneas anuales como *Digitaria*

ischaemum y *Poa annua* (Wolfe et al., 2016), lo que sugiere su relevancia para el manejo de gramíneas en el cultivo de arroz.

Por su parte, las cepas de *Pseudomonas sp.* también han aportado compuestos de interés: *Pseudomonas aeruginosa* H6 produjo derivados de quinolina con actividad en la cizaña (*Pennisetum purpureum*) (Lawrance et al., 2019), y *Pseudomonas aeruginosa* C1501 (Nigeria) el compuesto 2-(hidroximetil)fenol, que resultó ser bioherbicida contra *Amaranthus hybridus* (Adetunji et al., 2019). Sin embargo, la selectividad sigue siendo un reto fundamental, como lo demuestra el hallazgo de que *Burkholderia rinojensis* A396 (que produce el proherbicida romidepsin) fue más eficaz contra malezas de hoja ancha que contra gramíneas (Owens et al., 2020), y que el uso combinado de rizobacterias y extractos alelopáticos de sorgo redujo eficazmente la densidad de malezas C₄ como *Cynodon dactylon* en cultivos de trigo, lo que sugiere una aplicación integrada (Raza et al., 2021). De igual modo, cepas de *Serratia marcescens* Ha1 mostraron alta actividad contra *Digitaria sanguinalis* (Juan et al., 2015).

Cabe resaltar que, dentro del conjunto de bacterias bioherbidas consultadas por su potencial contra malezas de tipo C₄, solo el aislado *Streptomyces sp.* KRA17-580 ha sido experimentalmente validado por un mecanismo de acción directo de inhibición de la fotosíntesis. Los metabolitos activos aislados, cinolina-4-carboxamida y ácido cinolina-4-carboxílico (580-H2), demostraron ser potentes inhibidores fotosintéticos en discos de hoja de *Digitaria ciliaris*, causando una pérdida de clorofila de hasta el 81% y una destrucción gradual de la membrana celular (Kim et al., 2020). Esta evidencia subraya que hacen falta estudios detallados para determinar si las demás cepas consultadas, que también se dirigen a malezas C₄ pero cuyos mecanismos de acción son menos definidos (a menudo basados en toxinas de crecimiento

general o lisis celular), pueden expresar potencial actividad biológica contra el principal organismo objetivo, *Echinochloa crus-galli*.

De manera general, el desarrollo de bioherbicidas bacterianos se enfrenta a importantes retos de desarrollo y aplicación. En primer lugar, la estabilidad del inóculo es un factor limitante, ya que la supervivencia y la capacidad de colonización de las cepas bacterianas vivas en el suelo y bajo condiciones ambientales fluctuantes pueden ser bajas, especialmente en ambientes inundados como los cultivos de arroz (Li & Kremer, 2006; Schein et al., 2022). Esto ha impulsado el desarrollo de formulaciones avanzadas, como los gránulos 'pesta' basados en almidón, que han demostrado mejorar la persistencia de cepas como *Serratia marcescens* Hal (Juan et al., 2015). En segundo lugar, se requiere una caracterización profunda de la selectividad, ya que el mecanismo de acción de las rizobacterias deletéreas (DRB), que a menudo implica la producción de cianuro o metabolitos alelopáticos, debe ser específico para la maleza y no causar fitotoxicidad al cultivo de arroz (Zeller et al., 2007). Finalmente, el escalamiento y la producción económica de los metabolitos puros (como el romidepsin o el thaxtomin A) o de la biomasa bacteriana viable, son cruciales para la comercialización (Owens et al., 2020; Schein et al., 2022).

En el contexto específico de los Llanos Orientales de Colombia, una región caracterizada por altas temperaturas, variabilidad hídrica y predominancia de suelos ácidos (oxisoles); el escenario más propicio es un programa riguroso de bioprospección local. La investigación debería enfocarse inicialmente en el aislamiento de rizobacterias y actinobacterias de la rizosfera de *E. crus-galli* u otras malezas C₄ locales para asegurar la adaptación y la eficacia, seguido de la identificación de sus metabolitos fitotóxicos y su formulación como bioherbicidas químicos naturales (Adetunji et al., 2019; Schein et al., 2022).

Tal como lo evidencia el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia (SiB) y sus colecciones biológicas vinculadas (Agrosavia, CMPUJ, EAFIT, etc.). El género *Pseudomonas* sp. se encuentra ampliamente representado con la especie *Pseudomonas fluorescens* identificada en colecciones como un microorganismo clave con actividad promotora de crecimiento y biocontrol. De manera similar, *Bacillus velezensis* ha sido formalmente catalogada como especie representativa en bases de datos de bacterias aisladas de cultivos como banano y plátano. Además, la presencia de la bacteria *Serratia marcescens* está confirmada en el Catálogo de Biodiversidad del SiB. Finalmente, el género *Streptomyces* sp., y el género *Enterobacter* sp., son parte de la diversidad microbiana estudiada y documentada en los ecosistemas edáficos del país (SiB Colombia, 2025).

Principales Retos de Aplicación

La literatura consultada sugiere que el enfoque alelopático, que implica el uso de compuestos bioquímicos naturales para influir en el crecimiento de las malezas (Kostina-Bednarz et al., 2023), es una estrategia prometedora para la zona de los Llanos Orientales. Específicamente, Delgado et al. (2009) demostraron que el uso de barbechos mejorados con leguminosas como *Mucuna deeringianum* y *Crotalaria ochroleuca* proporcionó efectos alelopáticos que resultaron en un control de malezas entre el 41% y el 62% y entre el 27% y el 46%, respectivamente, permitiendo una reducción del 70% en las dosis de herbicidas químicos. Este hallazgo regional establece una base sólida para la bioprospección local. Sin embargo, a pesar de los avances en la identificación de agentes biológicos con potencial herbicida, el desarrollo y la adopción de bioherbicidas comerciales siguen siendo limitados a nivel mundial, considerando que la mayoría de los productos basados en organismos vegetales o microbianos se

encuentran aún en fase experimental o de validación a pequeña escala (Cordeau et al., 2016; Galli et al., 2024).

Uno de los principales retos es la consistencia y estabilidad de la eficacia en condiciones de campo variables, las cuales son inherentes al clima de los Llanos Orientales, donde factores como la temperatura y la humedad pueden afectar la viabilidad y la actividad de los agentes microbianos (Islam et al., 2024; Roberts et al., 2022). A nivel técnico y comercial, la producción masiva y la formulación de bioherbicidas son de gran atención, ya que se requiere de procesos de fermentación eficientes y formulaciones estables que garanticen una larga vida útil y una aplicación efectiva con equipos convencionales (Roberts et al., 2022; Schein et al., 2022). Adicionalmente, se debe considerar la especificidad de acción, ya que la alta diversidad de malezas en la región exige soluciones adaptadas que eviten el riesgo de tener un mercado limitado. Otro reto fundamental es la necesidad de un mayor conocimiento sobre los posibles efectos duales y riesgos ambientales de algunos agentes biológicos, como la potencial producción de metabolitos fitotóxicos no deseados, desequilibrios hormonales en el cultivo o la alteración de la diversidad microbiana nativa del suelo, lo cual debe ser evaluado mediante un enfoque de riesgo riguroso para garantizar una implementación realmente sostenible (Etesami, 2025). Finalmente, los procesos regulatorios a menudo son lentos y costosos, lo que frena la comercialización de nuevos productos biológicos para el manejo de arvenses (Islam et al., 2024).

Por otro lado, aunque se cuenta con una de las mayores biodiversidades del planeta, existe una débil articulación entre la investigación académica, el sector productivo y los mecanismos regulatorios. Adicionalmente, la inversión en biotecnología agrícola es limitada, lo que reduce la capacidad de escalar prototipos experimentales hacia productos validados (Cotes et al., 2012; Torres, 2021). Esta situación se agrava por la falta de reconocimiento del conocimiento

tradicional campesino y por la ausencia de incentivos que promuevan la adopción de prácticas de manejo biológico de malezas.

Desde una perspectiva ética, la bioprospección debe enmarcarse en los principios de justicia, equidad y reconocimiento de los saberes locales. El uso de recursos genéticos y del conocimiento tradicional asociado implica garantizar el consentimiento previo, libre e informado de las comunidades, así como su participación en los beneficios derivados (Díaz Morales, 2019). Ignorar estos principios puede comprometer la legitimidad científica del proceso, generar conflictos socioambientales e incluso dar lugar a acusaciones de biopiratería. Sin embargo, además de las consideraciones éticas, la bioprospección realizada por un agricultor dentro de su propia finca se encuentra sujeta a un marco normativo específico en Colombia. La legislación establece que los recursos genéticos son propiedad de la Nación, y cualquier actividad que implique su estudio, aislamiento o aprovechamiento puede constituir “acceso a recursos genéticos”, regulado por la Resolución 1348 de 2014 (MADS, 2014). Esto implica que, aun cuando el agricultor trabaje únicamente para mejorar el manejo de *Echinochloa crus-galli* en su cultivo de arroz, debe evaluarse si acciones como el aislamiento de microorganismos del suelo o la obtención de metabolitos de plantas silvestres configuran acceso al recurso genético o solo requerirían el permiso de recolección.

Adicionalmente, el Decreto 1376 de 2013 establece que la recolección de material biológico de flora, fauna, hongos o microorganismos silvestres con fines de investigación científica requiere un permiso específico (MADS, 2013). En contraste, el uso de especies cultivadas (domésticas no nativas) o introducidas legalmente en el predio suele tener menos restricciones, aunque la responsabilidad ambiental se mantiene, especialmente cuando los organismos aislados serán multiplicados o reintroducidos al campo.

El ingreso de material vegetal o microorganismos desde el exterior es otro elemento normativo relevante. Según la Resolución ICA 00002384 de 2019, cualquier importación de productos de riesgo fitosanitario requiere permiso de importación y certificaciones sanitarias del país de origen (ICA, 2019), debido al riesgo de introducir plagas, patógenos o especies invasoras que puedan afectar a los cultivos o a la biodiversidad local.

Además, el Decreto 1076 de 2015 refuerza que las actividades de investigación, aislamiento o manipulación de especies silvestres requieren autorización previa si pueden afectar la biodiversidad (República de Colombia, 2015). Antes de iniciar la bioprospección, especialmente cuando involucre organismos nativos o silvestres, es recomendable solicitar orientación a la autoridad ambiental regional para garantizar el cumplimiento de las obligaciones legales.

Estas regulaciones se alinean con los riesgos ecológicos que puede generar la bioprospección, incluso a pequeña escala. Por ejemplo, la reintroducción de microorganismos aislados sin una evaluación de riesgo puede alterar la composición de las comunidades nativas del suelo, afectando su resistencia, resiliencia y funcionamiento ecológico (Trabelsi & Mansour, 2013). Asimismo, la colecta incontrolada de especies silvestres podría tener impactos negativos sobre poblaciones locales, especialmente si se introducen organismos nuevos o se manipulan poblaciones naturales sin un control adecuado.

Otra limitación significativa del campo de los bioherbicidas se da en términos de la eficiencia biológica, ésta no siempre se traduce en viabilidad económica o ambiental, ya que el proceso de producción, síntesis y formulación debe cumplir con rigurosos perfiles toxicológicos y evaluaciones de riesgo ecológico exigidos por las normativas internacionales (Choudri et al., 2020). Otro aspecto crítico es que la mayoría de las investigaciones se han enfocado en describir

los efectos visibles sobre las plantas objetivo, sin profundizar en los mecanismos moleculares y fisiológicos de acción, lo que limita la posibilidad de optimizar su selectividad y eficacia.

Es importante notar que a pesar del creciente número de investigaciones a nivel internacional sobre el potencial alelopático y bioherbicida de diversas especies vegetales, hongos y bacterias; la literatura local y a nivel suramericano sobre agentes biológicos de control para *Echinochloa crus-galli* es escasa o incipiente. Esta falta de producción científica restringe el aprovechamiento del potencial biotecnológico de la biodiversidad local.

Hasan et al. (2021) destacan que es importante explorar especies nativas como fuente de compuestos bioactivos, ya que su adaptación a las condiciones locales puede favorecer su efectividad en campo, por lo que fomentar el reconocimiento, la caracterización y la transformación de los recursos biológicos regionales favorecería la generación de bioinsumos sostenibles, y al mismo tiempo fortalecería la conexión entre la ciencia aplicada y las necesidades del agricultor, promoviendo un modelo de innovación endógeno y ambientalmente responsable.

Por último, la selectividad constituye un desafío central en el desarrollo de bioherbicidas. Mientras algunos metabolitos fúngicos o bacterianos son altamente específicos, otros presentan efectos no diferenciados entre especies hospedantes y no hospedantes, lo que puede generar fitotoxicidad sobre cultivos de interés (Duke & Dayan, 2011; Cimmino et al., 2015).

En síntesis, los hallazgos de esta revisión demuestran que la bioprospección ofrece un camino prometedor hacia un manejo más sostenible de *Echinochloa crus-galli*, al permitir el descubrimiento de metabolitos naturales con múltiples modos de acción y bajo riesgo de resistencia. Sin embargo, su desarrollo efectivo en Colombia requiere superar limitaciones técnicas, legales y éticas mediante políticas de apoyo a la innovación, fortalecimiento de

capacidades en biotecnología y una articulación constante entre los actores ciencia, comunidad y agroindustria.

Conclusiones y Futuras Recomendaciones

La bioprospección constituye una herramienta estratégica para avanzar hacia un manejo sostenible de las malezas en los cultivos de arroz, al aprovechar los recursos biológicos disponibles en el ecosistema. El análisis de la literatura evidenció que tanto las especies vegetales como los microorganismos poseen un amplio potencial para generar compuestos con actividad alelopática o fitotóxica frente a *Echinochloa crus-galli*.

La literatura revisada también resalta que el desarrollo de bioherbicidas y agentes de biocontrol específicos para malezas aún se encuentra en una fase incipiente a nivel mundial. La limitada inversión en investigación aplicada, los procesos regulatorios extensos y la baja transferencia tecnológica hacia el agricultor han restringido su adopción masiva. No obstante, la amplia biodiversidad que posee Colombia ofrece una ventaja comparativa notable para liderar procesos de bioprospección orientados al diseño de bioinsumos agrícolas. El país dispone de un inventario significativo de plantas, hongos y bacterias que producen metabolitos secundarios con propiedades alelopáticas, lo que abre la posibilidad de fortalecer cadenas de innovación basadas en recursos locales.

En este contexto, la guía simplificada propuesta en esta monografía constituye un primer paso para acercar la bioprospección al agricultor, integrando la observación empírica con criterios científicos. Al brindarle herramientas claras para identificar, experimentar y validar de manera participativa posibles agentes bioherbicidas a partir de malezas o plantas con potencial alelopático, se fortalece su capacidad para aplicar estas soluciones a problemas locales y específicos de su finca. Con ello, se promueve una agricultura más autónoma, resiliente y ambientalmente responsable, donde el conocimiento técnico y el saber tradicional se complementan en beneficio del productor y del territorio.

De manera general, la bioprospección orientada al manejo de malezas puede contribuir a reducir la dependencia de herbicidas sintéticos, disminuir la presión de selección que genera resistencia en las gramíneas arvenses y mitigar los impactos ecológicos derivados de la contaminación del suelo y el agua. Además, al promover la generación de bioinsumos locales, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 2 “Hambre cero” y ODS 15 “Vida de ecosistemas terrestres”, que promueven sistemas agrícolas sostenibles y resilientes.

Para avanzar en esta línea, se recomienda fortalecer la cooperación entre agricultores, universidades e instituciones de investigación, orientando los esfuerzos hacia la validación de extractos vegetales y microorganismos nativos con actividad bioherbicida. Asimismo, es necesario fomentar políticas de apoyo y programas de extensión rural que faciliten la capacitación en técnicas básicas de bioprospección, la formulación segura de bioinsumos y su registro normativo. La consolidación de redes de bioprospectores comunitarios podría permitir el intercambio de conocimiento tradicional y científico, acelerando la innovación local y la diversificación de alternativas sostenibles para el control de malezas en la cadena productiva del arroz.

Finalmente, esta monografía constituye un punto de partida y no un punto de llegada, su mayor aporte es sentar las bases conceptuales y metodológicas que permitan desarrollar, en futuras investigaciones prácticas y experimentales, soluciones bioherbicidas adaptadas al territorio, validadas en campo y alineadas con las necesidades reales del productor.

Referencias Bibliográficas

- Adetunji, C. O., Oloke, J. K., Bello, O. M., Pradeep, M., & Jolly, R. S. (2019). Isolation, structural elucidation and bioherbicidal activity of an eco-friendly bioactive 2-(hydroxymethyl) phenol, from *Pseudomonas aeruginosa* (C1501) and its ecotoxicological evaluation on soil. *Environmental Technology & Innovation*, 13, 304-317.
- Adetunji, C. O., Oloke, J. K., Prasad, G., Bello, O. M., Osemwegie, O. O., Pradeep, M., & Jolly, R. S. (2018). Isolation, identification, characterization, and screening of rhizospheric bacteria for herbicidal activity. *Organic Agriculture*, 8(3), 195-205.
- Adou, A. I., Bibian, G., Bordelais, O., Farouil, L., Sylvestre, M., Gaspard, S., ... & Cebrián-Torrejón, G. (2022). Biomimetic and Hemisynthetic Pesticides. In *Pesticides-Updates on Toxicity, Efficacy and Risk Assessment*. IntechOpen.
- Afzal, M. R., Naz, M., Ullah, R., & Du, D. (2023). Persistence of Root Exudates of *Sorghum bicolor* and *Solidago canadensis*: Impacts on Invasive and Native Species. *Plants*, 13(1), 58.
- Aneja, K. R., Khan, S. A., & Aneja, A. (2017). Bioherbicides: strategies, challenges and prospects. *Developments in fungal biology and applied mycology*, 449-470.
- Arachi, J. M. A. P. (2023). Bioprospecting and aquaculture. En V. K. Manam & D. Sumathi (Eds.), *Bioprospecting and its future* (pp. 1–10). ISBN 978-93-94766-42-6.
- Ariza Mancio, Sandra. (2009). "Estrategias de bioprospección". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/418592>

- Azorín, M. & Crespo, M. (2021). 96. *Echinochloa P. Beauv. Flora Iberica: Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares* (Vol. XIX , Parte II: Gramineae (partim) , pp. 1147–1160). Real Jardín Botánico, CSIC.
- Bandara, K. M. N. T. K., & Kavindi, G. A. G. (2023). Insights of Circular economics practices in rice cultivation and processing-a review. *Journal of Agriculture and Value Addition*, 6(2).
- Bajwa, A. A., Jabran, K., Shahid, M., Ali, H. H., & Chauhan, B. S. (2015). Eco-biology and management of *Echinochloa crus-galli*. *Crop Protection*, 75, 151-162.
- Becerra, I., Castro, L., Cortes, C., Del Valle, C., Díaz, A., Flórez, A., ... & Viveros, J. (2020). Plan de ordenamiento productivo del arroz en Colombia 2020-2038. *Unidad de Planificación Rural (UPRA)*. <https://upra.gov.co/es-co/planificacion-del-ordenamiento-agropecuario/poa-nacional/pop/pop-arroz>.
- Becerra-Alvarez, A., Zhang, Z., & Al-Khatib, K. (2025). Physiological action of bioherbicides in weed control: a systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 7, 1633565.
- Bo, A. B., Kim, J. D., Kim, Y. S., Sin, H. T., Kim, H. J., Khaitov, B., ... & Choi, J. S. (2019). Isolation, identification and characterization of *Streptomyces* metabolites as a potential bioherbicide. *PLoS One*, 14(9), e0222933.
- Bo, A. B., Khaitov, B., Umurzokov, M., Cho, K. M., Park, K. W., & Choi, J. S. (2020). Biological control using plant pathogens in weed management. *Weed Turfgrass Sci*, 9, 11-19.
- Brun, T., Rabuske, J. E., Confortin, T. C., Luft, L., Todero, I., Fischer, M., ... & Mazutti, M. A. (2020). Weed control by metabolites produced from *Diaporthe schini*. *Environmental Technology*, 43(1), 139-148.

- Chaves-Bedoya, G., Ortíz-Moreno, M. L., & Ortiz-Rojas, L. Y. (2013). Efecto de la aplicación de agroquímicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Acta agrónomica*, 62(1), 66-72.
- Cimmino, A., Masi, M., Evidente, M., Superchi, S., & Evidente, A. (2015). Fungal phytotoxins with potential herbicidal activity: chemical and biological characterization. *Natural product reports*, 32(12), 1629-1653.
- Conforto, E. C., Trucco, V., Lima, N. B., Tolocka, P. A., Meneguzzi, N., Haelterman, R., Monguillot, J., Bustamante, M., & Giayetto, A. (2025). Aislamiento y preservación de microorganismos fitopatógenos. In L. Di Feo, A. Giayetto, & P. E. Rodríguez Pardina (Comps.), *Técnicas de detección de fitopatógenos* (1a ed. adaptada., pp. 41–69). Patricia Elsa Rodríguez Pardina.
- Cordeau S, Triolet M, Wayman S, Steinberg C, Guillemain J-P (2016) Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. *Crop Prot* 87:44–49.
- Cotes, A., Barrero, L., Rodríguez, F., Zuluaga, M., & Arévalo, H. (2012). Bioprospección para el desarrollo del sector agropecuario de Colombia.
<http://hdl.handle.net/20.500.12324/12491>
- Damas, K., & Kiapranis, R. (2017). *Laboratory manual for collecting and processing of plant samples*. Papua New Guinea Forest Research Institute.
- DANE. (2024a). Boletín técnico: Quinto Censo Nacional Arrocerero (5.º CNA). Primera entrega.
<https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CNA/bol-5toCNA-2023.pdf>
- DANE. (2024b). Boletín técnico: Quinto Censo Nacional Arrocerero (5.º CNA). Segunda entrega.
<https://www.dane.gov.co/files/operaciones/CNA/bol-5toCNA-2daEntrega-2023.pdf>

- DANE. (2025). Boletín técnico: Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM), primer semestre 2025. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/ENAM/bol-ENAM-Isem2025.pdf>
- Dayan, F. E., Cantrell, C. L., & Duke, S. O. (2009). Natural products in crop protection. *Bioorganic & medicinal chemistry*, 17(12), 4022-4034.
- De Souza, A. R. C., Baldoni, D. B., Lima, J., Porto, V., Marcuz, C., Machado, C., ... & Mazutti, M. A. (2017). Selection, isolation, and identification of fungi for bioherbicide production. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48(1), 101-108.
- Delgado, H., Navas, G. E., Salamanca, C. R., & Chacón, A. (2009). Barbechos mejorados con leguminosas: una promisoriosa alternativa agroecológica para el manejo alelopático de malezas y mejoramiento del cultivo de arroz y maíz en los Llanos de Colombia. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 227-235.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (s. f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://sinergia.dnp.gov.co/ods>
- Díaz Morales, A. (2019). Política y legislación sobre la bioprospección en Colombia. *Departamento de Derecho*.
- Díaz-Mota, M. D. L. Á., García-Mateos, M. R., Martínez-Solís, J., Acosta-Ramos, M., Serrato-Cruz, M. Á., Colinas-León, M. T., & Magdaleno-Villar, J. (2017). Fitotoxicidad de los extractos de *Dieffenbachia amoena*, *Nerium oleander*, *Raphanus sativus* y *Brassica napobrassica*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 49(2), 303-318.
- Duke, S. O., & Dayan, F. E. (2011). Modes of action of microbially-produced phytotoxins. *Toxins*, 3(8), 1038-1064.

- Economic Research Service U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (2025). Rice Sector at a Glance. <https://www.ers.usda.gov/topics/crops/rice/rice-sector-at-a-glance>
- El-Amier, Y. A., & Abdullah, T. J. (2014). Allelopathic effect of four wild species on germination and seedling growth of *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv. *International Journal of Advanced Research*, 2(2), 287–294.
- El-Amier, Y. A., Abbas, M. A., & Dawood, S. H. (2015). Phytotoxic effect of plant extracts from *Asteraceae* on germination and growth of *Echinochloa crus-galli*. *International Journal of Development Research*, 5(7), 4926-4931.
- Erida, G., Ichsan, C. N., Kurniawan, T., Khan, I. H., & Javaid, A. (2023). Potential of secondary metabolites of *Ageratum conyzoides* L. in weed management: A review. *Allelopathy Journal*, 58(1).
- Etesami, H. (2025). The dual nature of plant growth-promoting bacteria: Benefits, risks, and pathways to sustainable deployment. *Current Research in Microbial Sciences*, 100421.
- Fahad, S., Saud, S., Akhter, A., Bajwa, A. A., Hassan, S., Battaglia, M., ... & Irshad, I. (2021). Bio-based integrated pest management in rice: An agro-ecosystems friendly approach for agricultural sustainability. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(2), 94-102.
- FAO (2009). How to Feed the World in 2050. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025, June 11). FAOSTAT: Cultivos y productos de ganadería – producción. FAO. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>

Federación Nacional de Arroceros (FEDEARROZ). (s. f.). Costos corrientes.

<https://fedearroz.com.co/es/fondo-nacional-del-arroz/investigaciones-economicas/estadisticas-arroceras/costos/>

Galli, M., Feldmann, F., Vogler, U. K., & Kogel, K. H. (2024). Can biocontrol be the game-changer in integrated pest management? A review of definitions, methods and strategies. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131(2), 265-291.

GBIF. (2025). *Scientific Collections – Colombia* [Base de datos]. *Global Biodiversity Information Facility*. <https://scientific-collections.gbif.org/collection/search?country=CO>

Geng, R., Zhang, J., & Yu, L. (2009). *Helminthosporium gramineum* Rabehn f. sp. *echinochloae conidia for biological control of barnyardgrass*. *Weed Science*, 57(6), 554–561

González Calderón, R., & Ojeda Riaños, C. K. (2019). Estudio fitoquímico de lulo (*Solanum Quitoense*), bioprospección en la búsqueda del desarrollo de nuevos productos de síntesis.

Gu, Q., Chu, S., Huang, Q., Chen, A., Li, L., & Li, R. (2023). *Colletotrichum echinochloae*: a potential bioherbicide agent for control of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.). *Plants*, 12(3), 421.

Hailmi, M. S., Kadir, J., Mohd Nazri, B., Norhayati, N., Noor Afiza, B., & Salmah, M. (2011). Potential of *Exserohilum monoceras* as a Bioherbicide for Controlling *Echinochloa crus-galli* (Rumput Sambau). *Journal of agrobiotechnology*, 2, 1-15.

Hamim, H., Banon, S., & Dorly, D. (2016). Comparison of physiological and anatomical changes of C₃ (*Oryza sativa* [L.]) and C₄ (*Echinochloa crusgalli* [L.]) leaves in response to drought stress. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 31, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.

- Hasan, M., Ahmad-Hamdani, M. S., Rosli, A. M., & Hamdan, H. (2021). Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants*, *10*(6), 1212.
- Heap, I. (2014). Global perspective of herbicide-resistant weeds. *Pest management science*, *70*(9), 1306-1315.
- Heap, I. (2025). International survey of herbicide resistant weeds.
<https://www.weedscience.org/Pages/filter.aspx>
- Hoesain, M., Masnilah, R., Nurchayanti, S. D., Pradana, A. P., Alfarisy, F. K., Sari, D. T., ... & Tarigan, S. I. (2024). The Potential of Deleterious rhizobacteria to Control Primary Weed *Echinochloa sp.* on Rice. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, *16*(2).
- Hoste, I., & Verloove, F. (2022). Taxonomy of the weed species of the genus *Echinochloa* (Poaceae, Paniceae) in Southwestern Europe: Exploring the confused current state of affairs. *PhytoKeys*, *197*, 1.
- Huang, S., Watson, A., Duan, G., & Yu, L. (2012). Preliminary evaluation of potential pathogenic fungi as bioherbicides of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in China. *International Rice Research Notes*, *26*(1), 1–4
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2019). *Resolución No. 00002384 (08 de marzo de 2019). Por medio de la cual se establecen las directrices para el establecimiento de requisitos sanitarios y fitosanitarios para la importación de animales, sus productos, vegetales frescos y otros productos de origen vegetal.*
- Islam, A. K. M., & Kato-Noguchi, H. (2013). Allelopathic potential of five Labiatae plant species on barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*). *Australian Journal of Crop Science*, *7*(9), 1369-1374.

- Islam, A. 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).
- Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual review of entomology*, *51*(1), 45-66.
- Jing, L., Tao, W., Sun, A. R., & Ni, H. W. (2013). Evaluation of *Curvularia lunata* strain B6 as a potential mycoherbicide to control barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Journal of Integrative Agriculture*, *12*(7), 1201–1207.
- Juan, Y. A. N. G., Wei, W. A. N. G., Peng, Y. A. N. G., Bu, T. A. O., Zheng, Y. A. N. G., & Jingao, D. O. N. G. (2015). Isolation and identification of *Serratia marcescens* Ha1 and herbicidal activity of Ha1 'pesta' granular formulation. *Journal of Integrative Agriculture*, *14*(7), 1348-1355.
- Kato-Noguchi, H., & Kurniadie, D. (2022). Allelopathy and allelochemicals of *Leucaena leucocephala* as an invasive plant species. *Plants*, *11*(13), 1672.
- Khakimov, A., Salakhutdinov, I., Omolikov, A., & Utaganov, S. (2022). Traditional and current-prospective methods of agricultural plant diseases detection: A review. In *IOP Conference series: earth and environmental science* (Vol. 951, No. 1, p. 012002). IOP Publishing.
- Khanh, T. D., Hong, N. H., Xuan, T. D., & Chung, I. M. (2005). Paddy weed control by medicinal and leguminous plants from Southeast Asia. *Crop Protection*, *24*(5), 421-431.
- Khanh, T. D., Xuan, T. D., & Chung, I. M. (2007). Rice allelopathy and the possibility for weed management. *Annals of applied biology*, *151*(3), 325-339.

- Kim, H. J., Bo, A. B., Kim, J. D., Kim, Y. S., Khaitov, B., Ko, Y. K., ... & Choi, J. S. (2020). Herbicidal characteristics and structural identification of the potential active compounds from *Streptomyces sp. KRA17-580*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(52), 15373-15380.
- Kostina-Bednarz, M., Płonka, J., & Barchanska, H. (2023). Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 471-504.
- Lagler, J. C. (2017). Bioinsumos: distintas percepciones haciendo foco en la fertilización biológica. *Agronomía & Ambiente*, 37(1).
- Lawrance, S., Varghese, S., Varghese, E. M., & Asok, A. K. (2019). Quinoline derivatives producing *Pseudomonas aeruginosa H6* as an efficient bioherbicide for weed management. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18, 101096.
- Li, J., & Kremer, R. J. (2006). Growth response of weed and crop seedlings to deleterious rhizobacteria. *Biological Control*, 39(1), 58-65.
- Marchesi, C., & Saldain, N. E. (2019). First report of herbicide-resistant *Echinochloa crus-galli* in Uruguayan rice fields. *Agronomy*, 9(12), 790.
- Mennan, H., Ngouajio, M., Sahin, M., Isik, D., & Altop, E. K. (2012). Competitiveness of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars against *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. in water-seeded production systems. *Crop Protection*, 41, 1-9.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *Decreto 1376 de 2013. Por el cual se reglamenta el permiso de recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con fines de investigación científica no comercial.*

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1348 de 2014. Por la cual se regula el acceso a los recursos genéticos y sus productos derivados*
- Mohammed, Y. M., & Badawy, M. E. (2020). Potential of phytopathogenic fungal isolates as a biocontrol agent against some weeds. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30(1), 92.
- Mohd Ghazi, R., Nik Yusoff, N. R., Abdul Halim, N. S., Wahab, I. R. A., Ab Latif, N., Hasmoni, S. H., ... & Zakaria, Z. A. (2023). Health effects of herbicides and its current removal strategies. *Bioengineered*, 14(1), 2259526.
- Motlagh, M. R. S. (2010). Isolation and Characterization of Some Important Fungi from *Echinochloa Spp.* the Potential Agents to Control Rice Weeds. *Australian Journal of Crop Science*, 4(6), 457-460.
- Nečajeva, J., Boroduške, A., Nikolajeva, V., Seņkovs, M., Kalniņa, I., Roga, A., ... & Fridmanis, D. (2023). Epiphytic and endophytic fungi colonizing seeds of two *Poaceae* weed species and *Fusarium spp.* seed degradation potential in vitro. *Microorganisms*, 11(1), 184.
- Neto, J. R. C., dos Santos, M. S. N., Mazutti, M. A., Zabet, G. L., & Tres, M. V. (2021). *Phoma dimorpha* phytotoxic activity potentialization for bioherbicide production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 33, 101986.
- Ng, S., Kadir, J., Hailmi, M., & Rahim, A. (2011). Efficacy of *Exserohilum longirostratum* on barnyard grass (*Echinochloa crus-galli spp. crus-galli*) under field conditions. *Biocontrol Science and Technology*, 21(4), 449–460
- Ni, X., Bai, H., Han, J., Zhou, Y., Bai, Z., Luo, S., ... & Li, Z. (2024). Inhibitory activities of essential oils from *Syzygium aromaticum* inhibition of *Echinochloa crus-galli*. *Plos one*, 19(6), e0304863.

- Novaes, P., Imatomi, M., Miranda, M. A. F. M., & Gualtieri, S. C. J. (2013). Phytotoxicity of leaf aqueous extract of *Rapanea umbellata* (Mart.) Mez (Primulaceae) on weeds. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 35(2), 231–239
- Ocán-Torres, D., Martínez-Burgos, W. J., Manzoki, M. C., Soccol, V. T., Neto, C. J. D., & Soccol, C. R. (2024). Microbial bioherbicides based on cell-free phytotoxic metabolites: analysis and perspectives on their application in weed control as an innovative sustainable solution. *Plants*, 13(14), 1996.
- Owens, D. K., Bajsa-Hirschel, J., Duke, S. O., Carbonari, C. A., Gomes, G. L., Asolkar, R., ... & Dayan, F. E. (2020). The contribution of romidepsin to the herbicidal activity of *Burkholderia rinojensis* biopesticide. *Journal of natural products*, 83(4), 843-851.
- Parameswari, Y. S., & Srinivas, A. (2017). Weed management in rice—a review. *International Journal of Applied and Pure Science and Agriculture*, 3(1), 2394-5532.
- Parven, A., Meftaul, I. M., Venkateswarlu, K., & Megharaj, M. (2025). Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(2), 1181-1202.
- Poonpaiboonpipat, T., Pangnakorn, U., Suvunnamek, U., Teerarak, M., Charoenying, P., & Laosinwattana, C. (2013). Phytotoxic effects of essential oil from *Cymbopogon citratus* and its physiological mechanisms on barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Industrial Crops and Products*, 41, 403–407.
- Poonpaiboonpipat, T., Krumsri, R., & Kato-Noguchi, H. (2021). Allelopathic and Herbicidal Effects of Crude Extract from *Chromolaena odorata* (L.) RM King and H. Rob. on *Echinochloa crus-galli* and *Amaranthus viridis*. *Plants*, 10(8), 1609.

- Powles, S. B., & Yu, Q. (2010). Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annual review of plant biology*, 61(1), 317-347.
- Priya Dharsini, P., Dhanasekaran, D., Gopinath, P. M., Ramanathan, K., Shanthi, V., Chandraleka, S., & Biswas, B. (2017). Spectroscopic Identification and Molecular Modeling of Diethyl 7-hydroxytrideca-2, 5, 8, 11-tetraenedioate: a Herbicidal Compound from *Streptomyces sp.* *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(6), 2217-2227.
- Qiang, S., Wang, L., Wei, R., Zhou, B., Chen, S., Zhu, Y., ... & An, C. (2010). Bioassay of the herbicidal activity of AAC-toxin produced by *Alternaria alternata* isolated from *Ageratina adenophora*. *Weed Technology*, 24(2), 197-201.
- Radhakrishnan, R., Park, J. M., & Lee, I. J. (2016). *Enterobacter sp. I-3*, a bio-herbicide inhibits gibberellins biosynthetic pathway and regulates abscisic acid and amino acids synthesis to control plant growth. *Microbiological research*, 193, 132-139.
- Rahaman, F., Shukor Juraimi, A., Rafii, M. Y., Uddin, K., Hassan, L., Chowdhury, A. K., & Hossain, A. (2022). Allelopathic potential in rice-a biochemical tool for plant defense against weeds. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1072723.
- Rajguru, S. N., Burgos, N. R., Shivrain, V. K., & Stewart, J. M. (2005). Mutations in the red rice ALS gene associated with resistance to imazethapyr. *Weed Science*, 53(5), 567-577.
- Rao, A. N., Johnson, D. E., Sivaprasad, B., Ladha, J. K., & Mortimer, A. M. (2007). Weed management in direct-seeded rice. *Advances in agronomy*, 93, 153-255.
- Rao, A. N., & Matsumoto, H. (2017). Weed management in rice in the Asian-Pacific region. Asian-Pacific Weed Science Society (APWSS); The Weed Science Society of Japan, Japan and Indian Society of Weed Science, India.

- Raza, T., Khan, M. Y., Nadeem, S. M., Imran, S., Qureshi, K. N., Mushtaq, M. N., ... & Eash, N. S. (2021). Biological management of selected weeds of wheat through co-application of allelopathic rhizobacteria and sorghum extract. *Biological Control*, *164*, 104775.
- Razaq, M., & Shah, F. M. (2022). Biopesticides for management of arthropod pests and weeds. In *Biopesticides* (pp. 7-18). Woodhead Publishing.
- República de Colombia. (2015). *Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*
- Rivera, M., Amézquita, E., Bernal, J. H., & Rao, I. M. (2012). Las sabanas de los Llanos Orientales de Colombia: caracterización biofísica e importancia para la producción agropecuaria.
- Roberts, J., Florentine, S., Fernando, W. D., & Tennakoon, K. U. (2022). Achievements, developments and future challenges in the field of bioherbicides for weed control: A global review. *Plants*, *11*(17), 2242.
- Santos, A. M., Uribe, L. A., Torres, L., Betancourt, R., Moreno, F., Alarcón, E., & Gómez, M. (2018). Marco regulatorio para el registro de bioplaguicidas. Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros, *2*, 695-715.
- Schein, D., Santos, M. S., Schmaltz, S., Nicola, L. E., Bianchin, C. F., Ninaus, R. G. & Mazutti, M. A. (2022). Microbial prospection for bioherbicide production and evaluation of methodologies for maximizing phytotoxic activity. *Processes*, *10*(10), 2001.
- Shrestha, A. (2009). Potential of a black walnut (*Juglans nigra*) extract product (NatureCur®) as a pre-and post-emergence bioherbicide. *Journal of Sustainable Agriculture*, *33*(8), 810-822.

- Shi, L., Wu, Z., Zhang, Y., Zhang, Z., Fang, W., Wang, Y., Wan, Z., Wang, K., & Ke, S. (2019). Herbicidal secondary metabolites from actinomycetes: structure diversity, modes of action, and their roles in the development of herbicides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(1), 17-32.
- Shivrain, V. K., Burgos, N. R., Anders, M. M., Rajguru, S. N., Moore, J., & Sales, M. A. (2007). Gene flow between Clearfield™ rice and red rice. *Crop Protection*, 26(3), 349-356.
- SiB Colombia (2025). Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia. Datos de Ocurrencia y Colecciones Biológicas. <https://ipt.biodiversidad.co/sib/>
- Sierra Sarmiento, M. A., Barros Algarra, R., Gómez Paternina, D., Mejía Terán, A., & Suárez Rivero, D. (2018). Productos naturales: metabolitos secundarios y aceites esenciales.
- Singh, A., Pazhanisamy, S., Devi, R. C., Singh, A. K., & Mehta, C. M. (2020). Weed Management Strategies in Organic Rice Production System-A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 10(12), 519-528.
- Sivadasan, A., & Shaikmoideen, J. (2025). Validation of bioherbicidal activity of *Kluyvera intermedia* against *Echinochloa crus-galli*. *Indian Journal of Weed Science*, 57, 217–224.
- Suárez-Suárez L S, Castro-Rojas G V, Medina-Merchan M, Quiñonez L M, Ortiz-Moreno M L (2025): Herbario de la Universidad de los Llanos. v1.12. Universidad de los Llanos. Dataset/Ocurrence. <https://doi.org/10.15472/ga1jzr>
- Suliman, S., & Singh, S. (2022). Distribution, management implications and yield impact of *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. in the rice field of District Baramulla (JK), India: A case study. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 9(6).

- Synowiec, A., Mozdzeń, K., Krajewska, A., Landi, M., & Araniti, F. (2019). *Carum carvi* L. essential oil: A promising candidate for botanical herbicide against *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv. in maize cultivation. *Industrial Crops and Products*, 140, 111652.
- Tan, M., Zhang, Y., Zhang, Y., Vurro, M., & Qiang, S. (2024). Effects of *Bipolaris yamadae* strain HXDC-1-2 as a bioherbicide against *Echinochloa crus-galli* in rice and dry fields. *Pest Management Science*, 80(8), 3786-3794.
- Thi, H. L., Lan, P. T. P., Chin, D. V., & KATO-NOGUCHI, H. I. S. A. S. H. I. (2008). Allelopathic potential of cucumber (*Cucumis sativus*) on barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Weed Biology and Management*, 8(2), 129-132.
- Tijjani, A., Bashir, K. A., Mohammed, I., Muhammad, A., Gambo, A., & Musa, H. (2016). Biopesticides for pests control: A review. *Journal of Biopesticides and Agriculture*, 3(1), 6-13.
- Torres, N. N. (2021). La bioprospección: indicador de los vacíos jurídicos en los conocimientos tradicionales agrícolas. *Inciso*, 23(1), 2.
- Tosiah, S., Kadir, J., Sariah, M., Juraimi, A. S., Lo, N. P., & Soetikno, S. (2010). Host range of *Exserohilum monoceras* 1125, a potential biological control agent for *Echinochloa* spp.
- Trabelsi, D., & Mhamdi, R. (2013). Microbial inoculants and their impact on soil microbial communities: a review. *BioMed Research International*, 2013(1), 863240.
- Trang, N. T. T., Cuong, N. T., Van Vang, L., & Le Thi, H. (2024). Evaluation of phytotoxic potential in Asteraceae plant extracts for biological control of *Echinochloa crus-galli* and *Echinochloa colona*. *Plant-Environment Interactions*, 5(5), e70009.

- Uribe, D., & Melgarejo, L. (2012). Ecología de microorganismos rizosféricos asociados a cultivos de arroz de Tolima y Meta. *Universidad Nacional de Colombia.. Bogota, Colombia.*
- Valverde, B. E. (2007). Status and management of grass-weed herbicide resistance in Latin America. *Weed Technology*, 21(2), 310-323.
- Vargas Gil, S., Serri, D., Campilongo Mancilla, E. J., Quiroga, M., Pastor, S., Trucco, V., Nome, C., Tolocka, P. A., Giayetto, A., Haelterman, R., Torrico, A. K., Ferrer, M., Ruiz Posse, A., Otero, M. L., de Breuil, S., Dottori, C., & Martino, J. (2025). Métodos de colecta, acondicionamiento y transporte de muestras. In L. Di Feo, A. Giayetto, & P. E. Rodríguez Pardina (Comps.), *Técnicas de detección de fitopatógenos* (1a ed. adaptada., pp. 2–15).
- Verdugo-Navarrete, C., Maldonado-Mendoza, I. E., Castro-Martínez, C., Leyva-Madrigal, K. Y., & Martínez-Álvarez, J. C. (2021). Selection of rhizobacteria isolates with bioherbicide potential against Palmer amaranth (*Amarathus palmeri* S. Wats.). *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(3), 1443-1450.
- Wang, X. L., Zhang, Z. Y., Xu, X. M., & Li, G. (2019). The density of barnyard grass affects photosynthesis and physiological characteristics of rice. *Photosynthetica*, 57(2).
- Wato, T. (2020). The role of allelopathy in pest management and crop production-A review. *Food Sci. Qual. Manag*, 93, 13-21.
- Wolfe, J. C., Neal, J. C., Harlow, C. D., & Gannon, T. W. (2016). Efficacy of the bioherbicide thaxtomin A on smooth crabgrass and annual bluegrass and safety in cool-season turfgrasses. *Weed Technology*, 30(3), 733-742.

- Yamaguchi, K. I., Hirose, M., & Mutsunobu, M. (2011). Evaluation of indigenous fungi in Kyushu as biocontrol agents against red sprangletop (*Leptochloa chinensis*). *Bull. Minamikyushu Univ.* 41A, 31, 35.
- Yang, D., He, Q., Wang, Q., Zhou, J., Ke, H., Wen, X., ... & Jiang, J. (2025). Herbicidal Control Potential of the Endophytic Bacterium *B. pseudorignoneis* BFYBC-8 Isolated from *E. crus-galli* Seeds. *Microorganisms*, 13(10), 2293.
- Zeller, S. L., Brandl, H., & Schmid, B. (2007). Host-plant selectivity of rhizobacteria in a crop/weed model system. *PLoS One*, 2(9), e846.
- Zheng, T., Ma, Y. L., Li, W. S., Deng, J. X., Li, H., Luo, M. L., ... & Wang, Y. H. (2023). Trichoderma species from rhizosphere of *Oxalis corymbosa* release volatile organic compounds inhibiting the seed germination and growth of *Echinochloa colona*. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(11), 105274.
- Zhu, J., Liang, W., Yang, S., Wang, H., Shi, C., Wang, S., ... & DiTommaso, A. (2020). Safety of oilseed rape straw mulch of different lengths to rice and its suppressive effects on weeds. *Agronomy*, 10(2), 201.
- Zion Market Research. (2024). Biopesticides Market Size, Industry Analysis, Share, Forecast 2034. <https://www.zionmarketresearch.com/report/biopesticides-market>