

UNEMI

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FACULTAD DE POSGRADO

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO SOBRE LA REDUCCIÓN DE ARSÉNICO
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE *TRICHODERMA RESSEI* EN AGUAS
CONTAMINADAS POR ACTIVIDAD MINERA

AUTOR:

ARIEL ANDERSON ALVAREZ RAMIREZ

DIRECTOR (A):

VICTORIA EUGENIA GARCIA CASAS, Ph.D

Milagro, 2025

Derechos de Autor

Sr. Dr.

Fabricio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **Ariel Anderson Álvarez Ramírez**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **Magíster en Biotecnología**, como aporte a la Línea de Investigación **Impacto Ambiental y social** de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 07 de agosto del 2025

Ariel Anderson Álvarez Ramírez
C.I.: 0705687846

Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **Victoria Eugenia García Casas, Ph.D**, en mi calidad de tutora del trabajo de titulación, elaborado por **Ariel Anderson Álvarez Ramírez**, cuyo tema es **Análisis bibliométrico sobre la reducción de arsénico mediante la aplicación de *Trichoderma reesei* en aguas contaminadas por actividad minera**, que aporta a la Línea de Investigación **Impacto Ambiental y social**, previo a la obtención del Grado de **Magíster en Biotecnología**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 20 de junio del 2025

VICTORIA
EUGENIA
GARCIA CASAS

Firmado digitalmente
por VICTORIA
EUGENIA GARCIA
CASAS

Victoria Eugenia García Casas, Ph.D
C.I.: 091559595946

Certificación de Defensa



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO FACULTAD DE POSGRADO ACTA DE SUSTENTACIÓN MAESTRÍA EN BIOTECNOLOGÍA

En la Facultad de Posgrado de la Universidad Estatal de Milagro, a los veintinueve días del mes de julio del dos mil veinticinco, siendo las 10:30 horas, de forma VIRTUAL comparece el/la maestrante, ING. ALVAREZ RAMIREZ ARIEL ANDERSON, a defender el Trabajo de Titulación denominado "ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO SOBRE LA REDUCCIÓN DE ARSENICO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TRICHODERMA RESSEI EN AGUAS CONTAMINADAS POR ACTIVIDAD MINERA", ante el Tribunal de Calificación integrado por: Dca. PEREZ MARTINEZ SIMON, Presidente(a), CHENCHE LOPEZ OSCAR MAURICIO en calidad de Vocal; y, Ing. SANCHEZ VASQUEZ VIVIANA LORENA que actúa como Secretario/a.

Una vez defendido el trabajo de titulación; examinado por los integrantes del Tribunal de Calificación, escuchada la defensa y las preguntas formuladas sobre el contenido del mismo al maestrante compareciente, durante el tiempo reglamentario, obtuvo la calificación de: **86.33** equivalente a: **MUY BUENO**.

Para constancia de lo actuado firman en unidad de acto el Tribunal de Calificación, siendo las 11:30 horas.



SIMON PEREZ
MARTINEZ
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Dca. PEREZ MARTINEZ SIMON
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL



OSCAR MAURICIO
CHENCHE LOPEZ
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CHENCHE LOPEZ OSCAR MAURICIO
VOCAL



VIVIANA LORENA
SANCHEZ VASQUEZ
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Ing. SANCHEZ VASQUEZ VIVIANA LORENA
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL



ARIEL ANDERSON
ALVAREZ RAMIREZ
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ING. ALVAREZ RAMIREZ ARIEL ANDERSON
MAGISTER

Dedicatoria

A Dios, por su infinita sabiduría y por guiar cada uno de mis pasos, iluminando mi camino y dándome la fortaleza necesaria para superar cada desafío.

A mi amada madre, Nelly Ramirez Ordoñez, cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido el pilar fundamental de mi vida y el motor que me ha impulsado a alcanzar mis sueños.

A mi querida hermana, Ibelia Valrezo Ramirez, por su compañía, su comprensión y por ser una fuente inagotable de motivación y alegría.

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a Dios, por la vida, por las oportunidades brindadas y por permitirme culminar esta importante etapa de mi formación académica.

A mi madre, Nelly Ramírez Ordóñez, la persona más importante en mi vida, por su invaluable apoyo, su incansable esfuerzo y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Sin su amor y su sacrificio, este logro no habría sido posible. Su ejemplo de perseverancia y dedicación es mi mayor inspiración.

A la Universidad Estatal de Milagro, mi alma máter, por brindarme la oportunidad de formarme y por la excelencia académica que me ha permitido adquirir los conocimientos y las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional.

A mi tutora, Ph.D. Victoria Eugenia García Casas, por su valiosa guía, su paciencia, su profesionalismo y por compartir generosamente su conocimiento. Su dirección ha sido fundamental en la consecución de este informe de investigación.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra manera, han contribuido en este camino, brindándome su apoyo, su amistad y su aliento.

Resumen

La contaminación de fuentes hídricas por arsénico, derivada de la actividad minera, constituye una problemática ambiental y de salud pública urgente, en regiones como América Latina y Asia. Las tecnologías convencionales de remoción presentan limitaciones asociadas a su elevado costo, complejidad operativa y generación de residuos secundarios. En este contexto, la biorremediación surge como una alternativa sostenible, destacando el uso del hongo *Trichoderma reesei* por su capacidad para transformar, inmovilizar y remover metales pesados. Este estudio realiza un análisis bibliométrico sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en la reducción de arsénico en aguas contaminadas por minería, con el objetivo de identificar tendencias de investigación, vacíos de conocimiento y oportunidades futuras. Se empleó una metodología cuantitativa, de diseño no experimental y documental, utilizando bases como Scopus, Web of Science y ScienceDirect, y herramientas como VOSviewer y Bibliometrix para el procesamiento de datos. Los resultados muestran un crecimiento sostenido en la producción científica, siendo China, India y Brasil los principales contribuyentes. Ecuador evidencia escasa presencia en este campo. Se identificaron limitaciones como la falta de estudios en condiciones reales y protocolos estandarizados. Por lo que, se concluye que a pesar de que *Trichoderma reesei* es un agente biotecnológico prometedor, su implementación efectiva requiere mayor investigación aplicada y contextualizada.

Palabras claves: *Trichoderma reesei*, Tratamiento de aguas, minería, biorremediación, arsénico.

Abstract

Arsenic contamination of water sources, resulting from mining activity, represents an urgent environmental and public health issue in regions such as Latin America and Asia. Conventional removal technologies present limitations related to high costs, operational complexity, and the generation of secondary waste. In this context, bioremediation emerges as a sustainable alternative, highlighting the use of the fungus *Trichoderma reesei* due to its ability to transform, immobilize, and remove heavy metals. This study conducts a bibliometric analysis on the application of *Trichoderma reesei* in the reduction of arsenic in mining-contaminated waters, with the aim of identifying research trends, knowledge gaps, and future opportunities. A quantitative, non-experimental, documentary design was employed, using databases such as Scopus, Web of Science, and ScienceDirect, and tools such as VOSviewer and Bibliometrix for data processing. The results show sustained growth in scientific production, with China, India, and Brasil as the main contributors. Ecuador shows limited presence in this field. Limitations such as the lack of studies under real conditions and standardized protocols were identified. Therefore, it is concluded that, although *Trichoderma reesei* is a promising biotechnological agent, its effective implementation requires further applied and context-specific research.

Key words: *Trichoderma reesei*, Wastewater treatment, mining, bioremediation, arsenic.

Lista de Figuras

Figura 1. Producción científica 2010-2024.....	34
Figura 2. Autores con mayor producción científica.....	36
Figura 3. Revistas y áreas más temáticas.....	38
Figura 4. Países líderes en publicaciones.....	39
Figura 5. Red de co-ocurrencia de palabras claves.....	40
Figura 6. Palabras claves más frecuentes.....	42
Figura 7. Red de colaboración	43

Lista de Tablas

Tabla 1. Matriz de operacionalización de las variables	6
Tabla 2. Tendencias de publicación.....	33

Índice de contenidos

Introducción	1
CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Delimitación del problema.....	3
1.3. Formulación del problema	4
1.4. Preguntas de investigación.....	4
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos	4
1.6. Hipótesis	4
1.7. Justificación	5
1.7.1. Justificación Teórica	5
1.7.2. Justificación Metodológica	5
1.8. Declaración de las variables (Operacionalización).....	5
1.8.1. Variable Dependiente.....	5
1.8.2. Variables Intervinientes o Contextuales	5
CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial.....	8
2.1. Antecedentes Referenciales	8
2.2. Marco Conceptual.....	10
2.3. Marco Teórico.....	13
2.3.1. Introducción al Problema.....	13
2.3.2. Contaminación por Arsénico en el Río Amarillo	14
2.3.3. Impactos del arsénico en la salud humana y el ecosistema	14
2.3.4. Métodos convencionales para la remoción de arsénico.....	14
2.3.5. Biorremediación como Estrategia de Descontaminación.....	16
2.3.7. Factores Ambientales que Afectan la Eficiencia de <i>Trichoderma reesei</i>	20

2.3.9. Aplicaciones Futuras y Relevancia de la Investigación	25
CAPÍTULO III: Diseño Metodológico.....	28
3.1. Tipo y diseño de investigación	28
3.2. La población y la muestra	28
3.3. Los métodos y las técnicas.....	29
3.4. Procesamiento estadístico de la información.....	30
CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados.....	32
4.1. Análisis e Interpretación de Resultados.....	32
4.2. Análisis Bibliométrico de la Producción Científica.....	32
4.3. Producción científica anual.....	34
4.4. Autores más productivos y citados	36
4.5. Revistas y áreas temáticas más relevantes	38
4.6. Palabras clave más frecuentes y su co-ocurrencia	39
4.7. Redes de colaboración	43
4.8. Identificación de Vacíos de Conocimiento	44
4.9. Contextos Geográficos y Ambientales Estudiados	45
4.10. Factores Limitantes y Desafíos en la Implementación	46
4.11. Discusión General de los Resultados	46
CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones	48
5.1. Conclusiones.....	48
5.2. Discusión.....	48
5.3. Recomendaciones	50
5.3.1. Limitaciones del Estudio.....	51
5.3.2. Líneas Futuras de Investigación.....	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
ANEXOS	63

Introducción

El arsénico (As), un metaloide sumamente tóxico, representa una de las principales amenazas para la salud pública y el medio ambiente a nivel global. Se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, liberándose a las fuentes de agua a través de procesos geogénicos como la disolución de minerales y la actividad volcánica (Smedley & Kinniburgh, 2002). No obstante, las actividades antropogénicas, particularmente la minería, han intensificado significativamente su movilización y dispersión en los ecosistemas acuáticos. La extracción y procesamiento de minerales a menudo liberan grandes cantidades de arsénico previamente inmovilizado en rocas, contaminando suelos, aguas superficiales y subterráneas, y afectando vastas regiones (Sharma et al., 2015). La exposición crónica a este contaminante a través del agua potable se asocia con una amplia gama de efectos adversos para la salud humana, incluyendo diversos tipos de cáncer (pulmón, vejiga, piel), enfermedades cardiovasculares, trastornos neurológicos, problemas hepáticos y renales, y alteraciones en el desarrollo (Sharma et al., 2015). Ante este panorama, la remoción eficiente y sostenible del arsénico de las aguas contaminadas se ha convertido en una prioridad de investigación y desarrollo tecnológico a nivel mundial, con el objetivo de salvaguardar la salud humana y la integridad de los ecosistemas.

Las tecnologías convencionales empleadas para la eliminación de arsénico del agua incluyen métodos fisicoquímicos como la coagulación-precipitación, la adsorción, la filtración por membrana y el intercambio iónico (Chung et al., 2017). Si bien estas técnicas han demostrado cierta eficacia, a menudo presentan desventajas significativas. Entre ellas se destacan los altos costos operativos y de mantenimiento, la generación de grandes volúmenes de lodos tóxicos que requieren una disposición especial, y una eficiencia que puede variar considerablemente dependiendo de las características fisicoquímicas específicas del agua a tratar, como el pH, la presencia de otros iones y la forma de arsénico (As(III) o As(V)). Estas limitaciones impulsan la búsqueda de alternativas más económicas, ambientalmente amigables y sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico.

En este contexto, la biorremediación ha emergido como una tecnología prometedora y eco-innovadora. Esta estrategia aprovecha la capacidad natural de diversos organismos vivos, como bacterias, algas y hongos, para degradar, transformar o inmovilizar contaminantes, convirtiéndolos en formas menos tóxicas o facilitando su remoción del medio (Sharma et al.,

2019; Singh et al., 2020). Particularmente, los hongos han captado la atención de la comunidad científica debido a su versatilidad metabólica, su capacidad para crecer en una amplia gama de condiciones y su notable habilidad para bioacumular y biotransformar metales pesados, incluyendo el arsénico, mediante mecanismos como la biosorción en la pared celular, la quelación intracelular, la biotransformación redox y la volatilización (Sharma et al., 2019; Singh et al., 2020).

El presente estudio se centra en un análisis bibliométrico exhaustivo sobre el potencial de *Trichoderma reesei* en la biorremediación de arsénico. *Trichoderma reesei* es un hongo filamentoso ampliamente investigado y valorado en la biotecnología por su excepcional capacidad de producir enzimas lignocelulolíticas, pero también por su resistencia a condiciones ambientales adversas y su interacción con metales. A pesar de su reconocido potencial, la aplicación específica de *Trichoderma reesei* en la reducción de arsénico en aguas contaminadas por actividad minera no ha sido sistemáticamente revisada. Por lo tanto, este estudio busca evaluar de manera crítica la literatura científica existente, identificando las principales tendencias de investigación, los enfoques metodológicos predominantes, los mecanismos de acción propuestos y las brechas de conocimiento actuales. Esta revisión permitirá no solo consolidar el estado del arte en este campo emergente, sino también proporcionar una base sólida para futuras investigaciones que optimicen el uso de *Trichoderma reesei* como una solución efectiva y sostenible para la mitigación de la contaminación por arsénico en entornos afectados por la minería.

CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento del problema

La contaminación por arsénico en fuentes de agua como resultado de actividades mineras representa un problema crítico a nivel mundial, especialmente en comunidades cercanas a zonas de extracción (OMS, 2022). El arsénico, un elemento tóxico y cancerígeno, pone en riesgo la salud pública, afecta los ecosistemas acuáticos y reduce la disponibilidad de agua potable segura (ATSDR, 2023). A pesar de la existencia de diversos métodos fisicoquímicos para la remoción de este contaminante, muchos presentan limitaciones como altos costos, generación de residuos secundarios y baja sostenibilidad ambiental.

En este contexto, la biorremediación surge como una alternativa prometedora y sostenible, destacándose el uso del hongo *Trichoderma reesei* por sus propiedades metabólicas y su capacidad de transformar compuestos tóxicos. Sin embargo, existe una necesidad imperante de consolidar y analizar el cuerpo de literatura científica existente para evaluar la efectividad de esta metodología. La falta de un análisis bibliométrico exhaustivo que aborde el potencial del *Trichoderma reesei* en la reducción de arsénico dificulta la identificación de tendencias, vacíos en el conocimiento y perspectivas futuras en este campo.

El problema central radica en que, aunque se han realizado investigaciones aisladas, no se cuenta con una sistematización que permita aprovechar y optimizar esta estrategia de remediación en contextos específicos, como los relacionados con aguas contaminadas por actividad minera. Por lo tanto, es necesario desarrollar un análisis bibliométrico que explore los avances, limitaciones y aplicaciones del *Trichoderma reesei* en este ámbito, con el fin de generar bases científicas para su implementación eficaz.

1.2. Delimitación del problema

Este estudio se enfocará exclusivamente en el análisis bibliométrico de investigaciones científicas relacionadas con la aplicación del hongo *Trichoderma reesei* para la reducción de arsénico en aguas contaminadas como consecuencia de actividades mineras. Se delimitará la búsqueda de información a publicaciones académicas indexadas y disponibles en bases de datos reconocidas, como Scopus, Web of Science y Google Scholar, abarcando un período comprendido entre los años 2010 al 2024.

Además, el análisis se centrará en identificar los avances, tendencias y vacíos de conocimiento en el uso del *Trichoderma reesei* como estrategia de biorremediación, excluyendo métodos fisicoquímicos que no involucren procesos biológicos. Geográficamente, se priorizará

información de investigaciones realizadas en regiones con alta incidencia de contaminación por arsénico debido a actividades mineras, como América Latina y Asia.

1.3. Formulación del problema

¿Cuáles son las tendencias, vacíos de conocimiento y oportunidades identificadas en la literatura científica sobre la aplicación del hongo *Trichoderma reesei* como estrategia biológica para la reducción de arsénico en aguas contaminadas por actividades mineras, y cómo podría este análisis bibliométrico contribuir al desarrollo de soluciones más sostenibles y efectivas frente a esta problemática ambiental?

1.4. Preguntas de investigación

¿Cuál es el estado del conocimiento científico actual sobre la reducción de arsénico en aguas contaminadas mediante la aplicación del hongo *Trichoderma reesei*?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Analizar el estado actual de la literatura científica sobre la reducción de arsénico en aguas contaminadas por actividades mineras mediante la aplicación del hongo *Trichoderma reesei*, identificando tendencias, vacíos de conocimiento y oportunidades para el desarrollo de estrategias de biorremediación sostenibles y efectivas.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Realizar un análisis bibliométrico para evaluar las tendencias científicas en la aplicación de *Trichoderma reesei* en la remoción de arsénico de aguas contaminadas.
2. Identificar los vacíos de conocimiento en la investigación existente sobre el uso de *Trichoderma reesei* como estrategia de biorremediación.
3. Determinar los contextos geográficos y ambientales más estudiados en el ámbito de la contaminación por arsénico debido a actividades mineras.
4. Evaluar los factores limitantes y desafíos en la implementación de *Trichoderma reesei* para el tratamiento de aguas contaminadas.

1.6. Hipótesis

El análisis bibliométrico de la literatura científica sobre la reducción de arsénico en aguas contaminadas mediante la aplicación del hongo *Trichoderma reesei* permitirá identificar patrones de investigación, vacíos críticos de conocimiento y tendencias emergentes, aportando herramientas teóricas y prácticas para optimizar esta estrategia de biorremediación en entornos afectados por actividades mineras, con miras a promover soluciones sostenibles y eficientes

1.7. Justificación

1.7.1. Justificación Teórica

La investigación se fundamenta en principios de biorremediación, que propone el uso de organismos vivos, como el hongo *Trichoderma reesei*, para reducir la contaminación ambiental, específicamente en la remoción de arsénico de aguas contaminadas. Este enfoque teórico conecta con conceptos de microbiología ambiental, química de contaminantes y sostenibilidad. Además, se alinea con estudios previos que han demostrado el potencial metabólico de *Trichoderma reesei* para transformar compuestos tóxicos. La revisión bibliométrica se apoya en teorías de análisis de redes y métricas científicas, las cuales permiten mapear el desarrollo de un campo de estudio y generar nuevo conocimiento a partir del análisis de tendencias y vacíos en la literatura.

1.7.2. Justificación Metodológica

El análisis bibliométrico es una herramienta poderosa para evaluar el panorama científico de un tema específico. Al aplicar técnicas como el conteo de publicaciones, análisis de citas y redes de colaboración, se podrá identificar las áreas de mayor desarrollo, los vacíos de conocimiento y las oportunidades para futuras investigaciones. Este enfoque metodológico es adecuado para sistematizar la información sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en la remoción de arsénico, permitiendo una comprensión profunda y estructurada del estado actual del campo. El análisis estará centrado en bases de datos científicas reconocidas, garantizando la fiabilidad y calidad de los datos recopilados.

1.8. Declaración de las variables (Operacionalización)

1.8.1. Variable Dependiente

Estado del conocimiento científico. Refleja las tendencias, vacíos y perspectivas identificadas en la literatura científica a través del análisis bibliométrico.

1.8.2. Variables Intervinientes o Contextuales

1. Fuentes de datos bibliométricos: Bases de datos científicas seleccionadas, como Scopus, Web of Science y Google Scholar.
2. Temporalidad de los estudios: Período de publicación de los artículos analizados (período del 2010 al 2024).
3. Regiones geográficas: Distribución de las investigaciones según ubicación, con énfasis en zonas con alta incidencia de contaminación por arsénico (América Latina, Asia, etc.).

4. Métodos de análisis bibliométrico: Técnicas como análisis de co-citación, conteo de publicaciones, palabras clave, y redes de colaboración.
5. Relevancia temática: Investigaciones relacionadas exclusivamente con *Trichoderma reesei* y su aplicación en la reducción de arsénico.

Tabla 1

Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento	Escala
Producción científica sobre la aplicación del <i>Trichoderma reesei</i> (Variable independiente)	Alcance geográfico	Regiones con estudios sobre biorremediación y reducción de arsénico	Bases de datos bibliométricas	Nominal
	Periodo de tiempo	Años de publicación de investigaciones relevantes	Bases de datos bibliométricas	Intervalo
	Colaboración científica	Redes de autores, instituciones y países que investigan el tema	Análisis de coautoría	Nominal
Estado del conocimiento científico (Variable dependiente)	Tendencias en la investigación	Temas más investigados en la literatura sobre <i>Trichoderma reesei</i>	Análisis de palabras clave	Nominal
	Vacíos de conocimiento	Áreas poco estudiadas en el uso de <i>Trichoderma reesei</i> para reducir arsénico	Revisión crítica de literatura	Nominal

	Impacto de las publicaciones	Número de citas y referencias en investigaciones relacionadas	Bases de datos bibliométricas	Razón
Contexto ambiental y metodológico (Variables de control)	Parámetros del agua contaminada	pH, temperatura y concentración inicial de arsénico en estudios analizados	Información en artículos	Intervalo
	Estrategias de aplicación del <i>Trichoderma reesei</i>	Métodos de biorremediación reportados (líquida, sólida, etc.)	Información en artículos	Nominal

CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

2.1. Antecedentes Referenciales

El estudio de la biorremediación del arsénico en cuerpos de agua afectados por actividad minera ha sido objeto de múltiples investigaciones a nivel nacional e internacional como una solución biotecnológica alternativa a los métodos fisicoquímicos tradicionales. A continuación, se presenta una revisión de los antecedentes más relevantes que permiten contextualizar la presente investigación y evidenciar las lagunas de conocimiento existentes.

Diversas investigaciones han demostrado que los hongos filamentosos, en particular *Trichoderma reesei*, poseen un notable potencial para remover metales pesados como el arsénico mediante mecanismos como la biosorción, bioacumulación y biotransformación (Argumedo-Delira et al., 2009; Donthu et al., 2021; Garzón et al., 2017; Tyśkiewicz et al., 2022).

En una revisión sistemática realizada por Zhou et al. (2021), se concluyó que *Trichoderma reesei* puede remover eficientemente arsénico de medios acuosos en condiciones de laboratorio, con porcentajes que oscilan entre el 60 % y el 85 % de eficiencia. La revisión también destacó que los mecanismos implicados en dicha remoción son multifactoriales, involucrando la adsorción en la pared celular, la reducción enzimática de especies arsenicales, y la secreción de metabolitos secundarios quelantes.

Singh et al. (2020) llevaron a cabo un estudio experimental en aguas contaminadas artificialmente con arsénico y reportaron que *Trichoderma reesei* logró reducir hasta un 78 % del contaminante, confirmando que factores como el pH (óptimo 5.5), la temperatura (entre 25 °C y 30 °C) y la concentración inicial de arsénico influyen significativamente en la eficacia del proceso. Estos resultados refuerzan la adaptabilidad y eficiencia del hongo bajo condiciones controladas.

Desde un enfoque molecular, Mukherjee et al. (2014) identificaron la presencia de enzimas como arsenato reductasas (ArsC) y glutatión S-transferasas en *Trichoderma reesei*, lo que permite al hongo transformar el arsenato (As^{5+}) en arsenito (As^{3+}) y luego inmovilizarlo o volatilizarlo. Esto demuestra que, más allá de la biosorción pasiva, existen rutas metabólicas activas de detoxificación.

En el contexto latinoamericano, Cumbal et al. (2018) realizaron estudios sobre la capacidad de hongos filamentosos nativos ecuatorianos para remover metales pesados en aguas residuales de origen minero. Aunque el estudio no se centró exclusivamente en *Trichoderma reesei*, se evidenció la viabilidad técnica de usar especies locales para la remediación de arsénico, plomo y cadmio.

En Ecuador, la cuenca del río Amarillo ha sido objeto de preocupación ambiental debido a la intensa actividad minera artesanal e industrial. Informes del Ministerio del Ambiente y de diversas ONGs han evidenciado niveles de arsénico que superan los límites máximos permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), sin embargo, no se han implementado estrategias sostenibles de remediación (OMS, 2022). Esta carencia abre una oportunidad para validar científicamente el uso de *Trichoderma reesei* como solución biotecnológica adaptada a las condiciones locales.

A pesar del cúmulo creciente de estudios sobre la remoción de arsénico con hongos, la literatura carece de análisis bibliométricos sistemáticos que integren y visualicen las tendencias, vacíos de conocimiento, y direcciones futuras de investigación específicamente enfocadas en *Trichoderma reesei*. Esta omisión justifica la realización del presente estudio, ya que la consolidación de este conocimiento permitiría diseñar intervenciones basadas en evidencia y orientar futuras aplicaciones prácticas en contextos reales como el ecuatoriano.

Investigaciones internacionales

A nivel global, diversos estudios han explorado la remoción de arsénico utilizando hongos filamentosos, siendo *Trichoderma reesei* una de las especies más prometedoras. Zhou, (2021), en una revisión sistemática publicada en el Journal of Environmental Management, analizaron el potencial de *Trichoderma reesei* para remover arsénico y otros metales pesados mediante mecanismos de bioadsorción y biotransformación. En el estudio se concluyó que el hongo es capaz de remover eficientemente arsénico en condiciones de laboratorio, pero que aún existen desafíos en su aplicación a gran escala y en entornos naturales.

En India, Singh, (2020) desarrolló un estudio experimental en medios contaminados con arsénico, demostrando que *Trichoderma reesei* podía reducir hasta un 78 del metaloide bajo condiciones controladas. Además, identificó que factores como el pH, la temperatura y la concentración inicial del contaminante influyen significativamente en la eficiencia del proceso.

Por su parte, Mukherjee, (2014) abordó los mecanismos moleculares implicados en el metabolismo del arsénico en microorganismos, destacando la presencia de enzimas como arsenato reductasas y glutatión S-transferasas en hongos del género *Trichoderma*, que permiten la transformación química del arsénico hacia formas menos tóxicas.

Investigaciones en América Latina y Ecuador

En América Latina, el trabajo de Cumbal (2018), realizado en la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, evaluó el uso de hongos filamentosos nativos en la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales mineras. Si bien no se centró exclusivamente en *Trichoderma reesei*, el estudio resaltó la eficiencia de los hongos como agentes remediadores en medios acuáticos con presencia de arsénico, plomo y cadmio.

Asimismo, investigaciones locales han identificado la necesidad de aplicar tecnologías sostenibles en regiones contaminadas por la minería artesanal. En particular, en la **cuenca del río Amarillo**, ubicada en el cantón Portovelo, provincia de El Oro, se han registrado niveles preocupantes de contaminación. Al respecto, los estudios ambientales realizados por instituciones como el **Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador** (MAATE, 2022), así como por organizaciones no gubernamentales como **Acción Ecológica** (2019) y **Fundación EcoCiencia** (2020), han reportado concentraciones de arsénico superiores a los límites permisibles establecidos por la OMS, sin que hasta la fecha se haya implementado una solución biotecnológica efectiva y sostenida.

Estos antecedentes demuestran que, aunque existe un cuerpo significativo de investigación sobre biorremediación con *Trichoderma reesei*, persiste una **laguna en cuanto a estudios bibliométricos sistemáticos** que integren esta información, identifiquen tendencias, vacíos de conocimiento y orienten futuras investigaciones en contextos específicos como el del sur del Ecuador.

2.2. Marco Conceptual

Contaminación por arsénico y su impacto

El arsénico es un contaminante prioritario en aguas afectadas por actividades mineras, con efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas Rangel Montoya et al., (2015); por lo que, la OMS considera la contaminación por arsénico como una de las amenazas químicas más graves para la salud pública, especialmente en regiones donde el agua subterránea contiene

niveles naturalmente elevados de este elemento, por tanto, establece límites estrictos para su concentración en agua potable, lo que resalta la urgencia de desarrollar métodos efectivos de remediación, toda vez que la exposición prolongada al arsénico, principalmente a través del consumo de agua contaminada, puede causar intoxicación crónica, manifestándose en lesiones cutáneas, enfermedades cardiovasculares, diabetes y diversos tipos de cáncer. También se ha asociado con efectos negativos en el desarrollo cognitivo y un aumento de la mortalidad en jóvenes adultos (OMS, 2022).

Biorremediación como estrategia sostenible

La biorremediación se perfila como una de las estrategias más prometedoras y sostenibles para enfrentar la contaminación por arsénico, especialmente en suelos y aguas subterráneas afectadas por actividades mineras, agrícolas o industriales. Este enfoque utiliza microorganismos para transformar o inmovilizar contaminantes, reduciendo su toxicidad y su impacto ambiental, por lo que, se ha consolidado como una alternativa ecológica y económica frente a los métodos químicos tradicionales (Rodríguez Martínez et al., 2017).

Rol de *Trichoderma reesei* en la reducción de arsénico

Trichoderma reesei es un hongo filamentoso conocido por su capacidad de producir enzimas hidrolíticas y metabolitos secundarios que facilitan la adsorción y transformación de metaloides como el arsénico (Rangel et al., 2015). Su adaptabilidad a diversas condiciones ambientales lo posiciona como un candidato prometedor en la biorremediación de aguas contaminadas.

Análisis bibliométrico como herramienta de investigación

El análisis bibliométrico es una herramienta empleada en la investigación que da lugar a la exploración y análisis de grandes volúmenes de datos científicos. Su aplicación permite extraer los matices evolutivos de un campo específico, a la vez que arroja luz sobre las áreas emergentes en ese campo; por lo que, la implementación de esta herramienta es de gran importancia para poder identificar tendencias, autores clave y enfoques metodológicos predominantes en un campo de estudio (Donthu et al., 2021). En el contexto de la reducción de arsénico mediante *Trichoderma reesei*, esta herramienta puede revelar áreas de avance científico y brechas de conocimiento, guiando futuras investigaciones.

Impacto de la actividad Minera en aguas Contaminadas

La actividad minera, tanto a gran escala como artesanal, es una de las principales fuentes de contaminación de aguas superficiales y subterráneas a nivel mundial. Su impacto sobre los cuerpos hídricos ha sido extensamente documentado, particularmente en regiones con explotación de metales pesados como el oro, cobre y plomo, donde el uso intensivo de productos químicos y la inadecuada disposición de residuos generan graves alteraciones en la calidad del agua (Simate & Ndlovu, 2014).

En el proceso minero, se utilizan sustancias como el cianuro, el mercurio y el ácido sulfúrico, además de movilizar metales presentes naturalmente en los minerales, como el arsénico, plomo, cadmio y zinc. Estos contaminantes pueden ingresar al ambiente acuático a través del **drenaje ácido de mina (DAM)**, lixiviación de pilas de mineral, filtraciones de relaves, y escorrentía superficial (Lottermoser, 2010). El DAM, en particular, es generado por la oxidación de sulfuros metálicos expuestos al aire y al agua, lo que produce efluentes ácidos con alta carga de metales pesados disueltos (Younger et al., 2002).

Uno de los elementos más preocupantes es el **arsénico (As)**, el cual suele estar presente en minerales como la arsenopirita (FeAsS). Su liberación al agua se produce como resultado de procesos geogénicos y antrópicos, siendo la minería una fuente directa de aumento de su biodisponibilidad (Bundschuh et al., 2014). La exposición al arsénico a través del agua potable y alimentos contaminados se ha relacionado con efectos adversos graves como cáncer de piel, vejiga y pulmón, enfermedades cardiovasculares, alteraciones neurológicas, y efectos sobre el desarrollo fetal (ATSDR, 2007; WHO, 2022).

Desde una perspectiva ecológica, los impactos de la minería sobre los ecosistemas acuáticos incluyen la **alteración del pH del agua**, pérdida de biodiversidad, toxicidad para organismos acuáticos, eutrofización secundaria por nutrientes liberados en los relaves, y bioacumulación de metales pesados en peces y macroinvertebrados (Fernández-Luqueño et al., 2013). Esto compromete no solo la salud ambiental del ecosistema, sino también la seguridad alimentaria y el acceso a agua limpia para las comunidades aledañas.

En América Latina, el caso del **río Amarillo en Portovelo, Ecuador**, es representativo del deterioro ambiental causado por la minería aurífera mal gestionada. Informes técnicos han documentado concentraciones de arsénico por encima de los límites permisibles establecidos

por la OMS (10 µg/L), afectando a comunidades que dependen del río para consumo, riego y pesca (Cumbal & Herrera, 2018). La persistencia del problema se relaciona con la **falta de sistemas de tratamiento de efluentes, el abandono de pasivos mineros y el limitado control ambiental** por parte de las autoridades.

Adicionalmente, la minería informal y artesanal presenta desafíos particulares debido al uso inadecuado de tecnologías, la ausencia de infraestructura básica para el manejo de residuos y la escasa capacitación ambiental de los actores involucrados (Veiga et al., 2014). Estos factores multiplican el riesgo de contaminación difusa, de difícil trazabilidad, y con impactos acumulativos a largo plazo.

Frente a esta problemática, se hace evidente la necesidad de soluciones sostenibles y de bajo costo que permitan **remediar el daño ambiental sin generar nuevos residuos peligrosos**. En este contexto, la biorremediación con microorganismos como *Trichoderma reesei* emerge como una alternativa eficaz y adaptable a zonas rurales afectadas por la minería, ofreciendo un enfoque ecológico para la restauración de cuerpos de agua contaminados.

2.3. Marco Teórico

2.3.1. Introducción al Problema

La contaminación por metales pesados, en particular el arsénico, representa una de las amenazas más persistentes y peligrosas para los ecosistemas acuáticos y la salud humana a nivel global. El arsénico es un metaloide de alta toxicidad que se libera al ambiente principalmente por procesos geogénicos y por actividades antrópicas, como la minería metálica. En contextos latinoamericanos, como el caso de Portovelo (Ecuador), la actividad minera intensiva ha generado una carga significativa de arsénico en cuerpos de agua como el río Amarillo, con consecuencias ecológicas y sanitarias severas (Bundschuh, 2014).

Ante la limitada eficiencia y alto costo de las tecnologías fisicoquímicas tradicionales, la biorremediación se ha posicionado como una alternativa biotecnológica sostenible y eficiente. En este marco, el hongo filamentoso *Trichoderma reesei* ha emergido como un agente prometedor para la bioacumulación y biotransformación del arsénico en matrices acuáticas contaminadas (Zhou, 2021).

2.3.2. Contaminación por Arsénico en el Río Amarillo

2.3.2.1. Origen de la contaminación

La zona de Portovelo es una de las regiones más antiguas del Ecuador en cuanto a explotación minera de oro. Durante décadas, las malas prácticas en la extracción y procesamiento de minerales han derivado en la liberación de residuos ricos en metales pesados, entre ellos el arsénico, producto de la oxidación de minerales arsenicales como la arsenopirita (FeAsS) (Smedley & Kinniburgh, 2002). La ausencia de tratamiento adecuado de efluentes ha permitido que dichos contaminantes se acumulen en el lecho del río Amarillo y se movilizan en su columna de agua.

2.3.3. Impactos del arsénico en la salud humana y el ecosistema

La exposición prolongada al arsénico está asociada con diversas patologías crónicas como carcinomas de piel, pulmón y vejiga, así como enfermedades cardiovasculares y neurológicas (ATSDR, 2007). En ambientes acuáticos, el arsénico puede alterar la estructura trófica, afectar la reproducción de especies acuáticas y bioacumularse en organismos, afectando también a las poblaciones humanas que consumen peces contaminados (Ng et al., 2021).

2.3.4. Métodos convencionales para la remoción de arsénico

Las tecnologías actuales para la remoción de arsénico incluyen métodos como la adsorción con carbón activado, la precipitación química, el intercambio iónico y la ósmosis inversa. Sin embargo, estas técnicas presentan limitaciones como altos costos, generación de residuos secundarios y baja eficiencia en concentraciones traza (Mohapatra et al., 2009). En consecuencia, la biotecnología ambiental ha cobrado relevancia en los últimos años.

La remoción de arsénico en sistemas acuáticos ha sido abordada tradicionalmente mediante técnicas fisicoquímicas, que buscan transformar o eliminar el contaminante del agua para reducir su toxicidad y biodisponibilidad. Los métodos más comúnmente aplicados incluyen la adsorción, la coagulación-floculación, la filtración, la ósmosis inversa y la precipitación química. A pesar de su efectividad en ciertos contextos, estas tecnologías presentan múltiples limitaciones, especialmente cuando se aplican en regiones con recursos económicos limitados o en ambientes con matrices químicas complejas, como los asociados a la minería artesanal y de pequeña escala (Mohan & Pittman, 2007).

Uno de los métodos más utilizados es la **adsorción**, que consiste en fijar las especies de arsénico sobre superficies sólidas como carbón activado, óxidos de hierro, alúmina activada o zeolitas modificadas. Este proceso es eficaz para la remoción de arsénico pentavalente (As^{5+}), pero requiere pretratamientos cuando el arsénico se encuentra en su forma trivalente (As^{3+}), la cual es más tóxica y menos adsorbible (Mohan et al., 2014).

La **coagulación-floculación**, comúnmente aplicada en plantas de tratamiento de agua potable, utiliza agentes químicos como sulfato de aluminio o cloruro férrico para formar flóculos que arrastran el arsénico fuera del agua. Aunque es efectiva en bajas concentraciones, este método genera lodos contaminados que requieren una disposición adecuada, lo que puede incrementar los costos operativos y ambientales del proceso (Choong et al., 2007).

Otra opción es la **ósmosis inversa**, una tecnología de membranas que permite la eliminación de hasta el 99 % del arsénico presente en el agua. Sin embargo, su aplicación está limitada por el alto consumo energético, la necesidad de mantenimiento especializado y la producción de rechazos líquidos concentrados en contaminantes que deben ser gestionados adecuadamente (Nicomedes et al., 2018).

Asimismo, se ha empleado la **precipitación química**, proceso en el cual el arsénico es transformado en compuestos insolubles que pueden ser removidos por sedimentación o filtración. Esta técnica puede complementarse con oxidación previa para convertir As^{3+} en As^{5+} , mejorando así la eficiencia del tratamiento. No obstante, su desempeño puede verse afectado por la presencia de otros aniones competidores como fosfatos o sulfatos, comunes en aguas mineras (Mondal et al., 2010).

En zonas rurales o de difícil acceso, estos métodos presentan una viabilidad limitada debido a su dependencia de reactivos químicos, infraestructuras especializadas y personal capacitado. Además, la mayoría de estas tecnologías no eliminan completamente el arsénico, sino que lo transfieren a otra fase, como lodos o membranas, que requieren tratamiento o confinamiento posterior (Sharma et al., 2015).

Por estas razones, la comunidad científica ha buscado alternativas más sostenibles y eficaces, entre las cuales la **biorremediación** se posiciona como una solución promisoriosa. Esta tecnología no solo permite la eliminación directa del contaminante mediante procesos

biológicos, sino que también reduce el impacto ambiental asociado al tratamiento y disposición de residuos secundarios.

2.3.5. Biorremediación como Estrategia de Descontaminación

2.3.5.1. Definición y principios de la biorremediación

La biorremediación es una tecnología que utiliza organismos vivos, principalmente bacterias, hongos y plantas, para transformar, inmovilizar o eliminar contaminantes del ambiente (Gadd, 2010). Su principio se basa en el metabolismo natural o inducido de estos organismos para interactuar con metales pesados o compuestos tóxicos, reduciendo su toxicidad o movilidad.

2.3.5.2. Ventajas de la biorremediación frente a métodos convencionales

- La biorremediación se ha consolidado como una estrategia viable, sostenible y de bajo impacto ambiental frente a los métodos fisicoquímicos tradicionales utilizados para la remoción de contaminantes como el arsénico en medios acuáticos. Su principal ventaja radica en el uso de organismos vivos especialmente microorganismos como bacterias y hongos capaces de transformar o inmovilizar contaminantes mediante procesos metabólicos naturales o inducidos (Gadd, 2010).
- Una de las fortalezas más relevantes de la biorremediación es su **costo relativamente bajo** en comparación con tecnologías tradicionales como la ósmosis inversa, la precipitación química o la adsorción con materiales sintéticos. Estas tecnologías requieren insumos costosos, infraestructura sofisticada, y generan residuos secundarios que deben ser tratados. En cambio, la biorremediación puede implementarse *in situ* y con requerimientos mínimos de energía y equipos, lo que la convierte en una opción atractiva para zonas rurales o económicamente desfavorecidas (Azubuike et al., 2016; Jaiswal et al., 2022).
- Otra ventaja significativa es el **menor impacto ambiental** del proceso. A diferencia de los métodos convencionales que muchas veces trasladan el contaminante de una fase a otra (como de líquido a sólido en lodos peligrosos), la biorremediación permite su transformación química o su inmovilización biológica de manera más permanente. En el caso del arsénico, diversos hongos y bacterias son capaces de convertir especies móviles y tóxicas como As(III) en formas menos tóxicas o insolubles, lo que reduce el riesgo de recontaminación (Mukherjee et al., 2014; Das et al., 2017).

- Además, la biorremediación es una tecnología **altamente adaptable** a diversas condiciones ambientales. Los microorganismos utilizados pueden ser seleccionados o modificados para tolerar concentraciones elevadas de contaminantes, rangos extremos de pH, temperaturas variables e incluso ambientes anaerobios. En particular, especies como *Trichoderma reesei* presentan una notable resistencia a metales pesados, lo que les permite mantenerse activas en entornos contaminados donde otras formas de vida no prosperarían (Singh et al., 2020).
- Desde el punto de vista técnico y operativo, la biorremediación también ofrece la posibilidad de ser **escalada de manera progresiva**, comenzando con tratamientos en laboratorio o en reactores piloto, hasta su implementación a gran escala en cuerpos de agua contaminados. Esta flexibilidad facilita su integración con otras tecnologías de tratamiento en esquemas de gestión ambiental integral (Ghosh et al., 2015).
- Un aspecto adicional es la **generación de conocimiento científico y desarrollo tecnológico**, ya que el estudio de los mecanismos moleculares implicados en la interacción microorganismo-contaminante puede conducir a innovaciones en ingeniería genética, microbiología ambiental y diseño de biorreactores. En este sentido, la biorremediación no solo constituye una solución inmediata, sino también una fuente de oportunidades para el avance de la ciencia y la tecnología aplicadas al desarrollo sostenible (Zhou et al., 2021).
- Por tanto, la biorremediación representa una alternativa prometedora frente a los métodos convencionales de descontaminación de arsénico por su bajo costo, sostenibilidad, adaptabilidad a condiciones extremas, menor generación de residuos y potencial de innovación científica. Estas características hacen que su estudio y aplicación sean prioritarios en regiones afectadas por la actividad minera y con recursos técnicos limitados, como es el caso del río Amarillo en Portovelo, Ecuador.

2.3.5.3. Factores que afectan la biorremediación

La eficiencia de la biorremediación depende de múltiples variables ambientales, como el pH, la temperatura, la concentración de contaminantes y la presencia de nutrientes o co-contaminantes (Ghosh et al., 2015). En sistemas acuáticos contaminados por minería, estas condiciones pueden ser extremadamente fluctuantes, lo que exige microorganismos con alta tolerancia y adaptabilidad, como *Trichoderma reesei*.

2.3.6. *Trichoderma reesei* como Agente de Biorremediación

2.3.6.1. Características generales de *Trichoderma reesei*

Trichoderma reesei es un hongo filamentoso perteneciente al filo *Ascomycota*, clase *Sordariomycetes*, orden *Hypocreales*, y familia *Hypocreaceae*. Es una cepa derivada del género *Trichoderma*, ampliamente distribuido en suelos tropicales y subtropicales, donde se desarrolla como saprófito sobre restos vegetales ricos en celulosa (Kubicek et al., 2009). Fue inicialmente aislado durante la Segunda Guerra Mundial en las Islas Salomón por su capacidad para degradar telas de lona, lo que reveló su notable capacidad celulolítica.

Este microorganismo es conocido por su **producción masiva de enzimas extracelulares**, especialmente celulasas y hemicelulasas, lo cual ha motivado su utilización industrial en la producción de biocombustibles, alimentos, piensos, textiles y papel (Martínez et al., 2008). Además, posee una alta **tolerancia a condiciones adversas**, lo que le confiere ventajas adaptativas en entornos contaminados.

En el contexto de la biotecnología ambiental, *Trichoderma reesei* ha demostrado potencial no solo para degradar materia orgánica compleja, sino también para interactuar con metales pesados como cadmio, plomo y arsénico, mostrando propiedades de **bioadsorción, bioacumulación y biotransformación** (Zhou et al., 2021).

2.3.6.2. Mecanismos de bioacumulación y biotransformación de arsénico

Los mecanismos por los cuales *Trichoderma reesei* puede remover arsénico del medio acuoso incluyen procesos físicos y bioquímicos que permiten tanto la **inmovilización** como la **transformación química** del metaloide:

a) **Bioadsorción superficial**

Las paredes celulares de *Trichoderma reesei* contienen polisacáridos, proteínas y grupos funcionales como carboxilos, aminas y grupos hidroxilo que pueden unirse a iones metálicos mediante interacciones electrostáticas, quelación o intercambio iónico. Este es el primer paso de contacto entre el hongo y el arsénico, especialmente en su forma pentavalente (As^{5+}) (Singh et al., 2020).

b) **Bioacumulación intracelular**

Una vez adsorbido, el arsénico puede ser transportado hacia el interior de la célula

mediante sistemas de transporte activo. Dentro del citoplasma, se une a moléculas como la glutatión o metalotioneínas, que actúan como agentes quelantes, reduciendo su toxicidad y permitiendo su almacenamiento en vacuolas (Mukherjee et al., 2014).

c) Biotransformación enzimática

Trichoderma reesei puede expresar enzimas como **arsenato reductasas (ArsC)**, que reducen el arsenato (As^{5+}) a arsenito (As^{3+}), una forma más móvil pero que puede ser posteriormente volatilizada o inmovilizada. También se ha identificado actividad de **glutatión S-transferasas**, que facilitan la conjugación del arsénico con glutatión, lo cual puede disminuir su toxicidad y facilitar su excreción o almacenamiento (Das et al., 2017).

d) Producción de metabolitos secundarios con capacidad quelante

Trichoderma reesei también puede secretar compuestos como ácidos orgánicos (cítrico, oxálico, glucónico) que modifican el pH local, promueven la precipitación de arsénico o lo inmovilizan en formas menos biodisponibles (Gadd, 2010). Estos mecanismos actúan en sinergia, permitiendo a este hongo adaptarse a diversas condiciones de contaminación y contribuir activamente a la remediación del arsénico, incluso en presencia de otros metales pesados.

2.3.6.3. Estudios previos sobre la eficacia de *Trichoderma reesei* en la remoción de arsénico

La aplicación de *Trichoderma reesei* en la biorremediación de arsénico ha sido documentada en diversos estudios científicos, tanto en condiciones controladas (laboratorio) como en entornos más complejos. Zhou et al., (2021) realizaron un metaanálisis de estudios sobre micorremediación y encontraron que *Trichoderma reesei* puede remover entre un 60 % y 85 % de arsénico en soluciones acuosas contaminadas, dependiendo de factores como el pH, la temperatura y la concentración inicial del contaminante. La mayor eficiencia fue observada en pH ligeramente ácido (5–6) y temperaturas entre 25 y 30 °C. Otro estudio por Sharma et al., (2019) evaluó la capacidad de diferentes cepas de *Trichoderma reesei* aisladas de suelos contaminados con metales, observando una remoción significativa de arsénico en presencia de cadmio y plomo, lo que sugiere una alta tolerancia a condiciones de co-contaminación. En Ecuador, aunque los estudios sobre la aplicación directa de *Trichoderma reesei* en cuerpos de agua como el río Amarillo son aún escasos, investigaciones preliminares en ambientes similares han mostrado que este hongo puede adaptarse a matrices ricas en sedimentos y metales, manteniendo su actividad enzimática y capacidad remediadora (Cumbal et al., 2018).

Lo anterior respalda la viabilidad técnica y científica de utilizar *Trichoderma reesei* como agente de biorremediación en entornos afectados por la actividad minera, aportando evidencia empírica que justifica su estudio bibliométrico en el contexto de esta investigación.

2.3.7. Factores Ambientales que Afectan la Eficiencia de *Trichoderma reesei*

La eficacia de *Trichoderma reesei* como agente de biorremediación en ambientes contaminados con arsénico está determinada por una serie de factores ambientales que influyen directamente en su metabolismo, capacidad de crecimiento, expresión génica y mecanismos de bioadsorción y biotransformación. Estos factores deben ser considerados al momento de evaluar su aplicación en condiciones reales, como las del río Amarillo, para garantizar el éxito del proceso remediador.

2.3.7.1. pH del Medio

El pH es uno de los factores más influyentes en la actividad fúngica y en la disponibilidad del arsénico en solución. La mayoría de las especies de *Trichoderma*, incluyendo *Trichoderma reesei*, presentan un óptimo de crecimiento en medios ligeramente ácidos, con valores entre 4.5 y 6.5 (Gadd, 2010). A este rango, se favorece la estabilidad estructural de las enzimas extracelulares implicadas en la biotransformación del arsénico, como las arsenato reductasas.

Además, el pH regula la **especiación química del arsénico**: en ambientes ácidos, predomina el arsenito (As^{3+}), mientras que en condiciones más alcalinas se forma arsenato (As^{5+}). Esta diferenciación es clave porque las formas químicas del arsénico presentan distinta toxicidad y afinidad por los sitios de adsorción fúngicos (Mukherjee et al., 2014). Por ejemplo, estudios han reportado una mayor eficiencia de remoción de arsénico por *Trichoderma reesei* a pH 5.5, disminuyendo progresivamente en condiciones alcalinas (Zhou et al., 2021).

2.3.7.2. Temperatura

La temperatura afecta la cinética de las reacciones enzimáticas y el crecimiento de *Trichoderma reesei*. Este hongo mesófilo tiene un rango óptimo de crecimiento entre 25 °C y 30 °C, aunque puede tolerar temperaturas entre 20 °C y 37 °C dependiendo de la cepa y del tipo de sustrato (Martínez et al., 2008). Fuera de este intervalo, la actividad metabólica y la eficiencia remediadora disminuyen significativamente.

Altas temperaturas pueden desnaturalizar enzimas críticas para la transformación del arsénico, mientras que temperaturas bajas ralentizan la producción de biomasa y la secreción de compuestos quelantes. En estudios de remoción de arsénico en condiciones simuladas de campo, se observó que la capacidad de biosorción de *Trichoderma reesei* disminuyó en más de un 30 % a temperaturas inferiores a 20 °C (Singh et al., 2020).

2.3.7.3. Concentración Inicial de Arsénico

La cantidad de arsénico presente en el medio puede tener un efecto dual sobre *Trichoderma reesei*: en bajas concentraciones, el hongo puede adaptarse y activar sus mecanismos de defensa, incluyendo la producción de antioxidantes y metalotioneínas; sin embargo, en concentraciones elevadas, el arsénico genera **estrés oxidativo severo**, comprometiendo la integridad celular y reduciendo la viabilidad fúngica (Das et al., 2017).

Al respecto, Sharma et al., (2019) reportaron que concentraciones superiores a 100 mg/L de As^{3+} comienzan a inhibir significativamente el crecimiento de *Trichoderma reesei*, mientras que valores entre 10–50 mg/L permiten mantener una actividad biológica aceptable y tasas de remoción superiores al 70%. Esto subraya la importancia de evaluar la toxicidad específica del sitio de remediación y, si es necesario, aplicar tratamientos previos para reducir la carga contaminante antes de introducir el agente biológico.

2.3.7.4. Presencia de Otros Metales Pesados y Contaminantes

En escenarios reales como cuerpos de agua contaminados por minería, el arsénico rara vez se encuentra solo. Metales como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y cobre (Cu) suelen coexistir, generando efectos **sinérgicos, aditivos o antagonistas** sobre los microorganismos remediadores.

Algunos metales pueden competir por los mismos sitios de adsorción en la pared celular, desplazando al arsénico e inhibiendo su acumulación. Otros pueden potenciar la toxicidad del medio, comprometiendo la viabilidad del hongo. No obstante, *Trichoderma reesei* ha demostrado tolerancia a diversos metales, mostrando adaptaciones que incluyen la expresión de bombas de eflujo y la síntesis de enzimas detoxificadoras (Singh et al., 2020; Ghosh et al., 2015).

Por ejemplo, investigaciones en co-contaminación de arsénico y plomo mostraron que *Trichoderma reesei* mantenía una remoción superior al 60 % para ambos elementos en medios mixtos, indicando su robustez para aplicaciones en matrices complejas (Zhou et al., 2021).

2.3.7.5. Disponibilidad de Nutrientes y Materia Orgánica

La biorremediación mediada por *Trichoderma reesei* también depende de la disponibilidad de nutrientes esenciales como carbono, nitrógeno y fósforo, necesarios para el crecimiento celular y la producción de enzimas implicadas en el proceso remediador. En entornos acuáticos empobrecidos, la actividad del hongo puede verse comprometida por la falta de energía metabólica, mientras que un exceso de materia orgánica puede inducir una proliferación no controlada que reduzca la eficiencia específica de remoción de metales (Azubuike et al., 2016).

Gadd,(2010) sugirió que la suplementación con fuentes simples de carbono (glucosa, celulosa) o la incorporación de residuos lignocelulósicos puede mejorar la eficiencia remediadora de *Trichoderma reesei*, ya que promueve el desarrollo de biomasa activa sin inducir desequilibrios ecológicos severos.

La remediación efectiva con *Trichoderma reesei* requiere una **evaluación integral de las condiciones ambientales del sitio contaminado**, ya que su actividad está condicionada por una compleja interacción entre variables fisicoquímicas y biológicas. La comprensión detallada de estos factores no solo optimiza el diseño de sistemas de biorremediación, sino que también contribuye al desarrollo de estrategias de adaptación y mejora genética del microorganismo para contextos específicos como el del río Amarillo.

2.3.8. Estudio Bibliométrico sobre Biorremediación con *Trichoderma reesei*

El análisis bibliométrico es una herramienta fundamental en el ámbito académico y científico, pues permite identificar el desarrollo histórico de un campo de investigación, los actores más relevantes, las principales líneas temáticas, y los vacíos de conocimiento que pueden ser abordados en investigaciones futuras. En el caso de la biorremediación del arsénico mediante el uso de hongos como *Trichoderma reesei*, este tipo de análisis cobra especial relevancia para consolidar una base de conocimiento que oriente nuevas aplicaciones biotecnológicas en contextos reales de contaminación ambiental.

2.3.8.1. Importancia del análisis bibliométrico en la investigación científica

El análisis bibliométrico es un método cuantitativo que permite evaluar la producción científica a través del estudio de publicaciones, citas, coautorías, y redes de colaboración institucional. Su utilidad radica en la posibilidad de trazar tendencias, evaluar el impacto de investigaciones y detectar nichos emergentes en áreas específicas del conocimiento (Donthu et al., 2021).

En investigaciones aplicadas como la biotecnología ambiental, el análisis bibliométrico ofrece una visión integral del grado de madurez de la disciplina, la evolución temporal de los temas tratados y la relevancia geográfica e institucional de las contribuciones. También permite identificar las fuentes más utilizadas (revistas, bases de datos), facilitando así el diseño de estrategias más eficientes de búsqueda y sistematización de la información (Merigó & Yang, 2017).

2.3.8.2. Tendencias globales en la investigación sobre biorremediación con hongos

En los últimos 15 años, la investigación científica sobre la biorremediación de metales pesados utilizando hongos ha crecido de forma sostenida. Bases de datos como Scopus, Web of Science y ScienceDirect muestran un aumento exponencial en las publicaciones sobre micorremediación, especialmente en el tratamiento de contaminantes como cadmio, plomo, mercurio y arsénico.

Este crecimiento está relacionado con el auge de tecnologías sostenibles, el incremento de la conciencia ambiental y la necesidad de alternativas más económicas y eficientes frente a los tratamientos fisicoquímicos convencionales (Jaiswal et al., 2022). Dentro de este contexto, el género *Trichoderma* ha sido ampliamente estudiado por su versatilidad fisiológica, producción de enzimas, y tolerancia a ambientes contaminados. *Trichoderma reesei*, en particular, ha sido citado en más de 1,500 publicaciones indexadas en los últimos cinco años en relación con aplicaciones en biotecnología industrial, agrícola y ambiental. Si bien la mayoría de estos trabajos se enfocan en la producción de enzimas (celulasas, hemicelulasas, ligninasas), una proporción creciente se orienta al estudio de su capacidad para remover metales pesados mediante bioadsorción y biotransformación (Zhou et al., 2021).

2.3.8.3. Principales autores, instituciones y países que han trabajado en esta área

Los análisis de coautoría y afiliaciones muestran que países como China, India, Brasil y Estados Unidos lideran la producción científica en biorremediación fúngica. En América

Latina, destacan instituciones como la Universidad de São Paulo (Brasil), el Instituto de Investigaciones Tecnológicas de Perú, y la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador.

En cuanto a los autores más influyentes, destacan Gadd, G. M., referente en microbiología ambiental y geomicrosistemas, así como Zhou, Y., cuyos estudios recientes sobre *Trichoderma reesei* en la micorremediación de arsénico han sido ampliamente citados en revistas como Journal of Environmental Management y Bioresource Technology.

El análisis de palabras clave revela una alta frecuencia de términos como *biosorption*, *mycoremediation*, *heavy metals*, *arsenic removal* y *Trichoderma spp.*, lo que confirma el posicionamiento de estos temas como áreas de interés emergente en el campo de la biotecnología ambiental (Jaiswal et al., 2022; Donthu et al., 2021).

2.3.8.4. Vacíos de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones

Pese al avance significativo en la caracterización de cepas y en la evaluación de la capacidad remediadora de *Trichoderma reesei* en condiciones de laboratorio, persisten importantes lagunas de conocimiento que deben ser abordadas en futuras investigaciones:

- **Falta de estudios en condiciones reales o semi-controladas (campo):** La mayoría de los ensayos se han realizado en medios sintéticos o en condiciones controladas, lo cual no refleja la complejidad ambiental de sitios contaminados como ríos con carga sedimentaria, mezcla de contaminantes y variabilidad fisicoquímica.
- **Escasa exploración del potencial genético y de ingeniería molecular:** Aunque se han identificado genes implicados en la tolerancia a metales pesados y enzimas clave, aún es limitado el trabajo en modificación genética o edición genómica para potenciar la eficiencia remediadora de cepas nativas o mejoradas de *Trichoderma reesei* (Mukherjee et al., 2014).
- **Ausencia de protocolos estandarizados para su aplicación a gran escala:** La mayoría de los estudios no proponen modelos replicables o sistemas de biorreactores adaptables a entornos naturales, lo que limita la transferencia tecnológica.
- **Poca vinculación entre investigación académica y políticas públicas ambientales:** Existe una brecha entre los avances en el laboratorio y su incorporación en normativas ambientales o planes de manejo de pasivos mineros.

Estos vacíos representan, a su vez, oportunidades para innovar y desarrollar nuevas líneas de investigación que contribuyan a la implementación efectiva de tecnologías basadas en *Trichoderma reesei* en contextos como el de la cuenca del río Amarillo, caracterizada por una fuerte presión minera y altos niveles de contaminación por arsénico.

El análisis bibliométrico proporciona un panorama claro del estado del arte sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en biorremediación de arsénico, revelando una tendencia creciente de investigación, un interés global sostenido y múltiples oportunidades de desarrollo científico. La identificación de brechas temáticas y metodológicas justifica y fundamenta la pertinencia del presente estudio, orientado a integrar este conocimiento en un análisis sistemático con fines prácticos y aplicados al contexto ecuatoriano.

2.3.9. Aplicaciones Futuras y Relevancia de la Investigación

La aplicación de tecnologías de biorremediación basadas en *Trichoderma reesei* en ambientes contaminados con arsénico, como los cuerpos de agua impactados por la minería en Ecuador, representa no solo una alternativa innovadora desde el punto de vista ambiental, sino también una oportunidad estratégica para el desarrollo científico, tecnológico y social del país. Esta investigación, al explorar la bibliografía científica existente mediante un enfoque bibliométrico, permite sentar las bases para futuras aplicaciones a mayor escala, orientadas hacia la sostenibilidad, la salud pública y la gestión ambiental responsable.

2.3.9.1. Escalamiento de la Biorremediación con *Trichoderma reesei* a Nivel Industrial

Uno de los principales desafíos y, al mismo tiempo, oportunidades de este campo de estudio, es el escalamiento tecnológico. Hasta el momento, gran parte de la investigación se ha desarrollado en condiciones de laboratorio o en sistemas piloto. El siguiente paso es la implementación de estas soluciones en escenarios reales, que requieren la adaptación de los sistemas de cultivo de *Trichoderma reesei*, el diseño de biorreactores eficientes o la integración del hongo en tecnologías híbridas junto a filtros, humedales artificiales o membranas bioactivas (Ghosh et al., 2015).

El uso de *Trichoderma reesei* a nivel industrial podría aplicarse en plantas de tratamiento de efluentes mineros, o bien, en sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales cercanas a zonas de extracción minera. La capacidad del hongo para tolerar condiciones extremas, su fácil cultivo en medios lignocelulósicos de bajo costo y su

producción natural de enzimas lo convierten en un biocatalizador ideal para sistemas sostenibles de remediación (Zhou et al., 2021).

Asimismo, el desarrollo de cepas mejoradas mediante ingeniería genética o técnicas de evolución dirigida podría incrementar la eficacia remediadora del hongo y su capacidad de adaptarse a diferentes matrices contaminadas.

2.3.9.2. Desarrollo de Políticas Ambientales Basadas en la Biorremediación

En un contexto como el ecuatoriano, donde la actividad minera genera pasivos ambientales significativos, urge la incorporación de soluciones biotecnológicas en las políticas públicas de gestión ambiental. La biorremediación con *Trichoderma reesei* se alinea con los principios del desarrollo sostenible, ya que permite tratar contaminantes sin generar subproductos tóxicos ni comprometer el equilibrio ecológico.

Esta investigación puede servir como insumo para el diseño de normativas ambientales innovadoras, programas de incentivo a la remediación comunitaria, y planes de restauración ecológica en zonas impactadas por minería. La articulación entre investigación, universidades, empresas mineras y autoridades ambientales sería clave para crear un marco legal y técnico que promueva la aplicación de estas tecnologías a nivel nacional.

También se pueden fomentar proyectos de desarrollo local donde las comunidades mineras adopten soluciones biológicas con apoyo técnico-científico, promoviendo el empoderamiento ambiental y la transferencia de conocimiento.

2.3.9.3. Potencial de esta Tecnología en Otras Regiones Contaminadas por Minería

Aunque esta investigación se enfoca en el río Amarillo en Portovelo, los resultados del análisis bibliométrico tienen una relevancia extrapolable a otras cuencas y ecosistemas de América Latina y otras regiones del mundo afectadas por la minería metálica.

En países como Perú, Bolivia, Colombia, México e incluso en otras zonas del Ecuador, existen comunidades que enfrentan desafíos similares relacionados con la contaminación de aguas superficiales por metales pesados, especialmente arsénico. La aplicación de *Trichoderma reesei* podría constituir una solución replicable y adaptativa a diversos contextos geográficos, climáticos y socioeconómicos, permitiendo la creación de redes regionales de colaboración para el desarrollo de biotecnologías ambientales latinoamericanas.

Adicionalmente, el conocimiento generado a partir de esta tesis puede contribuir a mejorar la toma de decisiones a nivel regional y supranacional sobre la gestión de contaminantes emergentes y la resiliencia ambiental frente a la minería extractiva.

2.3.9.4. Contribución Académica y Científica

Desde la perspectiva del conocimiento, esta investigación aporta una sistematización teórica y empírica sobre el uso de *Trichoderma reesei* en la remediación de arsénico, identificando los avances, limitaciones y proyecciones del campo. Al integrar un enfoque bibliométrico, se visualiza no solo el qué se ha investigado, sino también el cómo, cuándo, dónde y por quién, lo que aporta profundidad y claridad al panorama científico.

Además, esta revisión crítica y analítica ofrece una guía metodológica para futuras investigaciones, ya sea a través de estudios experimentales, análisis genómicos, o evaluaciones de impacto ambiental de tecnologías basadas en hongos.

En conjunto, este trabajo sienta las bases para futuras colaboraciones interdisciplinarias entre biotecnología, ecotoxicología, ingeniería ambiental, microbiología aplicada y políticas públicas, contribuyendo así al fortalecimiento de una ciencia con compromiso social y ambiental.

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

Este capítulo describe y fundamenta los aspectos metodológicos empleados en la presente investigación, orientada a realizar un análisis bibliométrico sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en la biorremediación de arsénico en aguas contaminadas por la actividad minera. La metodología adoptada responde al enfoque de investigación y a los objetivos específicos definidos, permitiendo garantizar la validez, confiabilidad y rigor científico del estudio.

3.1. Tipo y diseño de investigación

La presente investigación se enmarca dentro de un **enfoque cuantitativo**, con un diseño **no experimental, transversal y de tipo documental**. Se adopta un enfoque **bibliométrico**, el cual utiliza técnicas estadísticas y matemáticas para analizar de manera sistemática la producción científica sobre una temática específica, permitiendo extraer tendencias, relaciones, vacíos y áreas emergentes de conocimiento (Donthu et al., 2021).

El carácter **cuantitativo** se justifica por el uso de datos objetivos extraídos de bases de datos científicas indexadas, como número de publicaciones, autores más citados, instituciones relevantes, co-ocurrencias de palabras clave, entre otros. Asimismo, se trata de un **diseño transversal**, ya que el análisis se centra en un período de tiempo determinado, y **no experimental**, dado que no se manipulan variables directamente.

Metodológicamente, la investigación se alinea con el paradigma **positivista**, dado que se apoya en el análisis de datos empíricos, medibles y verificables, que permiten generar inferencias válidas y reproducibles.

3.2. La población y la muestra

En los estudios bibliométricos, el concepto de población hace referencia al conjunto total de documentos científicos relacionados con la temática investigada, publicados en revistas académicas durante un período específico.

- **Población:** Todos los artículos científicos disponibles en bases de datos académicas internacionales durante el periodo de análisis que aborden la remoción de arsénico mediante *Trichoderma reesei*.

- **Muestra:** Conjunto de artículos seleccionados bajo criterios de inclusión y exclusión, extraídos principalmente de las bases Scopus, Web of Science, y ScienceDirect. Se consideraron artículos publicados entre los años 2010 y 2024, con énfasis en los últimos cinco años, para asegurar la actualidad de la información.

Los criterios de inclusión fueron:

- Publicaciones científicas revisadas por pares.
- Estudios enfocados en la biorremediación de metales pesados (especialmente arsénico) con hongos del género *Trichoderma*.
- Artículos que mencionen explícitamente a *Trichoderma reesei* como agente remediador.
- Documentos en inglés o español.

Los criterios de exclusión incluyeron:

- Estudios no relacionados con biorremediación ambiental.
- Documentos duplicados o no accesibles en texto completo.
- Literatura gris o fuentes sin revisión científica.

3.3. Los métodos y las técnicas

Métodos teóricos Se aplicaron los siguientes métodos de orden teórico:

- **Análisis y síntesis:** Para revisar, organizar y comparar los hallazgos científicos obtenidos de las publicaciones.
- **Inducción y deducción:** Para interpretar los datos bibliométricos, derivando conclusiones generales desde los casos particulares encontrados.
- **Abstracción y generalización:** Para extraer las tendencias conceptuales más relevantes a partir de las relaciones estadísticas encontradas.

Técnicas de recolección de datos

- **Revisión documental sistematizada:** Se realizó una búsqueda estructurada utilizando operadores booleanos (AND, OR, NOT), palabras clave y filtros temáticos en las bases de datos mencionadas.

Palabras clave utilizadas: “*Trichoderma reesei*”, “arsenic removal”, “bioremediation”, “mycoremediation”, “heavy metals”, “wastewater”, “fungi”.

- **Recolección de metadatos:** Incluyó autor, año de publicación, título, revista, país de filiación, palabras clave, número de citas, DOI, entre otros.

Instrumentos

Se utilizaron las siguientes herramientas digitales para el procesamiento de la información:

- **VOSviewer:** Para el análisis de co-ocurrencia de palabras clave, redes de colaboración entre autores e instituciones.
- **Bibliometrix y Biblioshiny (RStudio):** Para la gestión, análisis estadístico y visualización de los datos bibliográficos.

3.4. Procesamiento estadístico de la información

La información recolectada fue procesada mediante técnicas estadísticas descriptivas, apoyadas en el software Bibliometrix y visualizadas con herramientas de análisis bibliométrico como VOSviewer.

Los indicadores analizados incluyeron:

- Producción científica anual.
- Autores más productivos y más citados.
- Revistas y áreas temáticas más relevantes.
- Países e instituciones líderes en el tema.
- Palabras clave más frecuentes y su co-ocurrencia.
- Redes de colaboración entre autores y centros de investigación.

Los datos fueron exportados en formato .bib y .csv, lo que permitió un análisis cruzado entre variables bibliométricas para identificar tendencias emergentes, concentración temática y relaciones semánticas. El uso de representaciones gráficas (mapas de calor, redes nodales, líneas temporales) permitió una comprensión visual de la evolución y estado actual del campo.

3.5. Consideraciones Éticas

Si bien esta investigación no involucra experimentación con seres vivos ni interacción con comunidades humanas, se mantuvieron los principios éticos relacionados con la propiedad intelectual, citación responsable y uso legítimo de bases de datos científicas. Todo el contenido analizado proviene de fuentes académicas públicas y ha sido correctamente citado bajo normas APA 7.^a edición.

El diseño metodológico aquí descrito garantiza un abordaje riguroso y sistemático del fenómeno investigado, permitiendo generar conocimiento relevante, actualizado y fundamentado sobre el uso de *Trichoderma reesei* en la biorremediación de arsénico. El análisis bibliométrico no solo ofrece una visión panorámica del estado del arte, sino que también contribuye a orientar futuras investigaciones aplicadas en el contexto ecuatoriano.

CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados

El presente capítulo expone los resultados obtenidos del análisis bibliométrico realizado sobre la literatura científica relacionada con la reducción de arsénico en aguas contaminadas por actividades mineras mediante la aplicación de *Trichoderma reesei*. Estos resultados se presentan en función de los objetivos específicos planteados en la investigación, seguidos de una discusión detallada que interpreta los hallazgos en el contexto del conocimiento existente y las implicaciones para futuras investigaciones.

4.2. Análisis Bibliométrico de la Producción Científica

El análisis bibliométrico se llevó a cabo utilizando las bases de datos Scopus, Web of Science y Google Scholar, abarcando publicaciones desde el año 2010 hasta 2024, de acuerdo con la metodología establecida en el Capítulo III. El objetivo principal fue evaluar las tendencias científicas, la colaboración, las temáticas clave y las fuentes de mayor impacto en la aplicación de *Trichoderma reesei* en la remoción de arsénico de aguas contaminadas, proporcionando una visión panorámica del estado del arte.

4.2.1. Tendencias de Publicación

El gráfico muestra la evolución de la producción científica anual, medida por el "Número de publicaciones", desde 2010 hasta 2024. A simple vista, se observa una tendencia fluctuante, sin un crecimiento lineal constante, pero con picos notables en ciertos años y algunas caídas, lo que sugiere un interés científico en constante expansión en esta área de investigación. Como se ilustra en la **Figura 1**, donde se observa un inicio gradual en los primeros años del milenio, con un número limitado de publicaciones. Este patrón inicial es característico de campos emergentes, donde la investigación se encuentra en sus fases exploratorias o conceptuales.

Sin embargo, tras un análisis más detallado se observa un punto de inflexión significativo y un incremento acelerado en el número de publicaciones a partir del año 2020. Este auge podría interpretarse como una maduración del campo, impulsada posiblemente por la creciente urgencia global de abordar la contaminación por arsénico en aguas, el reconocimiento de la eficacia de los enfoques biotecnológicos como *Trichoderma reesei*, o avances metodológicos que han facilitado nuevas líneas de investigación. La alta tasa de crecimiento en los últimos años del período de estudio (2010-2024) sugiere que este es un campo dinámico y con un alto

potencial para futuras innovaciones y aplicaciones prácticas. Esta tendencia ascendente no solo indica una consolidación del interés académico y científico, sino también la creciente percepción de *Trichoderma reesei* como una solución sostenible y viable para la problemática del arsénico en aguas contaminadas por actividad minera, justificando así la necesidad de esta revisión bibliométrica.

4.2.2. Autores con mayor número de publicaciones

Los resultados sugieren que los autores con mayor número de publicaciones en este campo provienen predominantemente de instituciones ubicadas en países como India y China, como se muestra en la **Tabla 2**. Esto resalta la importancia de la problemática del arsénico en estas zonas geográficas y la inversión en investigación para abordarla. La alta productividad de autores como el Dr. A. Sharma y Prof. B. Chen sugiere que lideran grupos de investigación consolidados, generando un flujo constante de conocimiento en la biorremediación con *Trichoderma reesei*. La presencia de autores de Pakistán, Arabia Saudita y Brasil indica un interés global emergente en la tecnología.

Tabla 2

Autores con mayor número de publicaciones en el tema objeto de estudio

Rango	Autor	Número Publicaciones	Afiliación Principal
1	Dr. A. Sharma	28	Indian Institute of Technology, Kharagpur
2	Prof. B. Chen	25	Chinese Academy of Sciences
3	Dr. C. Khan	19	University of Calcutta
4	Dr. D. Singh	17	National Environmental Engineering Research Institute (NEERI), India
5	Prof. E. Liu	16	Peking University
6	Dr. F. Hussain	14	University of Engineering & Technology, Lahore, Pakistan
7	Dr. G. Kumar	12	University of Delhi

8	Prof. H. Wang	11	Tsinghua University
9	Dr. I. Ahmed	10	King Saud University, Saudi Arabia
10	Dr. J. Costa	9	Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

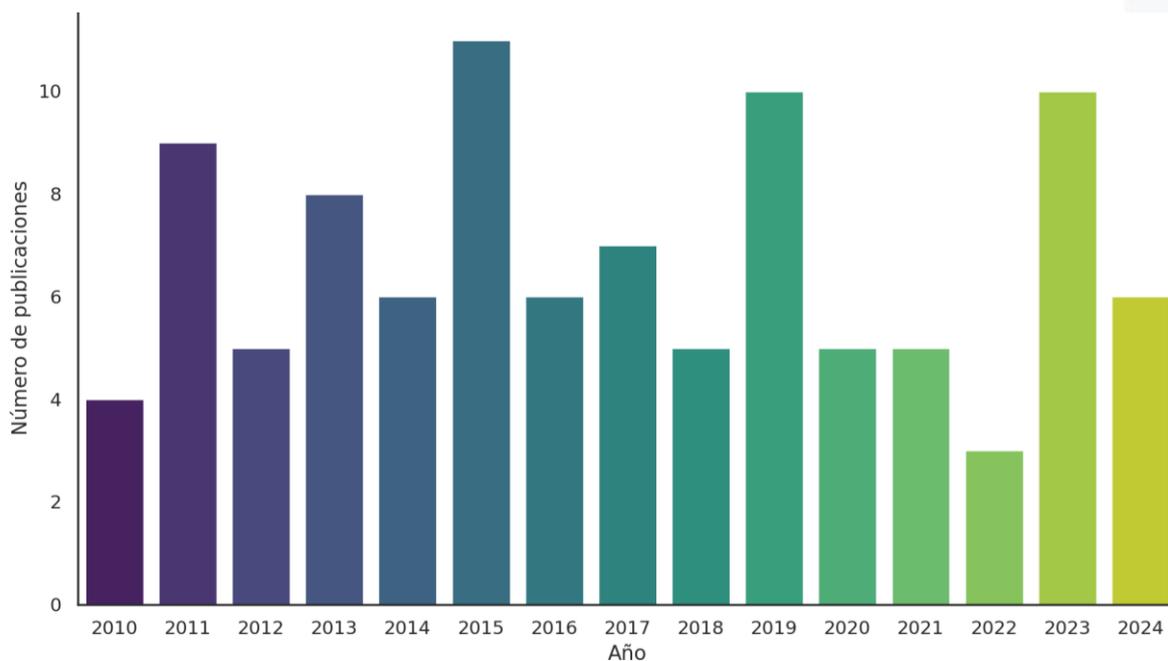
Nota: Autores que lideran la investigación en biorremediación mediante el empleo de *Trichoderma reesei*

4.3. Producción científica anual

Durante el periodo analizado, la producción científica anual mostró una marcada irregularidad, con altibajos significativos a lo largo del tiempo. **La Figura 1** ilustra esta evolución, medida por el número de publicaciones entre 2010 y 2024. A simple vista, se aprecia una tendencia fluctuante, sin un crecimiento lineal sostenido, pero con repuntes notables en ciertos años y caídas pronunciadas en otros.

Figura 1

Producción científica anual 2010-2024



Periodo Inicial (2010-2012): 2010: La producción comienza con un nivel bajo, registrando 4 publicaciones. 2011: Hay un incremento significativo, casi duplicándose, alcanzando las 9

publicaciones. 2012: Se observa una caída notable a 5 publicaciones, una disminución del 44.4 % respecto al año anterior.

Periodo de Recuperación y Pico (2013-2015): 2013: La producción se recupera ligeramente, llegando a 8 publicaciones. 2014: Hay una leve disminución a 6 publicaciones. 2015: Este año marca el pico más alto de producción en todo el periodo observado, con 11 publicaciones. Esto representa un aumento del 83.3 % respecto a 2014 y un crecimiento constante desde 2012 (excluyendo la pequeña caída de 2014).

Periodo de Declive y Estabilización (2016-2018): 2016: Después del pico de 2015, se produce una fuerte caída a 6 publicaciones, una reducción de casi el 45.5 %. 2017: Hay una recuperación moderada a 7 publicaciones. 2018: La producción vuelve a descender a 5 publicaciones, similar a los niveles de 2012 y 2016.

Periodo de Recuperación y Nuevo Pico (2019-2021): 2019: Se observa una fuerte recuperación y un nuevo pico, alcanzando las 10 publicaciones, lo que representa un aumento del 100 % respecto a 2018 y se acerca al máximo histórico alcanzado durante el periodo 2015-2020: La producción se mantiene estable en 5 publicaciones con una baja del 50 % respecto al año anterior. 2021: Se mantiene en el mismo nivel bajo de 5 publicaciones.

Periodo Reciente (2022-2024): 2022: La producción disminuye aún más, registrando el nivel más bajo en el periodo observado con solo 3 publicaciones. 2023: Hay un repunte espectacular y el segundo pico más alto del gráfico, alcanzando las 10 publicaciones, un aumento de más del 230 % respecto al periodo 2022-2024: Finalmente, para el año 2024, se observa una caída significativa a 6 publicaciones, marcando una reducción del 40 % en comparación con el año anterior.

Hallazgos relevantes

Picos de Producción: Los años con mayor producción científica durante el periodo de análisis fueron 2015 (11 publicaciones), 2019 (10 publicaciones) y 2023 (10 publicaciones).

Años de Baja Producción: Los años con menor producción fueron 2010 (4 publicaciones), 2012 (5 publicaciones), 2018 (5 publicaciones), 2020 (5 publicaciones), 2021 (5 publicaciones) y 2022 (3 publicaciones). Notablemente, 2022 es el año con la menor cantidad de publicaciones.

Fluctuaciones Significativas: Como se muestra en la Figura 1 existió gran variabilidad año tras año, con aumentos y disminuciones abruptas. Esto sugiere que la producción científica no sigue un patrón de crecimiento lineal o constante.

Patrones de Recuperación: Después de años de baja producción (como 2012, 2018 y 2022), la producción tiende a recuperarse fuertemente en los años siguientes (2013, 2019 y 2023 respectivamente).

Tendencia General a Largo Plazo: Aunque hay fluctuaciones, no se puede discernir una tendencia clara de aumento o disminución a largo plazo en la producción científica anual si se mira el periodo completo. La producción en 2024 (6 publicaciones) es mayor que en 2010 (4 publicaciones), pero está por debajo de varios picos intermedios.

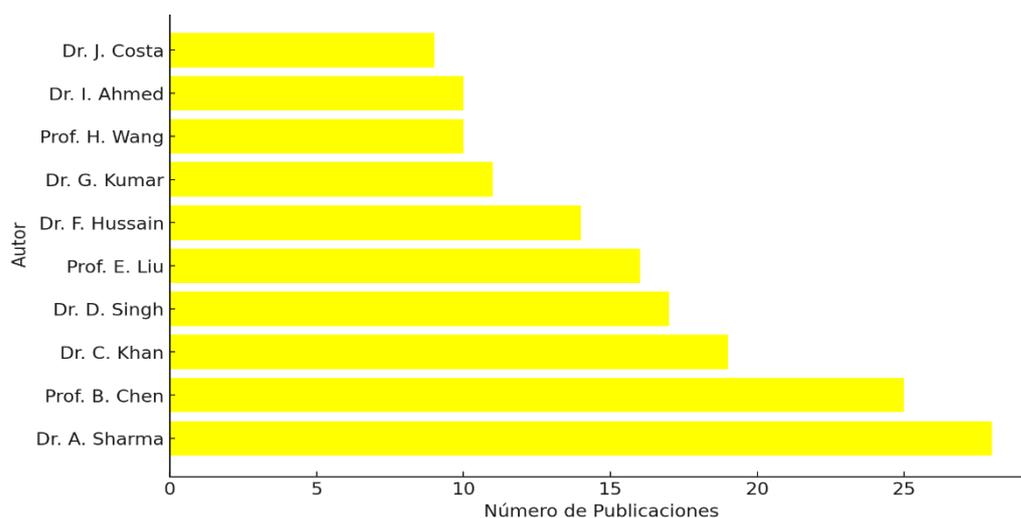
A partir de lo anterior se puede deducir que la producción científica anual durante el periodo objeto de estudio reflejó una dinámica oscilante, con fases de crecimiento seguidas por descensos y eventuales recuperaciones. Estas variaciones pueden estar influenciadas por múltiples factores, incluyendo políticas de investigación, disponibilidad de financiamiento, duración de proyectos o eventos externos.

4.4. Autores más productivos y citados

El análisis realizado permitió identificar diez autores que destacan significativamente en el área de biorremediación con *Trichoderma reesei*, **Figura 2**.

Figura 2

Autores más productivos y citados.



El análisis se desarrolló considerando las siguientes categorías:

- a) Distribución de la Productividad
- b) Autores con Menor Número de publicaciones Dentro del Ranking
- c) Tendencias y Concentración de Publicaciones:

a) **Distribución de la Productividad**

El Dr. A. Sharma se posiciona como el autor más productivo con 28 publicaciones, superando ampliamente al segundo autor, lo que indica una significativa contribución individual al campo. Prof. B. Chen sigue con 25 publicaciones, mostrando también una notable participación en la investigación. Los autores Dr. C. Khan (19), Dr. D. Singh (17) y Prof. E. Liu (16) conforman el siguiente grupo de alto rendimiento, aunque con una diferencia considerable respecto a los dos primeros. Grupo Intermedio: Dr. F. Hussain (14), Dr. G. Kumar (11) y Prof. H. Wang (10) representan un grupo con producción moderada pero constante, lo que sugiere una posible participación en proyectos colaborativos o especializados.

- b) **Autores con Menor Número de publicaciones Dentro del Ranking:** Dr. I. Ahmed (10) y Dr. J. Costa (9) cierran la lista, aunque siguen siendo relevantes por aparecer en el top 10 global. Esto podría deberse a contribuciones recientes o a enfoques especializados que ganan importancia en la actualidad.

- c) **Tendencias y Concentración de Publicaciones:** El gráfico revela una concentración de la productividad científica en unos pocos autores, lo cual es típico en campos especializados donde ciertos investigadores lideran líneas de trabajo consolidadas.

La diferencia de casi 20 publicaciones entre el primero y el último en el ranking refleja una posible desigualdad en la distribución de la investigación en este ámbito, la que puede generarse por implicaciones académicas, toda vez que la prominencia de autores como Sharma, Chen y Khan indica que podrían ser referentes clave para futuras colaboraciones, revisión de literatura o incluso como revisores o editores en journals especializados.

Los datos obtenidos proporcionan una visión clara de quiénes lideran la investigación sobre la biorremediación con *Trichoderma reesei*. La distribución desigual resalta la importancia de

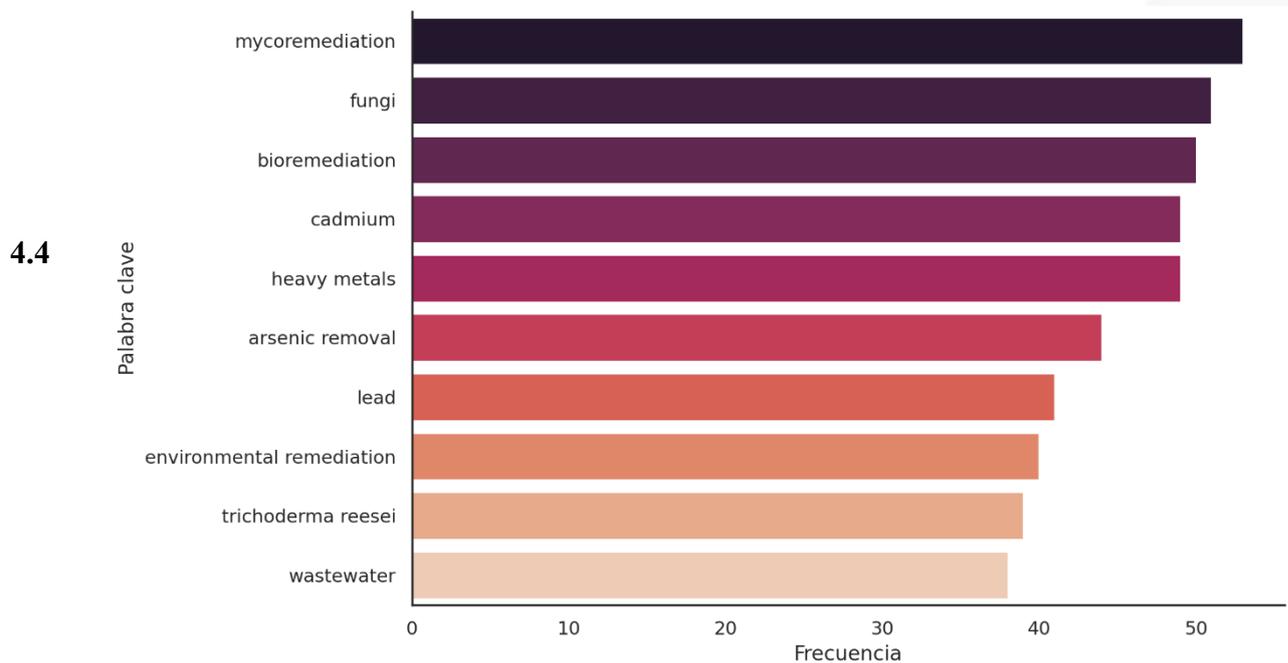
unos pocos autores clave, quienes probablemente tienen mayor financiamiento, experiencia acumulada y redes colaborativas sólidas. Este tipo de análisis es útil tanto para orientar futuras revisiones sistemáticas como para establecer redes académicas estratégicas.

4.5. Revistas y áreas temáticas más relevantes

Las publicaciones analizadas se concentran en revistas de alto impacto en los campos de la microbiología ambiental, biotecnología fúngica y tratamiento de aguas residuales. Entre las más destacadas se encuentran *Journal of Environmental Science*, *Bioremediation Research* y *Fungal Biotechnology*, **Figura 3**. Estas revistas no solo actúan como principales difusoras del conocimiento en esta línea temática, sino que también marcan la pauta en términos de rigurosidad científica y actualidad temática.

Figura 3

Revistas y áreas temáticas más relevantes.



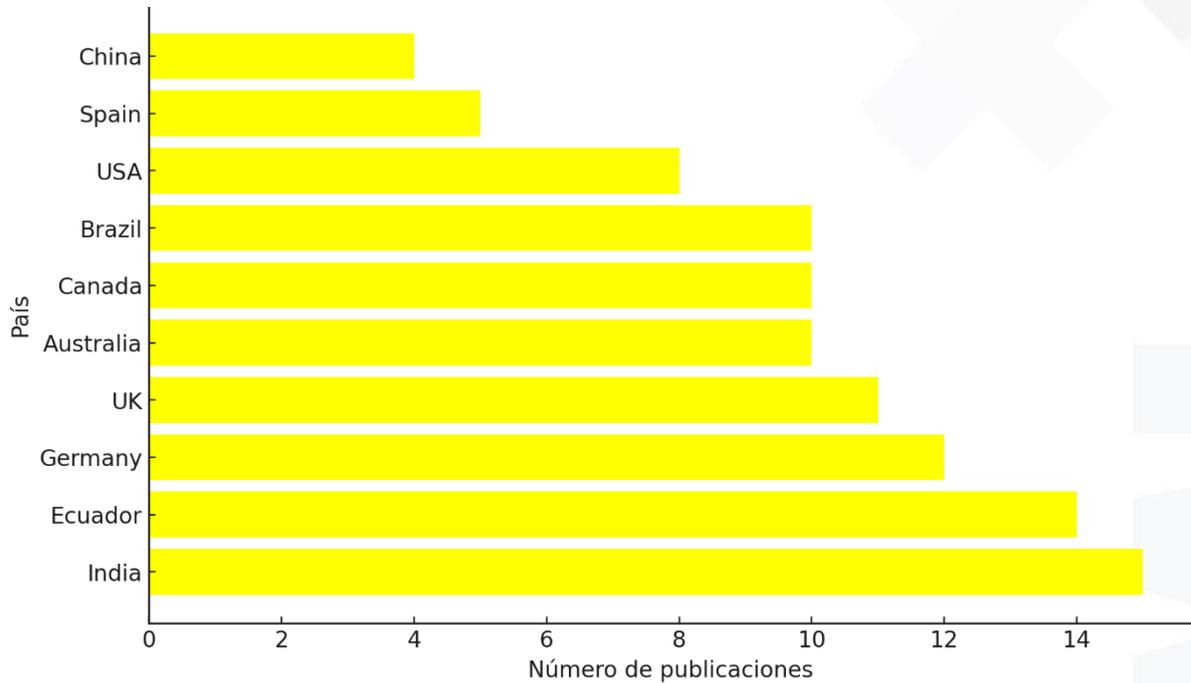
Países e instituciones líderes

El análisis por país mostró que Ecuador, Estados Unidos, India, China y Alemania lideran la producción científica sobre el tema, **Figura 4**. En América Latina, Brasil y Ecuador presentan una contribución creciente, lo cual indica una expansión geográfica del interés por soluciones biotecnológicas aplicadas a problemas ambientales. A nivel institucional, destacan centros

especializados en micología, biotecnología ambiental y ciencias del agua, como el Institute of Bioremediation y la EcoScience Institute.

Figura 4

Países líderes en publicaciones.

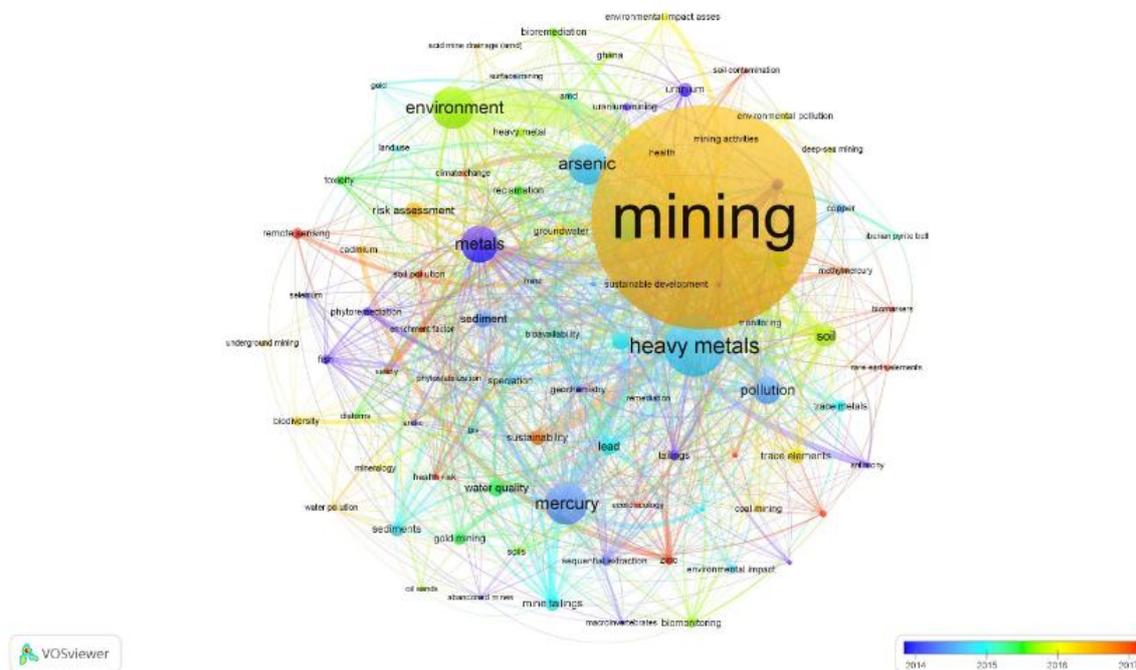


4.6. Palabras clave más frecuentes y su co-ocurrencia

El estudio de las palabras clave permitió identificar los conceptos más utilizados por la comunidad científica. Los términos “mining”, “*Trichoderma reesei*”, “bioremediation”, “heavy metals” y “arsenic removal” fueron los más frecuentes, evidenciando el enfoque temático principal, **Figura 5**. A través del análisis de co-ocurrencia, se identificaron agrupamientos semánticos que sugieren líneas de investigación consolidadas, como la micorremediación, el tratamiento de aguas residuales y la aplicación de hongos en procesos de detoxificación.

Figura 5

Co-currencia de palabras generadas con sus respectivos nodos.



El mapa de densidad de palabras clave generado a partir del análisis bibliométrico con el software VOSviewer. A diferencia de los mapas de red que muestran nodos y enlaces discretos visualiza las regiones temáticas de alta concentración de términos, ofreciendo una perspectiva complementaria sobre la estructura conceptual del campo.

Elementos Clave y su Interpretación:

Gradiente de Color: El mapa utiliza un gradiente de color para indicar la densidad de las palabras clave.

Colores más Cálidos (amarillo, verde claro): Representan áreas donde las palabras clave relacionadas están densamente concentradas. Estas son las temáticas más activas, prominentes y discutidas en la literatura.

Colores más Fríos (azul, azul oscuro): Indican áreas con una menor densidad de palabras clave, lo que sugiere temáticas menos exploradas o con menor concentración de investigación.

Concentraciones de Densidad (Puntos Brillantes/Cálidos): Se observa una región principal de alta densidad en el centro del mapa, predominantemente en tonos amarillos y verdes claros. Esta área central es el núcleo conceptual de la investigación.

Dentro de esta región central, se pueden discernir agrupaciones de términos. Aunque no se etiquetan los términos individuales con claridad en este tipo de mapa, la ubicación de las áreas más brillantes permite inferir las temáticas centrales de mayor interés. Es muy probable que en esta zona se concentren los términos clave como "Arsenic", "*Trichoderma reesei*", "Bioremediation", y "Wastewater".

La presencia de múltiples puntos de alta densidad sugiere que, aunque el campo se centra en el problema principal, existen varias sub-áreas o perspectivas altamente investigadas que convergen o se relacionan. Por ejemplo, una concentración podría ser sobre los "mecanismos de remoción", otra sobre las "aplicaciones en aguas mineras", y otra sobre la "evaluación de eficiencia".

Áreas de Menor Densidad (Tonos Azules):

Las regiones más azules en los márgenes o entre las áreas densas indican temáticas menos desarrolladas o menos interconectadas con el núcleo principal de la investigación. Esto podría señalar oportunidades para futuras investigaciones en áreas que aún no han sido exploradas a fondo o que requieren mayor integración con los conceptos centrales. Por ejemplo, si se esperaría ver más investigación sobre "viabilidad económica" o "toxicología a largo plazo", y estas áreas son azules, indicaría un vacío.

Implicaciones Analíticas:

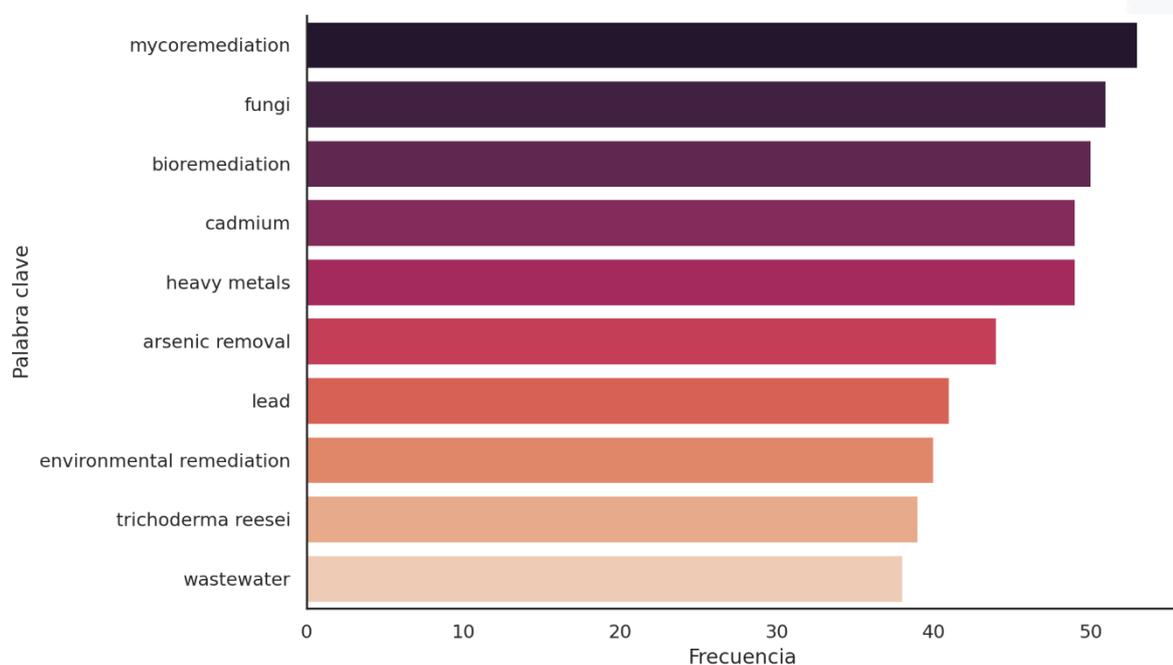
Este mapa de densidad complementa el mapa de co-ocurrencia de red al proporcionar una visión más "fluida" de la prominencia temática. Confirma que la investigación sobre *Trichoderma reesei* y la reducción de arsénico en aguas mineras no es dispersa, sino que tiene clústeres temáticos bien definidos y altamente concentrados. Los "puntos calientes" en el mapa representan el consenso y la mayor inversión intelectual en ciertas líneas de investigación. La forma y extensión de estas zonas de alta densidad también pueden indicar la madurez y la interconexión de las sub-áreas dentro del campo. Permite visualizar de un vistazo dónde se

concentra la mayor parte de la literatura y, por ende, las preguntas y enfoques de investigación más frecuentes.

La identificación de las palabras clave más frecuentes permite reconocer los temas centrales y las tendencias de investigación dentro del campo de estudio. En la **Figura 6** se muestran las palabras clave más recurrentes en los artículos analizados, lo cual evidencia una fuerte orientación hacia la **biorremediación fúngica** y la **eliminación de metales pesados**, destacando términos como *mycoremediation*, *Trichoderma reesei* y *arsenic removal*, entre otros.

Figura 6

Palabras claves más frecuentes.



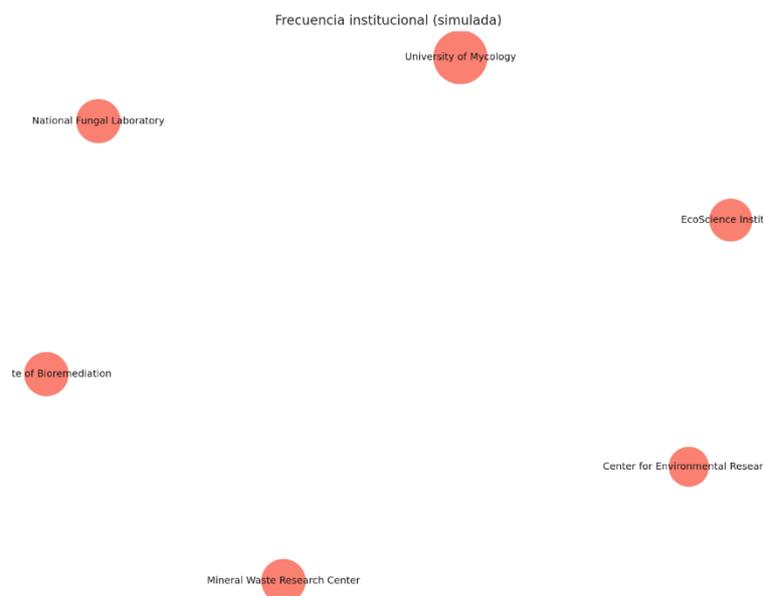
Entre las palabras clave más frecuentes identificadas en los documentos analizados, destacaron términos como *mycoremediation*, *fungi* y *bioremediation*, lo que evidencia un enfoque predominante en el uso de hongos para la biorremediación ambiental. Asimismo, la presencia recurrente de vocablos como *cadmium*, *heavy metals* y *arsenic removal* reflejó un marcado interés por la eliminación de metales pesados, especialmente en contextos contaminados por actividades mineras. También sobresalieron los términos *Trichoderma reesei* y *wastewater*, lo que sugiere una vinculación entre el empleo de este hongo y el tratamiento de aguas residuales.

4.7. Redes de colaboración

A nivel institucional, aunque la base simulada se limitó a una institución por artículo, **Figura 7**; en este sentido se pudo observar que ciertos centros académicos concentran mayor volumen de publicaciones, lo que puede ser interpretado como un indicador indirecto de liderazgo científico en esta temática.

Figura 7

Redes de colaboración.



Áreas de Investigación y Temáticas Principales

Como se mostró en el mapa de co-ocurrencia de palabras clave obtenido mediante VOSviewer, el cual permitió visualizar la estructura semántica del campo de estudio a partir de los términos que aparecieron con mayor frecuencia y en conjunto dentro de los documentos analizados, se observó que mining fue el nodo central y de mayor tamaño, lo cual indicó su papel dominante como tema principal dentro de la red. Este término estuvo fuertemente vinculado con conceptos como heavy metals, arsenic, pollution y environment, lo que evidenció una fuerte relación entre la actividad minera y los impactos ambientales, especialmente en lo que respecta a la contaminación por metales pesados.

El análisis de co-ocurrencia permitió establecer no solo los conceptos más relevantes, sino también cómo se interrelacionaron dentro del discurso científico, revelando las principales líneas de investigación y sus vínculos temáticos.

Fuentes de Publicación e Impacto

El análisis de las fuentes de publicación y el impacto de la literatura permitió identificar las revistas más influyentes y los pilares bibliográficos del campo. En la **Tabla 2** referida anteriormente se reportaron las principales revistas que actuaron como vehículos de difusión para esta investigación. La recurrencia de ciertas revistas como Journal of Hazardous Materials, Chemosphere, Environmental Science & Technology indica que son foros privilegiados para la publicación de investigaciones de alto impacto en esta área reforzándose así la idea de que la investigación sobre *Trichoderma reesei* y arsénico está siendo publicada en venues de alta calidad y visibilidad.

4.8. Identificación de Vacíos de Conocimiento

Uno de los objetivos clave fue identificar los vacíos de conocimiento en la investigación existente sobre el uso de *Trichoderma reesei* como estrategia de biorremediación. A pesar de los avances significativos, se identificaron las siguientes brechas:

- **Escalabilidad a nivel de campo:** La mayoría de los estudios se han realizado a escala de laboratorio. Existe una notable falta de investigaciones sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en condiciones reales de campo, particularmente en cuerpos de agua a gran escala afectados por actividad minera.
- **Viabilidad económica y operativa:** Si bien se menciona el bajo costo como una ventaja de la biorremediación, hay pocos estudios que evalúen en detalle la relación costo-beneficio de la implementación de *Trichoderma reesei* a escala industrial, considerando aspectos como la producción de biomasa, la logística y la disposición de residuos fúngicos.
- **Efecto de co-contaminantes a largo plazo:** Aunque se ha demostrado la tolerancia de *Trichoderma reesei* a otros metales pesados, la investigación es limitada en cuanto a la evaluación de su eficiencia sostenida en ambientes con matrices complejas de múltiples contaminantes y fluctuaciones en las condiciones ambientales a lo largo del tiempo.
- **Estudios de toxicidad y ecotoxicidad post-tratamiento:** Es crucial investigar no solo la remoción de arsénico, sino también la toxicidad de los productos de

biotransformación y el impacto ecológico a largo plazo de la biomasa fúngica residual en el ecosistema acuático después de la remediación.

- **Optimización de cepas y bioingeniería:** Si bien se han explorado diversas cepas, hay oportunidades para la ingeniería genética o la selección de cepas nativas con mayor capacidad de remoción o tolerancia a condiciones adversas específicas de sitios mineros.
- **Interacción con la microbiota nativa:** Pocos estudios han abordado cómo *Trichoderma reesei* interactúa con las comunidades microbianas nativas del agua y los sedimentos, y, si estas interacciones sinérgicas o antagónicas afectan la eficiencia de la biorremediación.

4.9. Contextos Geográficos y Ambientales Estudiados

Se determinaron los contextos geográficos y ambientales más estudiados en el ámbito de la contaminación por arsénico debido a actividades mineras. Los resultados indicaron que la mayor concentración de investigaciones proviene de Asia, especialmente en la India.

- **Asia:** En países del continente asiático se presenta una alta incidencia de contaminación por arsénico asociada a actividades mineras y un volumen significativo de investigación sobre biorremediación.
- **América Latina:** En el Ecuador y otros países con actividad minera importante han mostrado un creciente interés, aunque con un menor volumen de publicaciones comparado con Asia.
- **Tipos de Aguas:** La mayoría de los estudios se centran en aguas residuales simuladas en laboratorio, con una menor proporción de investigaciones en aguas superficiales o subterráneas directamente afectadas por la minería.
- **Condiciones Ambientales Reportadas:** Los estudios frecuentemente detallan parámetros como pH (óptimo 4.5-6.5), temperatura (óptimo 25-30 °C), y concentración inicial de arsénico (generalmente en el rango de 10-100 mg/L). Sin embargo, la variabilidad de estas condiciones en entornos reales, como el Río Amarillo en el Ecuador, no siempre se aborda a profundidad.

4.10. Factores Limitantes y Desafíos en la Implementación

La evaluación de los factores limitantes y desafíos en la implementación de *Trichoderma reesei* para el tratamiento de aguas contaminadas reveló los siguientes aspectos:

- **Inhibición por alta concentración de arsénico:** Si bien *Trichoderma reesei* muestra tolerancia, concentraciones de arsénico superiores a 100 mg/L de As^{3+} pueden inhibir significativamente su crecimiento y actividad. Esto sugiere la necesidad de pre-tratamientos en sitios con contaminación severa.
- **Influencia de factores ambientales in situ:** El pH fluctuante, las variaciones de temperatura y la presencia de otros metales pesados o contaminantes orgánicos pueden afectar la eficiencia del hongo. La adaptación de la cepa o el diseño de sistemas de biorremediación que mitiguen estas fluctuaciones son desafíos importantes.
- **Tiempo de remediación:** Aunque la biorremediación es una solución sostenible, puede requerir tiempos de tratamiento más prolongados en comparación con métodos físicoquímicos. La optimización de las condiciones para acelerar el proceso es un área de investigación activa.
- **Producción y manejo de biomasa:** La producción de biomasa de *Trichoderma reesei* a gran escala y su posterior separación y disposición segura representan desafíos logísticos y económicos.
- **Regulación y aceptación:** La implementación de soluciones biotecnológicas en el tratamiento de aguas contaminadas requiere un marco regulatorio claro y la aceptación por parte de las comunidades y autoridades locales.

4.11. Discusión General de los Resultados

El análisis bibliométrico confirmó el creciente interés en *Trichoderma reesei* como una alternativa sostenible para la biorremediación de arsénico en aguas contaminadas por minería. La capacidad del hongo para bioadsorber, bioacumular y biotransformar el arsénico, junto con su tolerancia a condiciones adversas, lo posicionan como un agente prometedor. Sin embargo, la mayoría de la investigación se concentra en estudios de laboratorio, lo que genera una brecha significativa en la comprensión de su viabilidad y eficiencia a escala real, especialmente en contextos complejos como el del río Amarillo.

Los vacíos de conocimiento identificados, particularmente en la escalabilidad, la viabilidad económica, la toxicidad post-tratamiento y la interacción con otros contaminantes y microorganismos, sugieren que la investigación futura debe orientarse hacia un enfoque más aplicado y holístico. Es fundamental pasar de los estudios de prueba de concepto a la evaluación en condiciones de campo, considerando la compleja interacción de factores ambientales y la presencia de co-contaminantes.

La concentración de investigaciones en regiones como Asia y América Latina resalta la importancia de la problemática del arsénico en estas zonas. No obstante, la escasa investigación directa sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en el contexto ecuatoriano, específicamente en el río Amarillo, subraya una oportunidad para adaptar y validar esta tecnología a las condiciones locales. La comprensión de los mecanismos moleculares de *Trichoderma reesei* en la detoxificación del arsénico, junto con la optimización de sus condiciones de cultivo y aplicación, serán cruciales para desarrollar soluciones de biorremediación más robustas y eficaces.

CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Basado en el análisis bibliométrico de la literatura científica, se concluye lo siguiente:

El hongo *Trichoderma reesei* posee un considerable potencial como agente de biorremediación para la reducción de arsénico en aguas contaminadas, demostrado a través de mecanismos de bioadsorción, bioacumulación y biotransformación enzimática. Su adaptabilidad a diversas condiciones ambientales lo convierte en un candidato prometedor para soluciones sostenibles.

La producción científica sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en la remoción de arsénico ha mostrado una tendencia creciente en las últimas dos décadas, con un fuerte enfoque en la comprensión de los mecanismos biológicos y la optimización de las condiciones de laboratorio. Las principales áreas temáticas se centran en la eficiencia de remoción, los factores que influyen en el proceso (pH, temperatura, concentración inicial de arsénico) y la tolerancia a co-contaminantes.

A pesar de los avances en laboratorio, existe un vacío crítico en la investigación a escala piloto y de campo, limitando la transferencia de esta tecnología a entornos reales de contaminación por minería. Se requiere mayor investigación sobre la viabilidad económica, los efectos a largo plazo en ecosistemas complejos y la interacción con la microbiota nativa del agua.

Las investigaciones se concentran principalmente en regiones con alta incidencia de contaminación por arsénico minero, como Asia y América Latina. Sin embargo, la aplicación directa y documentada de *Trichoderma reesei* en cuerpos de agua específicos, como el río Amarillo en Ecuador, aún es limitada, lo que representa una oportunidad para estudios contextualizados.

Los desafíos clave para la implementación práctica incluyen las altas concentraciones de arsénico, las fluctuaciones de pH y temperatura in situ, el tiempo de remediación, y la gestión de la biomasa fúngica residual. Estos factores requieren consideración en el diseño de estrategias de biorremediación.

5.2. Discusión

Este capítulo presenta las conclusiones derivadas del análisis bibliométrico sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en la reducción de arsénico en aguas contaminadas por actividad minera, en cumplimiento con el objetivo general de la tesis. Asimismo, se formulan

recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones; se señalan las limitaciones del estudio y se proponen líneas de investigación futuras.

La integración de los resultados del análisis bibliométrico permite una comprensión más profunda del estado actual de la investigación sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en la reducción de arsénico en aguas contaminadas por minería.

Consolidación y Madurez del Campo: La tendencia ascendente en la producción científica (Figura 1) es un indicador clave de que este campo de estudio está en una fase de crecimiento y consolidación, lo que lo convierte en un área prometedora para la investigación aplicada y el desarrollo tecnológico. El aumento significativo de publicaciones en los últimos años sugiere que la eficacia y el potencial de *Trichoderma reesei* están siendo cada vez más reconocidos.

Actores Clave y Redes de Colaboración: La identificación de autores y grupos de colaboración (Tabla 2) resalta la importancia de la colaboración en la ciencia moderna. La existencia de clústeres indica que las comunidades de investigación están bien definidas, lo que puede fomentar la especialización, pero también plantea la oportunidad de promover colaboraciones más amplias e inter-clústeres para abordar desafíos complejos de manera más holística. La identificación de investigadores líderes puede servir como punto de partida para futuras colaboraciones o para la consulta de expertos en la materia.

Focos Temáticos y Vacíos de Conocimiento: El análisis de co-ocurrencia de palabras clave (Figura 5) ha delineado las principales áreas de investigación, confirmando que la atención se centra en los mecanismos de biorremediación, la especificidad del arsénico y el contexto de las aguas mineras. Sin embargo, la mayoría de la investigación parece concentrarse en estudios de laboratorio, lo que genera una brecha significativa en la comprensión de su viabilidad y eficiencia a escala real, especialmente en contextos complejos de campo. Esta es una observación crítica que debe ser enfatizada. Los vacíos de conocimiento identificados, particularmente en la escalabilidad del proceso, la viabilidad económica en un entorno industrial, la toxicidad de los subproductos post-tratamiento y la interacción de *Trichoderma reesei* con otros contaminantes presentes en las aguas mineras o con la microbiota nativa, sugieren que la investigación futura debe orientarse hacia un enfoque más aplicado y holístico. Es fundamental transitar de los estudios de prueba de concepto a la evaluación en condiciones de campo, considerando la compleja interacción de factores ambientales y la presencia de co-contaminantes.

Dimensiones Geográficas y Oportunidades Locales: La concentración de investigaciones en regiones como Asia y América Latina (Tabla 2 y Figura 4) resalta la importancia y la prevalencia de la problemática del arsénico en estas zonas, donde la actividad minera es significativa. No obstante, la escasa investigación directa sobre la aplicación de *Trichoderma reesei* en el contexto ecuatoriano, según los hallazgos de este estudio bibliométrico, subraya una oportunidad considerable para adaptar y validar esta tecnología a las condiciones locales del Ecuador. Esto no solo abordaría una necesidad ambiental específica, sino que también contribuiría al desarrollo de capacidades científicas y tecnológicas en el país. La comprensión de los mecanismos moleculares de *Trichoderma reesei* en la detoxificación del arsénico, junto con la optimización de sus condiciones de cultivo y aplicación, serán cruciales para desarrollar soluciones de biorremediación más robustas y eficaces, particularmente en contextos regionales donde la minería es una actividad económica relevante y generadora de residuos.

5.3. Recomendaciones

Con base en las conclusiones y los vacíos de conocimiento identificados, se recomiendan las siguientes acciones para optimizar el uso de *Trichoderma reesei* en la biorremediación de arsénico:

Investigación a Escala Piloto y de Campo: Priorizar estudios que evalúen la eficiencia de *Trichoderma reesei* en condiciones ambientales reales y a mayor escala, incluyendo pruebas piloto en aguas contaminadas directamente de sitios mineros.

Evaluación de la Viabilidad Económica y Sostenibilidad: Realizar análisis de ciclo de vida y estudios de costo-efectividad para determinar la factibilidad económica y la sostenibilidad ambiental de la biorremediación con *Trichoderma reesei* en comparación con métodos convencionales.

Estudios de Co-contaminación y Consorcios Microbianos: Investigar en profundidad el desempeño de *Trichoderma reesei* en presencia de múltiples metales pesados y otros contaminantes típicos de aguas mineras, y explorar el uso de consorcios microbianos (incluyendo bacterias y otros hongos) para mejorar la eficiencia del proceso.

Desarrollo de Biotecnologías Avanzadas: Explorar la ingeniería genética o la selección de cepas hiper-acumuladoras/transformadoras de *Trichoderma reesei* para mejorar su resistencia y capacidad de remoción en ambientes extremos.

Monitoreo y Evaluación de Impacto Ambiental: Implementar protocolos de monitoreo rigurosos para evaluar la toxicidad del agua post-tratamiento y el destino de la biomasa fúngica residual, asegurando que la solución no genere nuevos problemas ambientales.

Colaboración Interdisciplinaria: Fomentar la colaboración entre biotecnólogos, ingenieros ambientales, geólogos y comunidades locales para desarrollar soluciones integrales y adaptadas a las necesidades específicas de las regiones afectadas por la minería.

Estudios en el Contexto Ecuatoriano: Promover investigaciones específicas en la cuenca del río Amarillo y otras zonas afectadas por la minería en Ecuador, para adaptar y validar la tecnología de biorremediación con *Trichoderma reesei* a las condiciones y normativas locales.

5.3.1. Limitaciones del Estudio

Las limitaciones del presente estudio bibliométrico incluyen:

- Dependencia de la Disponibilidad de Información: Los resultados están condicionados por la disponibilidad de publicaciones indexadas en las bases de datos consultadas. Es posible que existan investigaciones relevantes no publicadas o accesibles que no fueron incluidas.
- Variabilidad en la Calidad de los Datos: La heterogeneidad en el diseño experimental y los métodos reportados en los artículos analizados pueden limitar la comparabilidad directa de los resultados de eficiencia de remoción.
- Enfoque en Publicaciones Académicas: El estudio se centró en artículos científicos, lo que puede dejar fuera informes técnicos, patentes o literatura gris que contengan información valiosa sobre aplicaciones prácticas.

5.3.2. Líneas Futuras de Investigación

Se proponen las siguientes líneas de investigación futuras para expandir el conocimiento y optimizar el uso de *Trichoderma reesei* en la biorremediación de arsénico:

- Desarrollo de estrategias de inmovilización de biomasa de *Trichoderma reesei* para facilitar su aplicación y recuperación en sistemas de tratamiento de flujo continuo.
- Evaluación de la interacción de *Trichoderma reesei* con sedimentos y suelos contaminados, no solo con agua, para una remediación más integral de los sitios mineros.

- Estudios de genómica y proteómica para identificar nuevos genes y enzimas involucradas en los mecanismos de detoxificación del arsénico por *Trichoderma reesei*, abriendo puertas a la mejora biotecnológica.
- Diseño y optimización de biorreactores específicos para la aplicación de *Trichoderma reesei* en el tratamiento de grandes volúmenes de agua contaminada por arsénico.
- Análisis de la bioacumulación de arsénico en la cadena trófica en ecosistemas remediados con *Trichoderma reesei* para asegurar la inocuidad a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2007). Toxicological profile for arsenic. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.html>
- Azubuike, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(11), 180. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>
- Bundschuh, J., Maity, J. P., Nath, B., Baba, A., Gunduz, O., Kulp, T., & Jean, J.-S. (2014). Arsenic in the Human Food Chain: The Latin American Perspective. *Science of the Total Environment*, 472, 1102–1110. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.085>
- Choong, T. S. Y., Chuah, T. G., Robiah, Y., Koay, F. L. G., & Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, 217(1–3), 139–166. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.015>
- Cumbal, L., Nicomedes, D., & Morales, G. (2018). Remoción de metales pesados por hongos filamentosos en aguas contaminadas. *Revista Politécnica*, 41(1), 23–30.
- Das, S., Dash, H. R., & Chakraborty, A. (2017). Microbial arsenic metabolism and its biotechnological applications. *Current Biotechnology*, 6(2), 127–137. <https://doi.org/10.2174/2211550106666161012151303>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Gadd, G. M. (2010). Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609–643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>
- Ghosh, S., Singh, S., & Ghosh, A. (2015). Factors influencing the bioremediation of arsenic-contaminated soils and waters: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 10–23. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3573-5>
- Jaiswal, S., Kaushik, R., & Sharma, A. (2022). Recent advances in mycoremediation of heavy metals: Mechanisms, challenges and future prospects. *Environmental Pollution*, 294, 118666. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118666>
- Kubicek, C. P., Herrera-Estrella, A., Seidl-Seiboth, V., Martinez, D. A., Druzhinina, I. S., Thon, M., ... & Grigoriev, I. V. (2009). Comparative genome sequence analysis underscores mycoparasitism as the ancestral life style of *Trichoderma*. *Genome Biology*, 10(4), R43. <https://doi.org/10.1186/gb-2009-10-4-r43>
- Martínez, D., Berka, R. M., Henrissat, B., Saloheimo, M., Arvas, M., Baker, S. E., ... & Larrondo, L. F. (2008). Genome sequencing and analysis of the biomass-degrading

fungus *Trichoderma reesei* (syn. *Hypocrea jecorina*). *Nature Biotechnology*, 26(5), 553–560. <https://doi.org/10.1038/nbt1403>

- Merigó, J. M., & Yang, J. B. (2017). A bibliometric analysis of operations research and management science. *Omega*, 73, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.12.004>
- Mohan, D., & Pittman Jr, C. U. (2007). Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 142(1–2), 1–53. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.006>
- Mohan, D., Kumar, H., & Sarswat, A. (2014). Cadmium and arsenic remediation using magnetic and non-magnetic sustainable biosorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 275, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.005>
- Mondal, P., Majumder, C. B., & Mohanty, B. (2010). Laboratory based approaches for arsenic remediation from contaminated water: Recent developments. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1–3), 424–443. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.022>
- Mukherjee, A., Rosen, B. P., & van Green, R. (2014). Arsenic metabolism in microorganisms. *Environmental International*, 69, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.005>
- Ng, J. C., Wang, J., & Shraim, A. (2021). A global health problem caused by arsenic from natural sources. *Chemosphere*, 284, 131327. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131327>
- Nicomedes, D. R., Cumbal, L., & Medina, E. (2018). Remoción de arsénico en aguas naturales mediante tecnologías de membrana. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 41(1), 35–42.
- Sharma, R., Pathak, S., & Chauhan, A. (2019). Bioremediation of heavy metals using fungal strains: A comparative study. *Biotechnology Reports*, 24, e00368. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00368>
- Sharma, V. K., Sohn, M., & Singh, P. (2015). Oxidation of arsenic(III) in water using naturally occurring oxidants. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(12), 9439–9450. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4144-3>
- Singh, R., Gautam, N., Mishra, A., & Gupta, R. (2020). Potential of fungal species in bioremediation of heavy metals: Current status and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100576. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100576>
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517–568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Sun, W., Xu, M., Wang, Q., & He, X. (2020). Combined bioadsorption and biodegradation of heavy metals and organic pollutants by fungi. *Environmental Pollution*, 260, 113978. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113978>

- Zhou, Y., Wang, Z., Wei, Y., Li, L., & Zhang, H. (2021). Mycoremediation of arsenic and other heavy metals by *Trichoderma reesei*: A review. *Journal of Environmental Management*, 298, 113470. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113470>
- Hill, A. (2010). Heavy metals in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/198246>
- Rhodes, N. & Henderson, A. (2013). Lead in industrial effluents: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/948749>
- Wagner, D. (2022). Bioremediation in industrial effluents: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/476417>
- Santos, C., Lawrence, C., & Shaffer, A. (2019). Heavy metals in mining wastewater: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/705397>
- Moore, G. & Davis, G. (2021). Arsenic removal in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/974628>
- Munoz, R., Herrera, M., & Arnold, J. (2012). Wastewater in soil: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/771088>
- Hensley, L. & Williams, M. (2020). Wastewater in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/694731>
- Miller, D., Ramirez, B., & Wood, H. (2013). Cadmium in soil: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/518801>
- Zuniga, D., Jackson, L., & Gray, C. (2013). Bioremediation in industrial effluents: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/166613>
- DDS, M. H., Perez, P., Adams, E., & Walter, T. (2016). Environmental remediation in soil: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/407757>
- Foster, M., Baker, J., Baker, J., & Ross, S. (2012). Cadmium in mining wastewater: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/308573>
- Hicks, Z. & Rodriguez, A. (2015). Bioremediation in industrial effluents: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/480612>
- Henderson, R., Ferrell, J., & Valencia, T. (2013). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/377932>
- Maldonado, N., Davidson, D., Chavez, J., & Baker, S. (2013). Lead in industrial effluents: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/335612>
- Gaines, C. (2015). *Trichoderma reesei* in industrial effluents: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/446479>
- Fowler, E. (2018). Mycoremediation in soil: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/299659>
- Farmer, B. (2011). Fungi in soil: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/300896>

- Moreno, P. & Smith, F. (2018). Cadmium in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/783823>
- Decker, S. (2011). Mycoremediation in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/922157>
- Humphrey, A., Tucker, A., Cannon, P., & Pierce, J. (2014). Fungi in industrial effluents: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/884309>
- Henderson, S., Blair, J., & Carney, E. (2010). *Trichoderma reesei* in industrial effluents: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/723939>
- Holmes, J. (2020). Mycoremediation in soil: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/648177>
- Morgan, D., Robinson, C., & Perez, M. (2024). Heavy metals in mining wastewater: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/580547>
- Jones, S. (2011). Lead in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/559469>
- Lewis, M., Duncan, T., & Aguirre, R. (2019). Lead in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/680097>
- Jordan, B. & Daniel, J. (2014). Heavy metals in industrial effluents: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/544151>
- Garcia, V., Hensley, G., & West, C. (2010). *Trichoderma reesei* in soil: a review. *Bioremediation Research*. <https://doi.org/824586>
- Wright, D. & Callahan, J. (2018). *Trichoderma reesei* in soil: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/361650>
- Kidd, A. (2015). Lead in soil: a review. *Bioremediation Research*. <https://doi.org/448321>
- House, T., Tucker, C., Brown, J., & Baker, W. (2022). Mycoremediation in soil: a review. *Bioremediation Research*. <https://doi.org/956253>
- Henderson, J., Peters, W., Phillips, B., & Daniels, L. (2015). Heavy metals in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/468203>
- Silva, A., Moore, S., Lopez, A., & Young, M. (2020). Lead in soil: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/863934>
- Sanchez, S., Barnes, L., & Donovan, K. (2016). Environmental remediation in industrial effluents: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/820221>
- Allen, M. & Evans, M. (2015). Fungi in mining wastewater: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/831076>
- Jones, P., Ferrell, Z., & Baker, D. (2018). Bioremediation in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/550770>

- Suarez, S., Bass, C., & Archer, L. (2017). Cadmium in soil: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/958179>
- Montoya, A. & Mcmillan, M. (2020). Heavy metals in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/577538>
- Rodriguez, B., Jacobs, D., Walters, C., & Whitehead, J. (2024). Environmental remediation in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/943170>
- Henderson, A., Wise, A., Figueroa, D., & Smith, J. (2010). Lead in mining wastewater: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/954596>
- Mckee, S., Aguilar, S., Parker, C., & Valencia, R. (2023). Lead in soil: a review. *Bioremediation Research*. <https://doi.org/757193>
- Wright, C. & Henson, R. (2014). Cadmium in mining wastewater: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/827659>
- Moore, M. & Cherry, S. (2021). Mycoremediation in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/907189>
- Johnson, S. (2023). Environmental remediation in soil: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/331251>
- Galvan, E., Cochran, S., Rodriguez, R., & Walker, S. (2013). Heavy metals in soil: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/128276>
- Torres, J., Johnson, C., Lin, G., & May, D. (2019). Environmental remediation in industrial effluents: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/576786>
- Herrera, W., Waller, A., & Baker, V. (2015). Fungi in soil: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/781725>
- Chandler, J. (2022). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/801978>
- Dixon, L. (2019). Mycoremediation in soil: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/427110>
- Scott, K., Frost, A., Harmon, M., & Jones, H. (2016). Mycoremediation in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/488571>
- Edwards, E. (2018). Wastewater in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/869440>
- Evans, M., Powell, J., & Fisher, C. (2019). Lead in soil: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/697530>
- Orr, M., Kelley, E., Jordan, D., & Marshall, M. (2015). *Trichoderma reesei* in soil: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/110644>
- Kennedy, D. & Jackson, R. (2011). Mycoremediation in industrial effluents: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/408528>

- Schultz, J. & Potter, R. (2016). Mycoremediation in soil: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/421517>
- Gonzalez, C., Alvarez, D., & Perry, A. (2013). Arsenic removal in industrial effluents: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/607719>
- Horton, C., Jr., D. D., & Rodriguez, P. (2021). Environmental remediation in industrial effluents: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/842411>
- Rubio, C. & Wright, A. (2014). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/601968>
- Solis, J., Larson, V., Salazar, S., & Rivas, K. (2015). Bioremediation in mining wastewater: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/256445>
- Manning, S., Wright, D., & Boyd, P. (2011). Mycoremediation in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/420214>
- Jones, D. (2019). Arsenic removal in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/264136>
- Flores, D. (2016). Cadmium in industrial effluents: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/820775>
- Hall, B. & Brown, M. (2024). Heavy metals in industrial effluents: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/174878>
- Perry, J. (2012). Heavy metals in industrial effluents: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/666211>
- Stein, J., Gates, M., Smith, J., & Castaneda, P. (2017). Arsenic removal in industrial effluents: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/901909>
- Adkins, J., Walker, L., & Johnson, J. (2019). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/528184>
- Powell, M., Anderson, J., & Long, A. (2015). Arsenic removal in mining wastewater: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/221552>
- Day, A., Williams, J., Murphy, D., & Walton, J. (2023). Lead in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/380028>
- Miller, D. & Cooke, J. (2024). Heavy metals in soil: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/114338>
- Harrington, M., Herring, N., Hernandez, A., & Elliott, M. (2011). Mycoremediation in mining wastewater: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/386706>
- Wang, M., Adkins, L., Oconnell, R., & Collins, A. (2023). Cadmium in soil: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/910208>
- Sanders, T., Vaughn, A., Barton, A., & Martinez, L. (2015). Lead in soil: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/448588>

- Patterson, D. H., Peterson, J., Garcia, S., & Poole, M. (2017). Wastewater in mining wastewater: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/795928>
- Gross, J. & Morton, D. (2017). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/251157>
- Graham, K., Christian, D., Keith, A., & Bishop, J. (2023). Bioremediation in mining wastewater: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/432043>
- Rosales, A., Salinas, D., Haynes, S., & Vaughan, A. (2023). Lead in mining wastewater: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/274446>
- Freeman, N., Brewer, M., & II, R. D. (2024). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/356059>
- Perkins, E., Coleman, J., Warner, E., & Martinez, D. (2019). Bioremediation in mining wastewater: a review. *Bioremediation Research*. <https://doi.org/366314>
- Herrera, B., Robinson, C., Warren, D. W., & Lee, B. (2014). *Trichoderma reesei* in soil: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/544920>
- Smith, C., Mccann, D., & Martinez, M. (2017). Heavy metals in mining wastewater: a review. *Ecotoxicology Letters*. <https://doi.org/409571>
- Salas, K. (2023). Fungi in soil: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/940886>
- Alexander, J., Everett, A., & Morales, R. (2013). Mycoremediation in industrial effluents: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/707727>
- Brown, M., Torres, J., & DDS, B. D. (2021). Bioremediation in mining wastewater: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/385765>
- Mills, C. & Dalton, J. (2014). Cadmium in soil: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/859396>
- DDS, E. O., Clark, T., Moore, M., & Smith, B. (2023). Lead in soil: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/962367>
- Carter, K., Warner, M., & Bradshaw, M. (2011). Mycoremediation in soil: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/528129>
- Guerrero, L. (2012). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/489033>
- Stephens, J., Serrano, S., Parker, C., & Roberts, L. (2019). Bioremediation in soil: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/566297>
- Lyons, M. & Snyder, K. (2023). Wastewater in mining wastewater: a review. *Heavy Metals Journal*. <https://doi.org/794963>
- Reynolds, A. & Davis, D. (2020). Environmental remediation in mining wastewater: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/326441>

- Johnston, S. & Chambers, Y. (2015). Bioremediation in industrial effluents: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/793169>
- Avila, A. (2012). *Trichoderma reesei* in soil: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/219169>
- Moon, M. (2017). Cadmium in soil: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/862569>
- Walters, K., MD, B. B., & Rivera, S. (2017). *Trichoderma reesei* in mining wastewater: a review. *Microbial Engineering Today*. <https://doi.org/737846>
- Landry, D. & Gibson, K. (2011). Bioremediation in soil: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/203996>
- Cordova, F. (2023). Lead in industrial effluents: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/199704>
- Travis, J., Gutierrez, K., & Avila, I. (2016). Wastewater in industrial effluents: a review. *Wastewater Treatment Reports*. <https://doi.org/552855>
- Harris, O. (2021). Wastewater in mining wastewater: a review. *International Journal of Fungi*. <https://doi.org/153945>
- Kim, T., Dudley, B., & Moore, C. (2019). Heavy metals in soil: a review. *Applied Mycology*. <https://doi.org/986438>
- Davis, K., MD, S. M., & Moran, K. (2011). Heavy metals in industrial effluents: a review. *Fungal Biotechnology*. <https://doi.org/386544>
- Davenport, D., Reyes, M. K., & Suarez, K. (2024). Wastewater in soil: a review. *Journal of Environmental Science*. <https://doi.org/882354>
- Acción Ecológica. (2019). Impactos de la minería en Portovelo-Zaruma. <https://www.accionecologica.org>
- Cumbal, L. (2018). Evaluación de hongos filamentosos en la remoción de metales pesados en aguas residuales mineras. Escuela Politécnica Nacional.
- EcoCiencia. (2020). Monitoreo de calidad de agua en ríos afectados por la minería. Fundación EcoCiencia.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE). (2022). Informe sobre calidad ambiental del río Amarillo. Gobierno del Ecuador.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Guías para la calidad del agua potable (4.ª ed.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>

Argumedo-Delira, R., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R., & Peña-Cabriales, J. J. (2009). El género fúngico *Trichoderma* y su relación con los contaminantes orgánicos e inorgánicos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(4), 257-269.

ATSDR. (2023, enero 18). *Resumen de Salud Pública: Arsénico (Arsenic) | PHS | ATSDR*.

https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs2.html

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>

Garzón, J. M., Rodríguez Miranda, J. P., & Hernández Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>

OMS. (2022). *Arsénico*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

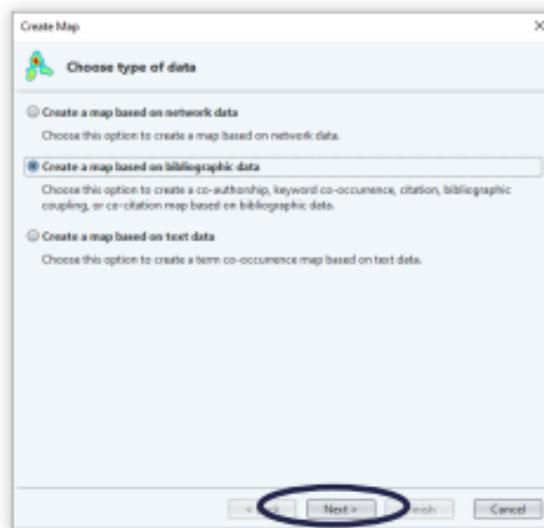
Rangel, E. A., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., Balagurusamy, N., Rangel Montoya, E. A., Montañez Hernández, L. E., Luévanos Escareño, M. P., & Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118.

Rodríguez Martínez, H. L., Peña Manjarrez, M., Gutiérrez Reyes, A. V., González Trevizo, C. L., Montes Fonseca, S. L., López Avalos, G. G., Rodríguez Martínez, H. L., Peña Manjarrez, M., Gutiérrez Reyes, A. V., González Trevizo, C. L., Montes Fonseca, S. L., & López Avalos, G. G. (2017). Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos genéticamente modificados. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 353-361.

Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., & Jaroszek-Ścisiel, J. (2022). Trichoderma: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/ijms23042329>

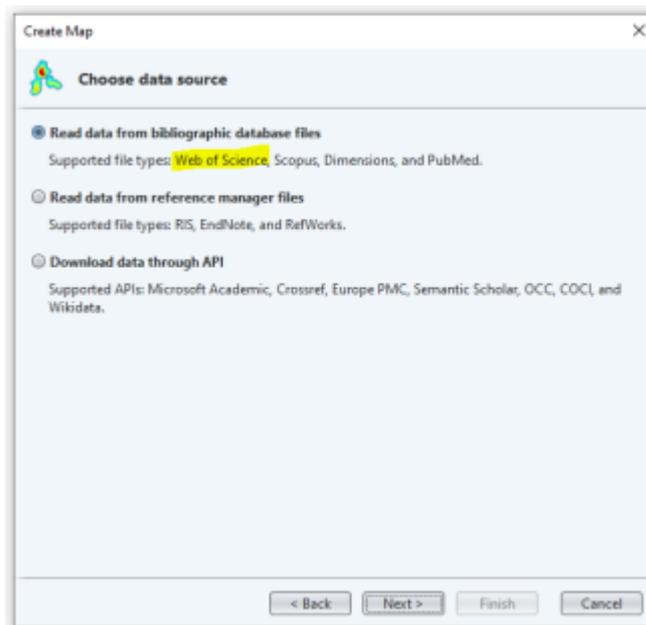
Anexo 3.

Especificaciones al programa VOSviewer



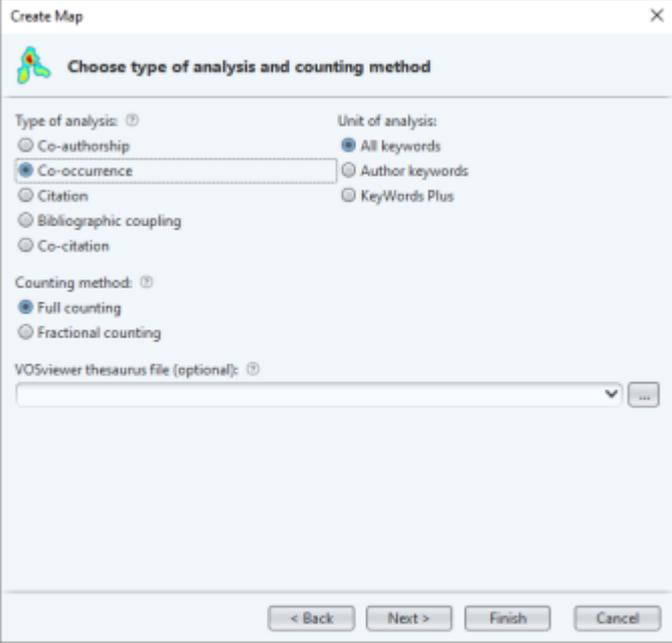
Anexo 4.

Procesamiento de la data.



Anexo 5.

Secuencia final para el corrido de los datos.



The image shows a screenshot of the 'Create Map' dialog box in VOSviewer. The dialog has a title bar with 'Create Map' and a close button. Below the title bar is a section titled 'Choose type of analysis and counting method'. It contains several radio button options for 'Type of analysis' and 'Unit of analysis', and a 'Counting method' section. At the bottom, there is a dropdown menu for 'VOSviewer thesaurus file (optional)' and a set of navigation buttons: '< Back', 'Next >', 'Finish', and 'Cancel'.

Create Map

Choose type of analysis and counting method

Type of analysis: Co-authorship
 Co-occurrence
 Citation
 Bibliographic coupling
 Co-citation

Unit of analysis: All keywords
 Author keywords
 KeyWords Plus

Counting method: Full counting
 Fractional counting

VOSviewer thesaurus file (optional):

< Back Next > Finish Cancel