

Los Métodos Empleados para la Degradación de Cianuro Presentes en Aguas Residuales.
Una Revisión Sistemática

Julissa Esmeralda Cadena Ardila y Wilson Felipe Arias Ruiz

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director:

Cesar Augusto Guevara Lastre

Ing. Químico. M.Sc Ciencias y Tecnologías Ambientales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Se la dedico a mi luz, mi guía, Dios, quien me acompaña en todo momento y me enseña a enfrentar la vida con mucha sabiduría y amor.

A mis Padres, Margy Ardila y Carlos Cadena, por ser mi apoyo incondicional siempre.

A mis hermanos, Cristina Cadena, Manuel Cadena, Francisco Cadena por sus sabios consejos, afecto y cariño.

A mis amigos, Angélica Maldonado, Smith Torres, Cirley Borrero y Rosa Monterrosa por su compañía, su afecto y sus consejos sobre la vida. Su amistad ha sido el mejor regalo de esta etapa de mi vida.

A mis mascotas, Lucero, Chipichipi y Nymeria mis compañeros de noches de estudio y mi alegría en los días grises.

A mi compañero de tesis, Felipe Arias por el compromiso y perseverancia. y nuestro director de grado, el Ing. Cesar Guevara, por sus consejos, tiempo y enseñanza.

Por último, al universo, por mostrarme que no hay abismo tan profundo que no pueda ser iluminado por un instante de amor, de verdad o de redención.

Julissa Esmeralda Cadena Ardila

Con todo mi amor y gratitud, dedico este trabajo a las personas que han sido el pilar fundamental en mi vida y en este camino académico.

A mi madre, Olga Ruiz, y a mi abuela, Mariela Mejia, por su fortaleza y su constante apoyo. Gracias por ser mi ejemplo de perseverancia y por demostrarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

A mis amigos Ferney Piamonte, Diego Cristancho y Yely Cruz quienes más que compañeros en esta travesía, se convirtieron en hermanos. Gracias por estar a mi lado en cada desafío, por las largas noches de estudio y por nunca dejarme caer. Su amistad es uno de los mayores regalos que esta etapa me ha dado.

Y Finalmente a mi compañera de tesis, Esmeralda Cadena y nuestro director de grado, el Ing. Cesar Guevara, quienes fueron parte fundamental de esta tesis, que es el reflejo de todo el apoyo y confianza que he recibido. A todos ustedes les dedico este logro.

Wilson Felipe Arias Ruiz

Introducción	9
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2. Marco de Referencia	13
2.1 Marco Conceptual	13
2.2 Métodos de degradación de cianuro:	14
2.2.1 Métodos fisicoquímicos	14
2.2.1.1 Degradación natural	14
2.2.2 métodos químicos	15
2.2.2.1 Cloración alcalina	15
2.2.3 Métodos biológicos	16
2.3.1 Revisión Sistemática de la Literatura	17
2.3.2 Herramientas para la Gestión de la Revisión Sistemática	18
3. Estado del arte	20
4. Metodología	21
4.1 Estrategia de Búsqueda y Selección de las Fuentes de Información	22
4.2 Criterios de Inclusión y Exclusión e Identificación de Documentos Relevantes	24
4.3 Descripción y Análisis Bibliométrico de los Resultados	26
4.4 Comparación de la Información Seleccionada e Inspección de los Desafíos	26
4.4.1 Categorización de los Métodos de Comparación	26
5. Resultados y Discusión	27
5.1 Selección de la Información: Resultados del Protocolo PRISMA	27
5.2 Análisis Bibliométrico	30
5.3 Comparación de los Métodos Reportados para la Degradación de Cianuro Presentes en Aguas Residuales	37
6. Desafíos y Análisis del TRL	43
7. Conclusiones	46
Referencias Bibliográficas	48
Apéndices	57

Lista de Tablas

Tabla 1. Criterios aplicados en la búsqueda de la información	23
Tabla 2. Estrategia de búsqueda en la base de datos seleccionada	23
Tabla 3. Criterios de selección empleados para la revisión sistemática	23
Tabla 4. Criterios de comparación para contrastar los estudios revisados, se establecieron criterios de comparación estructurados en tres niveles	26
Tabla 5. Criterios de inclusión para determinar la elegibilidad de los artículos	23
Tabla 6. Artículos sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales con más citas	32
Tabla 7. Reporte de los métodos que presentan mayor porcentaje de degradación de cianuro en diferentes aguas residuales	37
Tabla 8. Niveles TRL de diferentes tratamientos para la degradación de cianuro	42

Lista de Figuras

Figura 1. Clasificación de cianuros	14
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de la cloración alcalina	14
Figura 3. Plantilla de diagrama de flujo PRISMA 2020 para revisiones sistemática	18
Figura 4. Metodología realizada en la presente revisión sistemática	21
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos	29
Figura 6. Análisis bibliométrico del número de publicaciones a) por país b) por año	30
Figura 7. Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de estudio	31
Figura 8. Palabras claves representativas de los documentos seleccionados para la revisión VOSviewer	34
Figura 9. Principales fuentes de investigación sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales	35

Lista de apéndices

Apéndice A. Lista de verificación metodología PRISMA 2020	55
Apéndice B. Algunos documentos no accesibles durante la revisión	60
Apéndice C. Artículos descartados después de leerlos completamente	61
Apéndice D. Artículos sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales con publicaciones citadas entre el año 2021 al 2023	63
Apéndice E. Niveles de preparación tecnológica (TRL)	64
Apéndice F. Comparación de los métodos que presentaron menor eficiencia de degradación de cianuro	65

Resumen

Título: LOS MÉTODOS EMPLEADOS PARA LA DEGRADACIÓN DE CIANURO PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES. UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.*

Autores: Wilson Felipe Arias Ruiz y Julissa Esmeralda Cadena Ardila **

Palabra clave: Cianuro, tratamiento de aguas residuales, degradación, agua.

Descripción: La presencia de cianuro en aguas residuales, producto de actividades industriales como la minería, metalurgia y galvanoplastia, representan un riesgo significativo para la salud humana y los ecosistemas debido a su alta toxicidad. En este trabajo se realizó una revisión sistemática sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales. La búsqueda y clasificación de la información se realizó de acuerdo con el protocolo PRISMA. Se realizó un análisis bibliométrico para obtener un panorama acerca del número de artículos publicados y citados por año, autores más relevantes, países y revistas con mayor número de publicaciones. Se analizaron los diferentes métodos para ser clasificados como biológicos, químicos y físicos los cuales se evaluaron por tres criterios de comparación siendo la eficiencia del método, la viabilidad operativa y las condiciones ambientales. Además, se analizó el nivel de madurez tecnológica (TRL) de estos métodos, observando que mientras técnicas como la adsorción en carbón activado se encuentran en niveles TRL 4-5 procesos como la biorremediación con bacterias *Pseudomonas* están en fases de validación (TRL 3-4). Se pudo concluir que la selección del método depende del tipo de cianuro, normativas y viabilidad económica. Mientras los químicos (oxidación avanzada, fotocatalisis) garantizan rapidez, generan subproductos; los biológicos son sostenibles pero sensibles a condiciones ambientales. En la práctica, la combinación de técnicas como oxidación inicial seguida de biorremediación optimiza costos y cumplimiento ambiental. Este trabajo resalta la necesidad de adaptar soluciones a contextos industriales específicos, priorizando escalabilidad y sostenibilidad.

* Trabajo de grado

**Facultad de fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director Ing. Químico. Cesar Augusto Guevara Lastre

Abstract

Title: METHODS USED FOR CYANIDE DEGRADATION IN WASTEWATER: A SYSTEMATIC REVIEW*

Authors: Wilson Felipe Arias Ruiz y Julissa Esmeralda Cadena Ardila **

Keywords: Cyanide, wastewater treatment, degradation, wáter

Description: The presence of cyanide in wastewater, product of industrial activities such as mining, metallurgy and electroplating, represents a significant risk to human health and ecosystems due to its high toxicity. In this work, a systematic review of the cyanide degradation methods present in wastewater was carried out. The search and classification of the information was carried out according to the PRISMA protocol. A bibliometric analysis was performed to obtain an overview of the number of published and cited articles per year, most relevant authors, countries and journals with the highest number of publications. The different methods were analyzed to be classified as biological, chemical and physical which were evaluated by three comparison criteria being the efficiency of the method, the operational feasibility and the environmental conditions. In addition, the technological maturity level (TRL) of these methods was analyzed, observing that while techniques such as adsorption on activated carbon are at TRL 4-5 processes such as bioremediation with *Pseudomonas* bacteria are in the validation stages (TRL 3-4). It was concluded that the selection of the method depends on the type of cyanide, regulations and economic feasibility. While chemical methods (advanced oxidation, photocatalysis) guarantee speed, they generate by-products; biological methods are sustainable but sensitive to environmental conditions. In practice, the combination of techniques such as initial oxidation followed by bioremediation optimizes costs and environmental compliance. This work highlights the need to adapt solutions to specific industrial contexts, prioritizing scalability and sustainability.

* *Undergraduate thesis*

**Faculty of Physicochemical Sciences. School of Chemical Engineering Advisor: Chem. Eng. Cesar Augusto Guevara Lastre.

Introducción

La generación de aguas residuales está aumentando a un ritmo acelerado, en proporción al crecimiento de la población mundial, con el objetivo de sostener un desarrollo económico continuo, a pesar de la disponibilidad limitada de recursos. Se estima que aproximadamente el 80% de estas aguas son vertidas en el medio ambiente sin recibir un tratamiento adecuado, y en los países en desarrollo, solo el 8% de las aguas residuales industriales son tratadas correctamente (United Nations Education, Scientific and Cultural Organization, 2017). Entre los contaminantes más preocupantes presentes en las aguas residuales se encuentra el cianuro, una sustancia altamente tóxica asociada a diversas industrias, como la minería, la metalurgia y la fabricación de productos químicos (Razanamahandry et, al. 2016), Según datos de la *International Cyanide Management Institute* (ICMI), se estima que la producción global de cianuro de hidrógeno, la forma más común de cianuro utilizada industrialmente, supera el millón de toneladas anuales. Aproximadamente el 6% de esta producción se destina a la industria minera para la extracción de metales preciosos como el oro y la plata, mientras que el 94% restante se utiliza en la fabricación de productos químicos, plásticos, adhesivos y otros bienes industriales.

En Colombia, así como en otros países, en los protocolos de minería el cianuro desempeña un papel importante. Este material es fácil de usar y está disponibles a bajo costo. Sin embargo, existe poca conciencia entre los usuarios y los habitantes sobre los riesgos del uso del cianuro (Martin et, al. 2020). Esto, sumado a otros fenómenos como la presencia de minería ilegal en 29 de los 32 departamentos del país, afectando especialmente a Antioquia, Bolívar,

Chocó, Santander, Caldas, Nariño, Valle del Cauca, Cauca, Boyacá, Amazonas, Putumayo y Guainía. Ha provocado que, más del 50 % de los municipios colombianos hayan sufrido los estragos por de los vertimientos sin control de residuos en esta actividad (Procuraduría General de la Nación. 2024).

La presencia en aguas y suelos naturales de residuos con HCN y otros cianocompuestos que liberan iones $F-CN$, los cuales son altamente tóxicos para casi todos los organismos vivos, representan un riesgo importante para los ecosistemas acuáticos y para la salud humana (Razanamahandry et, al. 2016). En Colombia, la regulación de los límites máximos permisibles de cianuro en las aguas residuales fue establecidos en la Resolución 631 de 2015, que varían entre 0,2 mg/l y 1 mg/l según el tipo de vertimiento. La erradicación del cianuro de las aguas residuales ha demostrado ser una de las tareas más complejas en la ingeniería ambiental moderna, lo que ha impulsado numerosos estudios en busca de soluciones efectivas y ecológicas. Durante las últimas décadas, el aumento constante de varios estudios se ha centrado en desarrollar y perfeccionar diversas técnicas para la eliminar el cianuro de las aguas residuales de forma física, química o biológica, analizando sus beneficios y restricciones únicas en eficiencia, escalabilidad y compatibilidad ecológica lo que resulta en el avance de la teoría sobre el tema. (Razanamahandry et, al. 2016; Alvillo-Rivera et, al. 2016)

Debido al impacto ambiental y los riesgos para la salud derivados de la presencia de cianuros en cuerpos de agua, es relevante evaluar el avance de la investigación en este campo. En este sentido, surge la pregunta: ¿Cuáles son los principales métodos utilizados para la degradación de cianuros en aguas residuales?

El propósito de este trabajo es llevar a cabo una revisión sistemática sobre estudios científicos que se centran en eliminar el cianuro en las aguas residuales. Se analizarán sus

diferentes dimensiones y los desafíos en la implementación de los diversos enfoques de solución, con el propósito de ofrecer una visión sobre el desarrollo científico y tecnológico logrado en el área de interés.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Elaborar una revisión bibliográfica de los métodos implementados para la degradación de cianuro en aguas residuales, con el propósito de encontrar el método con mayor eficiencia.

1.2 Objetivos Específicos

- Revisar cuáles son los métodos reportados en la literatura para degradar cianuro en aguas residuales a través de una revisión sistemática aplicando el protocolo PRISMA.
- Desarrollar un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas relacionadas con los métodos empleados en la degradación de cianuro en aguas residuales con base en la información obtenida de la declaración PRISMA.
- Identificar desafíos actuales en los procesos de degradación de aguas contaminadas con cianuro.

2. Marco de Referencia

2.1 Marco Conceptual

Las aguas residuales son aguas que han sido utilizadas en actividades humanas, como la industria, la minería, los hogares, la agricultura y la generación de energía (Muñoz Cruz, 2008). Estas aguas requieren tratamiento antes de ser devueltas al medio ambiente para evitar la contaminación de los cuerpos de agua. Uno de los contaminantes más peligrosos presentes en las aguas residuales es el cianuro, representando un grave peligro para la salud y el ambiente, principalmente por el impacto ambiental causado en los cuerpos de agua (Johnson, 2015; Posada, 2011).

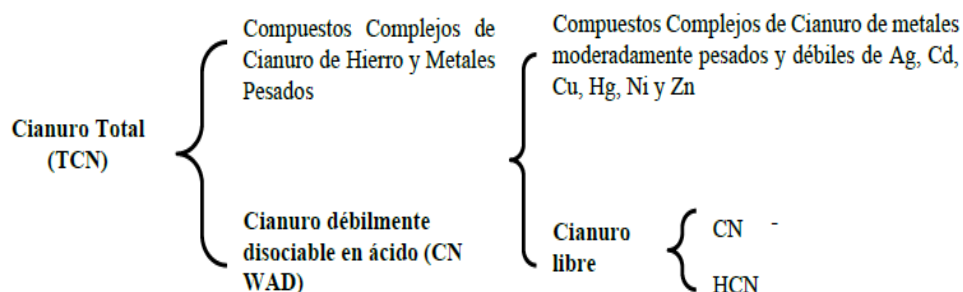
El cianuro es un grupo químico conformado por un átomo de carbono unido a un átomo de nitrógeno mediante enlace triple. La mayoría de los cianuros bien sea de origen natural o industrial, son venenos potentes de acción rápida. El cianuro libre es empleado para diferenciar cianuro de ion, este se separa en el agua del proceso con distintos cianuros de hidrógeno que terminan uniéndose a una solución (Correa et al., 2019). De igual manera, cianuro total se les llama a los grupos de compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa, este incorpora al cianuro libre, complejos y simples (Nava Alonso et al., 2007).

Compuestos simples de cianuro: Los cianuros simples se definen como las sales de ácido cianhídrico (KCN y NaCN, etc.), los cuales se disuelven completamente en soluciones produciendo cationes alcalinotérreos libres y aniones cianuros. Asimismo, los compuestos complejos de cianuro son los compuestos químicos que presentan la mayor cantidad de enlaces ligados con el catión central de este, por ende, presentan una mayor estabilidad y es difícil que se

degrade en cianuro libre por esta razón, representan un riesgo ambiental a más largo plazo. En la Figura 1, se puede evidenciar la clasificación de los cianuros.

Figura 1

Clasificación de cianuros



Nota. Adaptado de (Guarnizo et al., 2022, p. 24)

Por lo tanto, es fundamental implementar métodos efectivos para la degradación del cianuro en las aguas residuales antes de su vertimiento al medio ambiente, como lo son los que incluyen la oxidación química, la biodegradación y la adsorción (Fernández Pérez, 2007).

2.2 Métodos de degradación de cianuro:

Se han empleado diferentes procedimientos para disolver el cianuro, como métodos físicos, adsorción y oxidación. Estas herramientas pueden generar la separación o destrucción del cianuro, aunque estos también pueden degradarse de forma natural (luz ultravioleta y calor).

2.2.1 Métodos fisicoquímicos

2.2.1.1 Degradación natural

Es la descomposición de cianuros empleando métodos físicos y químicos espontáneos como la oxidación natural, la volatilización y la descomposición por la luz solar, estos mecanismos pueden reducir las concentraciones de cianuro a niveles no detectables en períodos

de semanas a meses, dependiendo de las condiciones ambientales (Kuyucak et al., 2013). La degradación natural es lenta y es difícil garantizar la seguridad y el grado de descomposición, por lo que rara vez se utiliza en la práctica (Jaszczak et al., 2017 ; Tran et al., 2019).

2.2.2 métodos químicos

2.2.2.1 Cloración alcalina

La cloración alcalina se lleva a cabo utilizando oxidantes de cloro, como blanqueador en polvo, hipoclorito de sodio y cloro líquido. Los oxidantes de cloro se pulverizan en los tanques de tratamiento de aguas residuales con una relación de masa de CN^- total en los tanques de tratamiento de aguas residuales de 1:20-30. El proceso se presenta en la Figura 2. El mecanismo de descomposición de los cianuros en los tanques de tratamiento de aguas residuales es similar al de la eliminación de cianuros en el efluente (Khodadad et al., 2008 ; Zhang et al., 2015).

Las reacciones entre los cianuros y el hipoclorito se muestran en las ecuaciones. (1) , (2) , (3)

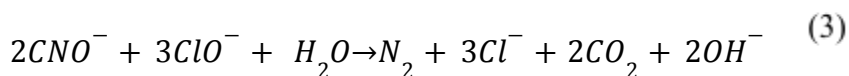
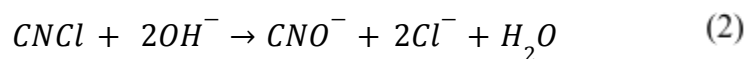
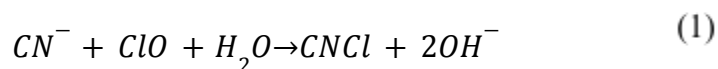
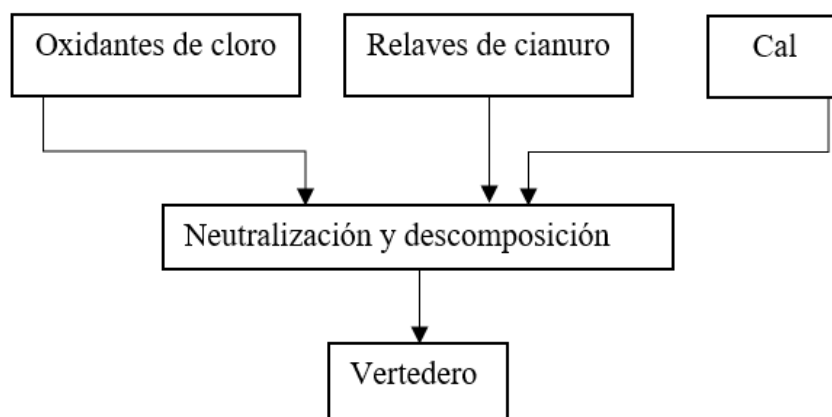


Figura 2

Diagrama de bloques del proceso de cloración alcalina



Nota. Adaptado de (Lv et al., p. 4)

Las reacciones de cloración alcalina se dividen en dos etapas. En la primera etapa, el CN^- se oxida a CNO^- con menos toxicidad a un pH de más de 10. Luego, el CNO^- se oxida a N_2 y CO_2 a un pH de 7,5 a 8,0 (Lv et al., 2015).

2.2.3 Métodos biológicos

La degradación de cianuros mediante procesos biológicos utiliza microorganismos para eliminar contaminantes del agua de forma sencilla, rentable y robusta. En el caso del cianuro, los métodos biológicos pueden reducir su concentración en aguas residuales a niveles ambientalmente aceptables, a la vez que producen menos subproductos nocivos. Abarcan desde la fitorremediación hasta la biorremediación microbiana. La fitorremediación implica el uso de plantas para eliminar o reducir las concentraciones de cianuro en el agua o el suelo, ya que las

plantas pueden utilizar el cianuro para satisfacer sus necesidades de nitrógeno (Srivastava et al., 2010).

Por el contrario, la biorremediación microbiana se basa en la actividad metabólica de bacterias, hongos o microalgas para degradar el cianuro (Anno, F. et al. 2021). Estos microorganismos utilizan el cianuro como fuente de nitrógeno, descomponiéndolo mediante una o más vías enzimáticas (Luque et al., 2018). Se han estudiado cepas bacterianas de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Klebsiella*, entre otros, en la biorremediación de cianuro libre y cianuro en complejos metálicos (Rivera et al., 2021).

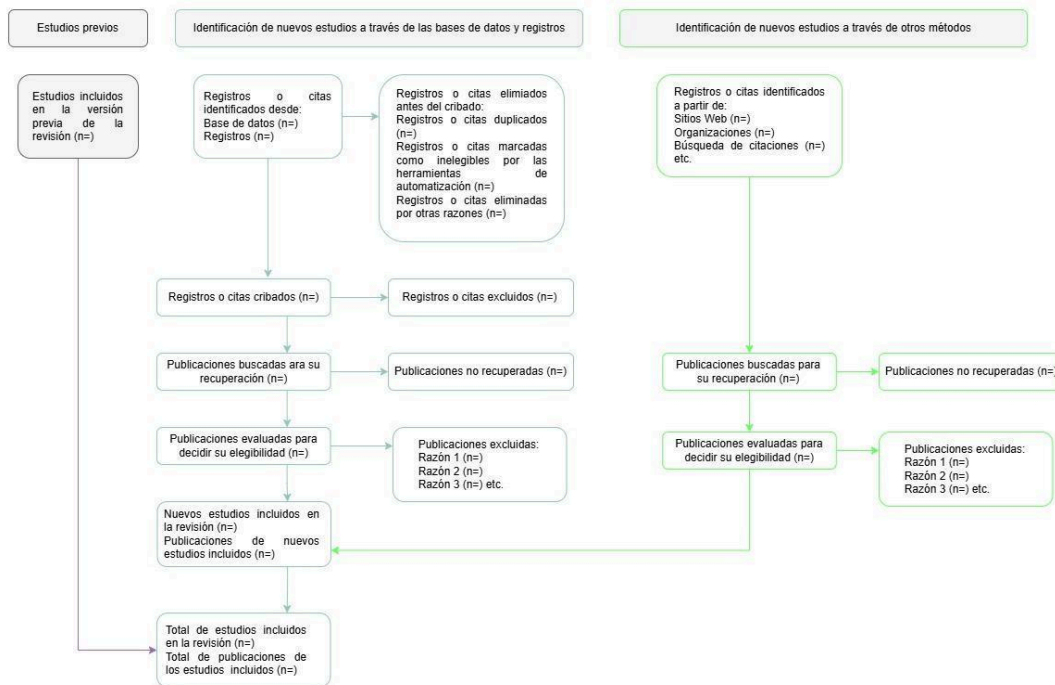
2.3 Marco Teórico

2.3.1 Revisión Sistemática de la Literatura

La revisión sistemática de la literatura (RS) comprende la evaluación exhaustiva, protocolizada, sistemática y explícita de la literatura a partir de una metodología previamente definida. Una de las metodologías utilizadas en RS es la declaración PRISMA, seguida en diferentes reportes de literatura. La siguiente figura ilustra los procedimientos utilizados en PRISMA. Según la Figura 3 inicia en el nivel de identificación en donde se aplica una ecuación de búsqueda obteniendo las referencias relacionadas con el tema; después en la etapa de cribado se excluyen referencias definiendo ciertos criterios y por último la etapa de incluidos define la base de datos para la revisión de literatura (Sánchez et, al. 2022)

Figura 3

Plantilla de diagrama de flujo PRISMA 2020 para revisiones sistemática



Nota. Adaptado a partir de los diagramas de flujo propuestos por (Boers70, mayo-Wilson et al.71 y Stovold et al.72, 2021, P. 7)

2.3.2 Herramientas para la Gestión de la Revisión Sistemática

El uso de herramientas de gestión en la revisión sistemática es fundamental para optimizar el proceso, mejorar la precisión y promover estándares de calidad, lo que a su vez garantiza que el estudio sea completo, riguroso y transparente.

- Rayyan: es una inteligencia artificial que ofrece una cantidad de herramientas y combinaciones de funcionalidades avanzadas para gestionar revisiones sistemáticas de la literatura como lo son: organización, automatización y colaboración. Su uso puede mejorar significativamente la eficiencia y la calidad del proceso de revisión, permitiendo

que la investigación se enfoque más en el análisis y la síntesis de la información relevante.

- Vosviewer: permite visualizar y analizar la estructura, la dinámica de la investigación en un campo específico, mediante la creación de mapas de citas, co-citas y co-ocurrencias de palabras clave, lo que puede ayudar a identificar, los autores y las instituciones más influyentes en un campo de investigación, las relaciones entre diferentes temas y autores.

3. Estado del arte

Recientemente, la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander ha realizado actividades de vigilancia tecnológica que han permitido desarrollar un enfoque metodológico efectivo para alcanzar los objetivos de investigación. Estos trabajos han involucrado revisiones sistemáticas de la literatura, siguiendo la metodología PRISMA, que se compone de 27 pasos organizados en 7 fases clave: definición de la pregunta de investigación, búsqueda de artículos, selección de estudios relevantes, extracción de datos, análisis y presentación de resultados provisionales (Liberati et, al. 2009).

Chan-Po Chen (2024), concluye, el manifiesto potencial del RuAgMn-AC para el tratamiento avanzado de aguas residuales, en particular como catalizador para la eliminación de cianuro mediante ozonización catalítica, especialmente como paso previo al tratamiento biológico debido a que en los resultados obtenidos en la experimentación el porcentaje de remoción de cianuro es cercano al 80%.

Freitas, J., & Horta, D. (2023) concluyeron que, a pesar del reaprovechamiento de efluentes en la minería, incluso los que contienen cianuro, debe ser monitoreado de cerca para evaluar los impactos del proceso, sugiriendo formas de pretratamiento para reciclaje de los efluentes. Como la oxidación con peróxido de hidrógeno, proceso INCO, cloración alcalina, ozonización, precipitación y acomplejamiento con hierro y tratamientos biológicos. Aun así, no existe una metodología única para el tratamiento y se deben considerar las características del efluente, los costos operativos y la disponibilidad para implementar procesos en las empresas mineras.

En el estudio realizado por Rangel-González (2024), describe como existen diversos rangos de microorganismos que pueden emplearse para el proceso de biodegradación del

cianuro. Estos resaltan la efectividad de los métodos biológicos como una alternativa viable a los enfoques físicos y químicos para la degradación del cianuro. Además, existe una excelente oportunidad para generar nuevos estudios, ya que la investigación sobre especies vegetales es escasa.

Según Yi Chen (2020), La tecnología de electrólisis de lodos ha demostrado ser una opción viable para el tratamiento inocuo de cianuro en relaves mineros. Los resultados experimentales mostraron que el sistema de electrólisis de lodos (ETC) tuvo un impacto significativo en la oxidación y disolución de cianuro y minerales principales. Tras el tratamiento, se lograron tasas de eliminación notablemente altas: 92,07% de cianuro total (CNT), 97,17% de iones cianuro (CN⁻). En general, los resultados indican que la tecnología de electrólisis de lodos es una opción prometedora para el tratamiento de relaves de cianuro.

4. Metodología

La presente revisión sistemática se realizó llevando a cabo la siguiente metodología en la Figura 4.

Figura 4

Metodología realizada en la presente revisión sistemática



4.1 Estrategia de Búsqueda y Selección de las Fuentes de Información

La revisión se llevó a cabo siguiendo las directrices de la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses). PRISMA es un protocolo estructurado compuesto por 27 ítems que establecen los elementos clave que deben incluirse en una revisión sistemática para garantizar su transparencia, rigurosidad y reproducibilidad (García et, al. 2015). En donde se abarcan aspectos como la formulación de la pregunta de investigación, los criterios de inclusión y exclusión, la estrategia de búsqueda, la selección de estudios, la extracción de datos, la evaluación del riesgo de sesgo, entre otros. Para esta investigación, es importante aclarar que se adoptaron los ítems aplicables a revisiones

sistemáticas sin metaanálisis, omitiendo aquellos específicamente relacionados con la síntesis cualitativa de datos. (Ver Apéndice A).

Una vez definidos los criterios de búsqueda, se procedió a seleccionar la fuente de información, escogiendo la base de datos Scopus, debido a que incluye varias fuentes de información de alto impacto, como Taylor & Francis, ACS publications, ScienceDirect y Springer.

De igual modo, con la finalidad de incluir artículos relevantes para la investigación se clasificaron usando criterios de búsqueda acorde al tema de investigación, estos permitieron un análisis más específico para el diagnóstico de los artículos seleccionados, los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Criterios aplicados en la búsqueda de la información

Ítem	Criterios de búsqueda
Tipo de acceso	Acceso libre
Tipo de literatura	Artículos científicos indexados
Idioma	Español - Inglés
Perido de publicación	2014 - 2025

Planteamiento Ecuación de Búsqueda. A partir de los términos y expresiones clave identificados, se definió la ecuación de búsqueda, adaptada a la sintaxis de la base de datos, para optimizar la relevancia de los resultados se priorizaron campos específicos como “TITLE-ABS-KEY” (Scopus) dirigiendo la búsqueda a los elementos más significativos de los documentos (título, resumen y palabras clave). A partir de las palabras clave (water, cyanide y

degradation) combinadas mediante el operador booleano AND conectó los conceptos clave para garantizar que los estudios recuperados abordaran todos los aspectos centrales de la revisión.

A continuación, se muestran en la Tabla 2 los resultados de la búsqueda sistemática realizada.

Tabla 2

Estrategia de búsqueda en la base de datos seleccionada

Ecuación de búsqueda	Base de datos
TITLE-ABS-KEY ((water) AND (cyanide) AND (degradation))	Scopus

4.2 Criterios de Inclusión y Exclusión e Identificación de Documentos Relevantes

Para este proceso se realizó en la inteligencia artificial Rayyan como herramienta por su capacidad para facilitar la selección y el análisis de artículos científicos, permitiendo la importación, eliminación de duplicados, clasificación y anotación de la relevancia de cada documento.

- **Importación De Referencias.** Al realizar la búsqueda exhaustiva en las bases de datos. Las referencias obtenidas se exportaron en formato RIS y se importaron a la plataforma Rayyan.
- **Eliminación de duplicados.** Se eliminaron las referencias duplicadas utilizando la función de detección de duplicados Rayyan para asegurar que cada estudio se considerara una sola vez en el proceso de cribado. Se realizó una depuración inicial basada en los títulos y resúmenes de cada documento para seleccionar los estudios relevantes.
- **Selección Criterios de Inclusión y Exclusión.** Para asegurar que el proceso de selección sea claro y además garantizar un proceso de revisión transparente, libre de sesgos en la

Tabla 3, se presentan los estos criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los documentos que serían analizados en detalle en las secciones posteriores.

Tabla 3

Criterios de selección empleados para la revisión sistemática

Criterios inclusión	Criterios exclusión
Estudios que detallen, métodos, resultados y aplicaciones prácticas de la degradación de cianuro para el tratamiento de aguas residuales	Cartas, editoriales, tesis, resúmenes, conferencias y estudios no relevantes.
Estudios que hablen de métodos de degradación químicos, físicos o biológicos.	Artículos donde se tratara diferentes compuestos para la degradación en aguas residuales.
Documentos que contengan información sobre la eficiencia de la degradación y concentración residual de cianuro.	Falta de indicadores eficiencia de degradación.

- Proceso de Cribado.** Tras eliminar los artículos duplicados, se llevó a cabo un filtrado en dos etapas secuenciales. La primera etapa consistió en una evaluación preliminar basada en título y resumen, donde se aplicaron rigurosamente los criterios de inclusión y exclusión definidos en la Tabla 5. En esta etapa se seleccionaron únicamente las publicaciones que centraban su investigación en la degradación de cianuro como compuesto principal, excluyendo aquellas que mencionaban diferentes compuestos a degradar, cabe resaltar que se incluyeron documentos en los que se aplicaron diferentes técnicas de degradación de cianuro. Paralelamente, se verificó que los artículos incluyeran información metodológica como diseños experimentales y parámetros operativos relevantes.

La segunda etapa comprendió una evaluación exhaustiva de calidad científica mediante la lectura completa de los textos seleccionados. Se centró especial atención a la

aplicabilidad práctica de los resultados, priorizando estudios con condiciones experimentales representativas de sistemas reales de tratamiento, esto garantizó que la revisión final se basara exclusivamente en investigaciones de alta calidad, técnicamente relevantes y metodológicamente robustas, proporcionando así una base sólida para el análisis comparativo y la extracción de conclusiones válidas.

4.3 Descripción y Análisis Bibliométrico de los Resultados

El estudio bibliométrico se llevó a cabo utilizando los documentos resultantes después de aplicar el método PRISMA, los documentos se organizaron por número de publicaciones por año, países, autores, palabras clave y el nombre de la revista para ejecutar un análisis más detallado empleando Excel y VOSviewer.

Una vez clasificada la información, se procedió al análisis de los artículos seleccionados evaluando su información sobre los métodos para el tratamiento de aguas residuales y su relación con la degradación del cianuro. Con el fin de identificar los avances científicos y la eficiencia entre los métodos usados en el tema de estudio, así como evaluar los posibles desafíos que servirán de base para planificar futuras propuestas de investigación.

4.4 Comparación de la Información Seleccionada e Inspección de los Desafíos

La comparación de los documentos seleccionados se realizó mediante la clasificación de los métodos en grupos para detectar las ventajas y desventajas de cada táctica. se examinó varios factores tanto en términos de números como de calidad y/o aplicabilidad.

4.4.1 Categorización de los Métodos de Comparación

Los datos fueron catalogados sistemáticamente por la técnica empleada para la descomposición de cianuro, tal como se muestra en la Tabla 4, se identificaron subgrupos según la técnica específica utilizada.

Tabla 4

Criterios de comparación para contrastar los estudios revisados, se establecieron criterios de comparación estructurados en tres niveles

Criterios de Comparación
<p>Eficiencia del Método:</p> <p>Se midió en función del porcentaje de eliminación de cianuro, se consideró el porcentaje de remoción alcanzado en cada estudio, el tiempo necesario para alcanzar la degradación efectiva del cianuro y los parámetros como pH, temperatura y concentración de reactivos requeridos.</p>
<p>Viabilidad Operativa:</p> <p>Se evaluó considerando su escalabilidad: Se determinó el nivel de aplicabilidad del método y su eficiencia en grandes volúmenes de agua.</p>
<p>Consideraciones ambientales:</p> <p>Se usó la información proporcionada en cuanto al porcentaje de remoción o degradación del cianuro y se contrastó con los niveles de cianuro permitidos por la normativa vigente en Colombia para el vertimiento de aguas residuales.</p>

Se identifican los desafíos en la aplicación del método, basado en el análisis bibliográfico sistemático y análisis comparativo.

Para confirmar los desafíos establecidos, se revisarán los casos de implementación industrial documentada, evaluando la aplicabilidad de cada tecnología en diferentes entornos. Finalmente, los principales obstáculos serán una prioridad con un enfoque de los criterios múltiples, lo que sugiere estrategias para mejorar la sostenibilidad de los métodos, la optimización de los costos y la reducción del impacto ambiental. Este enfoque permitirá la generación de visiones completas en las direcciones actuales y futuras en la rehabilitación de cianuro en aguas residuales.

5. Resultados y Discusión

5.1 Selección de la Información: Resultados del Protocolo PRISMA

Tras la selección de artículos, se realizó una lectura exhaustiva centrada en examinar la metodología, los hallazgos y las discusiones presentes en cada estudio, con el objetivo de identificar y extraer las variables clave relevantes que se presentan en la Tabla 5. La elección de las variables específicas en este estudio (tipo de técnica, parámetros operativos, eficiencia de degradación y escalabilidad) avala a un enfoque metodológico estructurado para evaluar el estado del arte de los métodos usados para la degradación de cianuro en aguas residuales. Estas variables, permiten realizar un análisis comparativo estandarizado entre diferentes investigaciones.

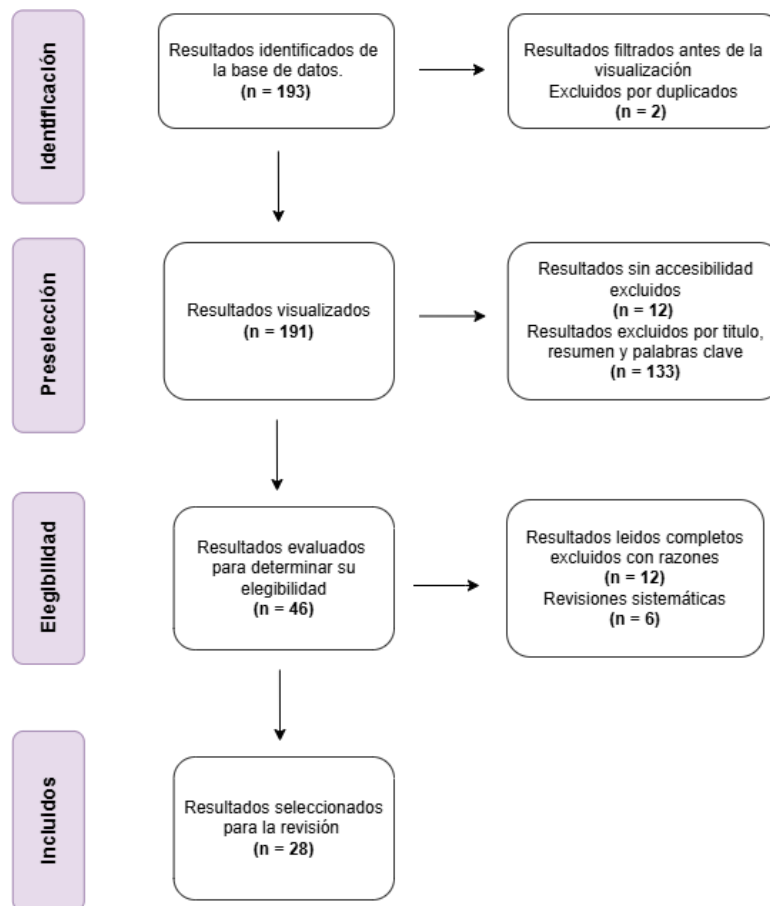
Tabla 5

Criterios de inclusión para determinar la elegibilidad de los artículos.

Categoría	Criterios de inclusión
Entorno de análisis	Autor, año, objetivo, tipo de compuesto
Entorno experimental	Técnica de degradación, tipo de cianuro
Parámetros operativos	Temperatura, pH, tiempo de remoción, % residual de cianuro
Escalabilidad	Volumen tratado, desafíos

De la ecuación establecida se encontraron un total de 193 artículos, para el proceso de selección se utilizó la herramienta Rayyan, en la cual se eliminaron los artículos duplicados quedando un total de 191, posteriormente, se excluyeron 133 artículos que no cumplían con los criterios de inclusión establecidos, además se halló que 12 artículos no fue posible acceder a la visualización ya que no tenían acceso libre. (Ver Apéndice B)

Por último, con un total de 46 artículos que fueron leídos completamente, se excluyeron 12 artículos teniendo en cuenta no cumplían con los criterios preestablecidos en la Tabla 5. Adicionalmente, se determinó que 6 de estos artículos eran revisiones sistemáticas por lo que no se incluyeron en los estudios. Finalmente, 28 estudios cumplieron todos los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en la revisión. En la Figura 5 presenta un diagrama de flujo que resume el proceso de búsqueda y selección desarrollado según el protocolo PRISMA.

Figura 5*Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos*

Estos 28 estudios cumplieron rigurosamente con los criterios de elegibilidad establecidos en el protocolo de revisión. Asimismo, para asegurar la especificidad de la evaluación, se priorizaron estudios que aplicaran exclusivamente en métodos de degradación de cianuro sin considerar la de otros contaminantes.

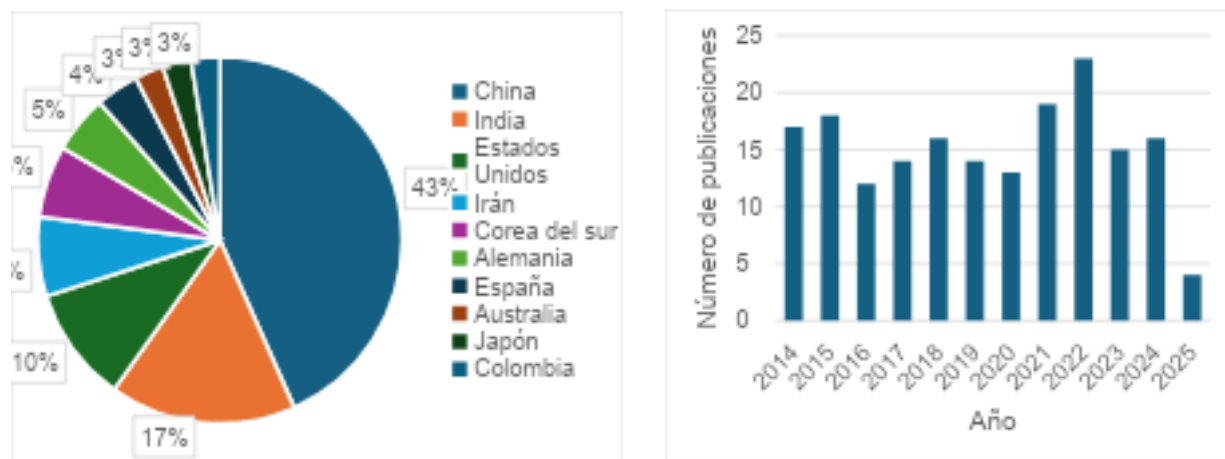
5.2 Análisis Bibliométrico

Para el análisis se seleccionaron 28 artículos en total, los cuales han sido estudiados de forma conjunta, para realizar el análisis bibliométrico el cual es presentado a continuación y ha sido desarrollado con el apoyo de la herramienta VOSviewer.

Los países con más artículos publicados en investigaciones sobre el tema de estudio se pueden evidenciar en la Figura 6-a, donde China es el país con mayor número de contribuciones aportando un 43 % del total de los documentos, su aporte se debe especialmente a la investigación y desarrollo de métodos químicos y biológicos para la eliminación de cianuro en aguas residuales, en el cual se destaca el trabajo de Wanlin Yang et al. (2020) que describe la utilización de la oxidación electroquímica con persulfato para degradar contaminantes orgánicos y cianuro en aguas residuales.

Figura 6

Análisis bibliométrico del número de publicaciones a) por país b) por año



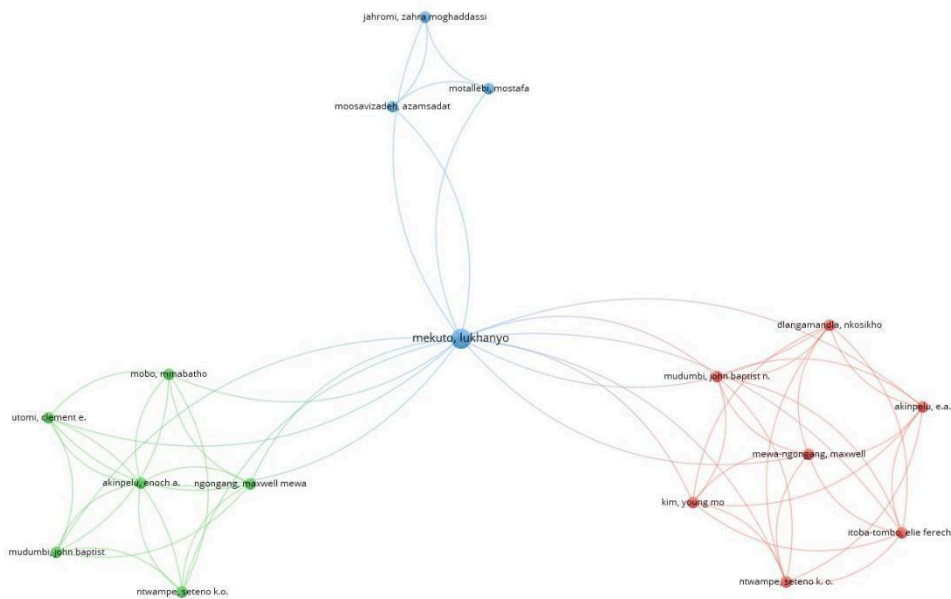
Por otro lado, la Figura 6-b muestra una variación significativa en el número de publicaciones a lo largo del periodo estudiado. Se observa un marcado incremento en los años

2021 y 2022, que representan el mayor volumen de producción científica. Por el contrario, los años 2019 y 2020 presentan una notable disminución en publicaciones, fenómeno que posiblemente refleja el impacto de la pandemia por COVID-19 en las actividades de investigación.

Para el año 2024, los datos corresponden al corte establecido en esta revisión sistemática. Respecto a 2025, se registran solamente 4 artículos publicados, cifra que probablemente se explique porque la información para este año aún está en proceso de recopilación y actualización en las bases de datos académicas.

Figura 7

Autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el tema de estudio



Además, en la Figura 7, se evidencia un par de autores que conectan los dos tópicos principales de la investigación, estos son Mekuto y Lukhanyo, cuyos trabajos se enfocan en los

tratamientos de cianuro y estudios de degradación en aguas principalmente por mecanismos biológicos. Durante el análisis se identifica en total 3 temas centrales distribuidos por conceptos, primero, se observa el tratamiento de cianuro en aguas, representada por los nodos de color verde. Asimismo, aparece el concepto de las técnicas de degradación representada por los nodos de color rojo, por último, se evidencia en los nodos de color azul los conceptos fisicoquímicos o fenómenos propios de degradación.

Seguidamente, se resalta en la Tabla 6, los documentos con mayor número de citas, en la cual se pueden observar las investigaciones más citadas entre los documentos seleccionados, la investigación de Yang et, al. (2020) es un ejemplo destacado de cómo la oxidación electroquímica con persulfato puede ser un método efectivo para degradar contaminantes orgánicos y cianuro en aguas residuales. Asimismo, el caso de Jawale et, al. (2014) donde se estudia la combinación de los métodos físicos y químicos el cual, por medio de la generación de energía física a través de la formación y colapso de burbujas en un fluido, lo que iniciará reacciones químicas de oxidación e hidrólisis para degradar el cianuro. Sus trabajos han contribuido significativamente al campo de estudio de la eliminación de cianuro en aguas residuales, reflejando su papel central en redes de investigación activas o en líneas temáticas prioritarias dentro del campo analizado para el tema estudiado.

Tabla 6

Artículos sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales con más citas.

Documento	Autores	Citas
Persulfate enhanced electrochemical oxidation of highly toxic cyanide-containing organic wastewater using boron-doped diamond anode	(Yang et al., 2020)	58

Documento	Autores	Citas
Treatment of cyanide containing wastewater using cavitation based	(Jawale et al., 2014)	53
Synergic effect of adsorption and biodegradation enhance cyanide removal by immobilized <i>Alcaligenes</i> sp. strain DN25	(Li et al., 2019)	42
Degradation Mechanism of Cyanide in Water Using a UV-LED/H ₂ O ₂ /Cu ²⁺ System	(Kim et al., 2018)	39
Performance of various cyanide degrading bacteria on the biodegradation of free cyanide in water	(Razanamahandry et al., 2019)	31
Photochemical Degradation of Cyanides and Thiocyanates from an Industrial Wastewater	(Mediavilla et al., 2019)	28
Combined treatment based on synergism between hydrodynamic cavitation and H ₂ O ₂ for degradation of cyanide in effluents	(Montalvo et al., 2021)	24

Ahora en la Figura 8, se estudia la relación de conceptos o tópicos principales entre los 28 artículos seleccionados para conocer un panorama del tema de mayor interés y frecuencia en la actualidad. Teniendo en cuenta la relación de conceptos, es posible destacar cómo mediante un análisis de palabras clave el cianuro es el que representa una mayor frecuencia o relación entre los 28 artículos estudiados para este trabajo. Algunas palabras claves como biodegradación, tratamiento de aguas residuales y biorremediación, presentan mayor auge de investigación comparado con otros conceptos en los cuales se puede evidenciar menor actividad. Además, entre los nodos azul, amarillo y verde se encuentran los principales métodos de degradación de cianuro, clasificados en físicos, químicos y biológicos.

Para el nodo rojo se evidencia los conceptos con menor relación entre los artículos estudiados, pero mantienen una relación con términos más próximos debido al tema general que genera una conexión existente, como lo son las diferentes técnicas de gradación de cianuro en aguas, pero, entre el concepto esté más a la periferia de la nube hay una menor relación con el tema de interés de este trabajo cómo es el caso de estudios de purificación de aguas o técnicas de poco interés como los métodos electroquímicos.

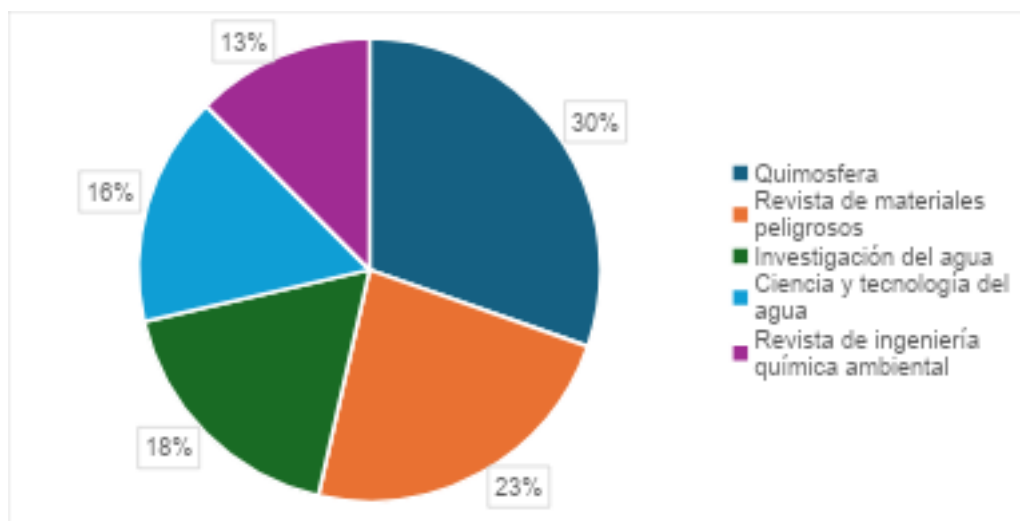
Complementando este análisis el nodo verde que engrosa el concepto de cianuro, hay relación con algunos otros componentes químicos de interés y conceptos sobre todo de tratamientos biológicos como es el empleo de bacterias o biodegradación. Esta se complementa con la zona morada la cual enfatiza en terminología del área de biología y conceptos de tratamientos biológicos.

Finalmente, el nodo amarillo rescata conceptos claves, pero de terminología general en los conceptos mientras el nodo azul aborda tratamientos fisicoquímicos encontrados en la literatura.

presentes en aguas residuales destacando la diversidad de enfoques y métodos utilizados en la investigación de este campo.

Figura 9

Principales fuentes de investigación sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales



5.3 Comparación de los Métodos Reportados para la Degradación de Cianuro Presentes en Aguas Residuales

De acuerdo con estudios previos y según la Tabla 5, resume los métodos con mayor eficiencia de remoción de cianuro en aguas residuales, correlacionando el tipo de cianuro (libre, simples y complejos) con el origen del agua residual.

Para los estudios presentados se evidencia las condiciones óptimas a las cuales el método presenta mayor porcentaje de remoción de cianuro, para el método biológico se presentan algunas opciones eficientes, en la investigación de Kumar et al. (2015) describe dos técnicas,

para la primera se usa un reactor de lecho empacado (PBR) el cual alcanza un 100% de degradación de cianuro gracias al uso de células de *S. marcescens* RL2b operando con un flujo controlado (1.5 ml/h) y tiempo de retención adecuado (9.27 h) en buffer citrato (pH 6.0). la segunda técnica son células libres de *S. marcescens* RL2b logran 99% en 10h, pero sin reutilización y otros microorganismos como *Bacillus sp.* solo alcanzan 69-89% de degradación. El PBR supera a todos con un 100% de eficiencia gracias a su diseño optimizado, permitiendo reutilización y mayor escalabilidad.

Por otra parte, el estudio realizado por Supromin et al. (2024) presenta dos sistemas innovadores para la remoción de cianuro mediante degradación enzimática utilizando microorganismos específicos. El primer sistema emplea *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 y *Pseudomonas montellii* SUTS 2 en condiciones aeróbicas, donde el mecanismo de degradación se basa en la acción oxidativa de monooxigenasas y dioxigenasas. Este método demostró una eficiencia notable, alcanzando un 96.67% de degradación del cianuro en un período de 7 días, con un nivel residual de 0.15 mg/L. Por otro lado, el segundo sistema utiliza *Agrobacterium tumefaciens* y *Pseudomonas montellii* SUTS 2 en condiciones anóxicas, empleando un mecanismo de reducción en ausencia de oxígeno. Este enfoque mostró también una alta eficiencia, con un 89.75% de degradación en el mismo período de tiempo, aunque con un nivel residual ligeramente superior (0.29 mg/L); El sistema aeróbico (0.15 mg/L) cumple con el límite de la USEPA (0.2 mg/L), pero supera el estándar colombiano (0.1 mg/L, Resolución 0631/2015). Se requieren ajustes para cumplir con la normativa local.

El reactor de lecho empacado (PBR) con *S. marcescens* RL2b se establece como el método biológico más efectivo para la remoción de cianuro, siendo su eficiencia del 100% en la

degradación de cianuro su flujo continuo (1.5 mL/h) con un tiempo de retención hidráulica de 9.27 horas permite una operación estable y eficiente. Su capacidad de reutilización celular es atractiva para aplicaciones industriales, si bien el efluente tratado presenta un residual de cianuro de 0,78 mg/L, con ajustes al tiempo de retención hidráulica para maximizar el contacto bacteriano y con la implementación de un post – tratamiento (método físico, como la adsorción con carbón activado) se podría garantizar un residual de cianuro <0.1 mg/L para el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 de Colombia.

Tabla 7

Reporte de los métodos que presentan mayor porcentaje de degradación de cianuro en diferentes aguas residuales.

Autor	Técnica	Tipo de cianuro	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia de degradación
(Supromi et al., 2024)	Biorremediación	Cianuro complejo	Aguas residuales de galvanoplastia	pH 6.0 - 7.0, fuente de carbono: glucosa (500 mg/L), Degradación enzimática: Agrobacterium tumefaciens SUTS 1 y Pseudomonas montellii SUTS 2, los tiempos de operación para ambos sistemas son de 7 días.	Aeróbico: 96,67 % Anóxico: 89,75 %
(Vargas et al., 2024)	Oxidación fotocatalítica	Cianuro libre	Aguas industriales de Galvanoplastia	Reactivo: 200 mL de solución de cianuro libre (100 ppm, pH 10.5). Catalizador: 20 mg de BiVO ₄ (sintetizado por hidrotermal o sol-gel).	Sol-gel BiVO ₄ : 100% Hidrotermal BiVO ₄ : 100%

Autor	Técnica	Tipo de cianuro	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia de degradación
				<p>Pre-tratamiento: Sonicación durante 30 min en oscuridad. Oxidación: Fuente de luz: Lámpara de 1000 W (luz visible). Ozono: Generado por un equipo Biozon OZC-0.5 GB. Tiempo de reacción: Sol - gel BiVO₄: 15 min, Hidrotermal BiVO₄: 24 min Control de temperatura: Sistema de recirculación de agua</p>	
(Mediavilla et al., 2019)	Oxidación fotoquímica	Cianuro total	Efluente de una fábrica de coque.	<p>Fotodegradación Directa (sin catalizador); Fuentes de luz: Lámpara UVC: 254 nm, 26 mW/cm². Luz solar simulada (SimSolar): 200–800 nm, 190 mW/cm² (lámpara de xenón). Reactor batch de 500 mL. Volumen de muestra: 200–500 mL. Tiempo de irradiación: 4 horas. Temperatura: Ambiente (25 °C). Oxígeno: Suministrado por</p>	Cianuro (CN ⁻): 100% en 4 h (UVC)

Autor	Técnica	Tipo de cianuro	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia de degradación
				flujo continuo de aire. <hr/> Fotocatálisis Heterogénea (con TiO ₂) Catalizador: TiO ₂ comercial (P25 de Evonik). Dosis de catalizador: 250 mg/L. Fuente de luz: Luz solar simulada (SimSolar). Pre-adsorción en oscuridad: 20 min antes de la irradiación. Filtración post-tratamiento: Membrana de nylon 0.45 µm.	cianuro (CN ⁻): 100% en 6 h (SimSolar). Tiocianato (SCN ⁻): 70% en (SimSolar), 100% en 5 h (SimSolar + TiO ₂).
(Kumar et al., 2015)	biotecnológica	Cianuro libre	Aguas residuales simuladas	Buffer fosfato (pH 6.0), 35 °C <hr/> Célula en reposo <hr/> Tiempo de Degradación: 10 h <hr/> Columna de 20 × 1.7 cm, flujo 1.5 ml h ⁻¹ <hr/> Reactores de Lecho Empacado (PBR) Concentración de cianuro: 12 mmol l ⁻¹ <hr/> Tiempo de Degradación: 10 horas (depende del flujo)	99% <hr/> 100%

Autor	Técnica	Tipo de cianuro	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia de degradación	
(Yang et al., 2020)	Oxidación electroquímica	Cianuro complejo	Aguas residuales de industrias químicas o mineras	Oxidación Electroquímica-Persulfato (EO-PS) PS: 0.1 M	Electrodo: BDD + acero inoxidable Corriente (mA/cm ²): 10–30 (óptimo: 10) pH óptimo 5.6 Temperatura óptima: 40 °C Tiempo de tratamiento 24 h Energía consumida: 41.6 kWh/m ³ ·orden	>95% con bajo consumo energético.
		Cianuro libre y simple	Efluentes de minería de oro y plata.	EO (sin PS)	Electrodo: BDD + acero inoxidable Corriente (mA/cm ²): 20 pH óptimo 5.6 Temperatura óptima 20 °C Tiempo de tratamiento 24 h Energía consumida: 245.4 kWh/m ³ ·orden	94–99% (para CN ⁻ libre)

Seguidamente, en los estudios sobre métodos electroquímicos para la degradación de cianuro que se presentan en la investigación de Yang et al. (2020), se evaluaron tres sistemas de tratamiento. El método de Oxidación Electroquímica con Persulfato (EO-PS), realizado con un ánodo de diamante dopado con boro (BDD), corriente de 10 mA/cm², pH 5.6 y temperatura de 40°C, mostró una remoción del 98.4% del cianuro en 24 horas, junto con una eliminación del 95.8% de la demanda química de oxígeno (DQO) y 87.8% del carbono orgánico total (COT). Asimismo, este sistema presentó un bajo consumo energético de apenas 41.6 kWh/m³·orden,

demostrando ser altamente eficiente para el tratamiento simultáneo de cianuro y compuestos orgánicos complejos.

En comparación, el método de Oxidación Electroquímica tradicional (EO) sin persulfato, que emplea el mismo ánodo BDD pero con mayor densidad de corriente (20 mA/cm^2), logró una eficiencia menor (82.3% de DQO) con un consumo energético significativamente mayor ($245.4 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{orden}$), lo que lo hace menos viable económicamente. Finalmente, el tratamiento solo con Persulfato (PS) mostró la menor eficacia, con solo 36.9% de remoción de DQO, confirmando que requiere ser combinado con otros procesos para ser efectivo.

Los estudios de los métodos físicos con mayor eficiencia de degradación de cianuro presentaron una eficiencia menor a 65% (VER APENDICE F). En el estudio de Jawale et al. (2014) sobre el tratamiento de aguas residuales con cianuro mediante cavitación, se comparan dos enfoques tecnológicos. Para el método de cavitación acústica, se empleó un reactor ultrasónico operando a 22 kHz con un horno de 750W, trabajando en condiciones óptimas de pH 2, temperatura de 30°C y una relación molar 1:5 de $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6:\text{H}_2\text{O}_2$. Este sistema logró una degradación del 61.22% en 80 minutos, logrando una concentración residual de 0.15 mg/L de cianuro, mediante un mecanismo combinado de pirólisis térmica y ataque por radicales $\text{OH}\cdot$.

Finalmente, Estrada et al. (2020) en su investigación experimental utilizando la técnica de adsorción y empleando carbón activado con peróxido de hidrógeno, obtuvo una remoción del 99.95% logrando una concentración final de 0,56 mg/L reportando que las condiciones más eficaces fueron a temperatura 35°C , con un tiempo de reacción de 4 h y pH 9.0. Sin embargo, Halet et al. (2015) en su análisis a nivel laboratorio obtuvo una concentración final de 20,04 mg CN-/g a 20°C empleando también carbón activo; con un tiempo de reacción de 2 h y un pH de

10,8 a 11,0 refiriendo que la baja capacidad de adsorción se debería a un débil mecanismo de adsorción entre carbón y cianuro.

6. Desafíos y Análisis del TRL

Inicialmente se clasificaron los métodos encontrados en la revisión; siendo cinco los principales tratamientos para la degradación de cianuro en aguas residuales, los cuales se pueden evidenciar en la Tabla 8, posteriormente se evaluaron los tratamientos siguiendo los diferentes niveles de TRL. (Ver Apéndice E)

Tabla 8

Niveles TRL de diferentes tratamientos para la degradación de cianuro

Tipo de tratamiento	TRL	Fortaleza	Limitaciones
Biológicos	4 a 5	Bajo costo, sostenible	Lento, sensible a pH (7.5 – 9.0)/ temperaturas(25 – 35°C)
Electroquímicos	4 a 5	Alta eficiencia (>90%)	Alto consumo energetico
Fisicoquímicos	7 a 8	Tecnología madura	Generación de residuos sólidos
Fotoquímicos	4 a 5	Sin químicos adicionales	Escalabilidad compleja
Químicos	7 a 8	Rápido, aplicable a altas concentraciones	Subproductos tóxicos

Para establecer una clasificación adecuada del nivel de madurez tecnológica de los métodos de degradación de cianuro, se consideraron las condiciones de operación, escala de los ensayos y grado de implementación práctica reportados en la literatura científica. En el caso de la oxidación fotocatalítica, se encontraron estudios que documentan ensayos experimentales en condiciones de laboratorio utilizando tanto luz UV natural simulada como fuentes UV artificiales de mayor intensidad. Los experimentos por lotes con radiación UV ambiente emplearon

pequeños volúmenes (100 mL) en matraces de cuarzo, mientras que otras investigaciones utilizaron un reactor discontinuo de 3,3 L con recirculación y una lámpara UV residencial de 254 nm, de fácil acceso comercial (Vuono et, al. 2021). Estos avances sugieren una evolución desde la fase inicial de laboratorio hacia configuraciones experimentales más robustas y cercanas al pilotaje, lo que justifica su clasificación en un TRL de 4 a 5.

Asimismo, se evaluaron tecnologías basadas en cavitación acústica e hidrodinámica. En el caso de la cavitación acústica, los ensayos se realizaron con una bocina ultrasónica de 22 kHz y 750 W, en volúmenes operativos de hasta 300 mL. Por otro lado, la cavitación hidrodinámica se implementó en un circuito de bucle cerrado con un venturi y una bomba de 1,1 kW, tratando volúmenes de hasta 5 L (Jawale et, al. 2014). La existencia de configuraciones semi-continuas y el uso de equipos comerciales sugieren que estas tecnologías también se encuentran en un estado de desarrollo intermedio, lo que respalda su clasificación dentro del mismo rango de TRL (4 a 5).

Por otro lado, en cuanto a la electro-biodegradación utilizando *Bacillus pumilus*, los estudios reportados fueron realizados exclusivamente en condiciones de laboratorio, utilizando como medio de cultivo soluciones estándar de cianuro (1000 mg/L) preparadas 1,88 g de Cianuro de sodio (NaCN) seco de grado reactivo a un matraz volumétrico de 1 litro y diluyendo con agua destilada (Ojaghi et, al. 2018). Este enfoque, aunque prometedor, se mantiene en una fase temprana de desarrollo tecnológico, correspondiente a un TRL de 3 a 4. Su aplicación se limita a entornos controlados, sin validación aún en condiciones reales o a nivel piloto, lo que restringe su nivel de madurez.

Para el caso de la biodegradación el éxito depende de la presencia de microbios con las capacidades fisiológicas y metabólicas para degradar los contaminantes en el ambiente contaminado, las concentraciones de cianuros dentro de un suelo o agua pueden tener un impacto

significativo en la biodegradación; presentando diversos desafíos como la disponibilidad del carbono, el cual se identificó como un factor limitante en la degradación microbiana de cianuros metálicos, lo que puede prevenir la biorremediación de suelos contaminados industrialmente (Baxter et al., 2006). La biorremediación de cianuro en todo tipo de aguas residuales no es viable debido a las condiciones ambientales extremas (pH bajo o alto, toxicidad de otros contaminantes) que presentan para los microorganismos (Kao et al. 2006). Se están realizando investigaciones continuas para evaluar la capacidad de degradación de nuevos microorganismos para diversos compuestos de cianuro presentes en los residuos, tanto en condiciones de laboratorio como de campo, estos hallazgos respaldan la conclusión de que esta tecnología se encuentra en una etapa temprana de desarrollo (Ebbs, S. 2004).

Uno de los principales desafíos del método electroquímico es la complejidad de los procesos electroquímicos, que pueden ser difíciles de controlar y predecir. Esto se debe a que los procesos involucran la transferencia de electrones y la formación de especies químicas intermedias, lo que puede llevar a reacciones secundarias no deseadas y a la formación de subproductos. Otro desafío es la selección del electrodo adecuado, ya que la naturaleza y la superficie del electrodo pueden influir significativamente en la eficiencia y la selectividad de la reacción electroquímica. Esta técnica ha logrado desarrollar métodos eficaces, aunque aún se requiere investigación adicional para mejorar su escalabilidad (Navarro et al., 2011)

Por otra parte, los métodos fotoquímicos para la degradación de cianuro presentan avances basados en la generación de radicales oxidantes mediante radiación electromagnética, particularmente la luz ultravioleta (UV), estos procesos dependen estrechamente del pH del agua lo que termina siendo un gran desafío, además de la eficiencia para generar radicales oxidantes los cuales depende de la absorción de luz ultravioleta por los catalizadores. (Deng et al., 2015).

La escalabilidad y los costos de implementación son factores determinantes en la aplicación de estos métodos a nivel industrial. Para que la tecnología sea viable, es necesario diseñar reactores fotoquímicos eficientes que maximicen la exposición a la luz UV. Además, los costos asociados con la instalación y mantenimiento de fuentes de luz UV, así como la regeneración o reemplazo de catalizadores, pueden ser elevados. La optimización de los parámetros operacionales y la integración con otros tratamientos podrían mejorar la viabilidad económica del proceso. (Kim et al., 2018)

7. Conclusiones

La degradación de cianuro es un tema crítico en el ámbito ambiental e industrial, dada a su toxicidad y persistencia en las aguas residuales. A partir de la revisión sistemática mediante el uso del protocolo PRISMA, se logró identificar una amplia gama de métodos empleados para la degradación de cianuro en aguas residuales, abarcando técnicas físico-químicos, biológicas y avanzadas. Tras un análisis comparativo de la eficiencia reportada en distintas condiciones experimentales, se concluye que los métodos biológicos, particularmente aquellos basados en microorganismos específicos, destacan por su sostenibilidad y eficacia, aunque su desempeño depende de variables como pH, temperatura y concentración inicial de cianuro.

El análisis bibliométrico reveló una tendencia creciente en la publicación de investigaciones relacionadas con la degradación de cianuro. Se identificaron los países y autores más prolíficos y los métodos más investigados. Resaltando a China como el país con una contribución notable para el campo estudiado, representando el 43% del total de los artículos publicados en una ventana de tiempo de diez años, desde el año 2014 hasta el 2025. Esta información permitió contextualizar el desarrollo científico y tecnológico en torno a este campo,

resaltando la colaboración internacional y el enfoque multidisciplinario como claves para el avance en esta área.

Entre los principales desafíos actuales en los procesos de degradación de cianuro destacan la eficiencia del tratamiento en condiciones reales (con matrices complejas y altas concentraciones), la generación de subproductos tóxicos en algunos métodos químicos, y la escalabilidad de las soluciones biológicas, estos desafíos dependen de cada método según el contexto de uso específico. Además, se identificó una necesidad urgente de optimizar los procesos existentes y desarrollar tecnologías híbridas que integren los beneficios de múltiples enfoques, con un enfoque hacia la sostenibilidad y la regulación ambiental. Los estudios analizados demuestran que la selección del método más eficiente para la remoción de cianuro depende de múltiples factores incluyendo el tipo de cianuro presente, los requerimientos normativos y consideraciones económicas.

Referencias Bibliográficas

- A. Akcil, (2003). Destruction of cyanide in gold mill effluents: biological versus chemical
- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitrón, G., Thangarasu- Sarasvathi, P. & Rosano-Ortega, G. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide: a review. *J. Mater. Res. Technol.* 12, 1418–1433
- Alvillo-Rivera, A., Garrido-Hoyos, S., Buitrón, G., Thangarasu-Sarasvathi, P., & Rosano-Ortega, G. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1418–1433. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.03.030>
- Atkins, P.&De Paula, J. (2014). Anintroduction to solid surfaces. In: *Physical Chemistry: Thermodynamics, Structure, and Change*, 938–939 Oxford University Press, Oxford,
- Baxter, J., Cummings, S. (2006). Aplicaciones actuales y futuras de microorganismos en la biorremediación de la contaminación por cianuro. *Antonie Van Leeuwenhoek*. <https://doi.org/10.1007/s10482-006-9057-y>
- Behnami, A., Croué, J. P., Aghayani, E., & Pourakbar, M. (2021). A catalytic ozonation process using MgO/persulfate for degradation of cyanide in industrial wastewater: Mechanistic interpretation, kinetics and by-products. *RSC Advances*, 11(58), 36965–36977. <https://doi.org/10.1039/d1ra07789a>
- C.A. Young, T.S. Jordan, (1995). Cyanide remediation: current and past technologies, in: *Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Res*, pp. 104–129.

- Chen, A. et al. (2023). Function and direction of cyanide in coking wastewater: from water treatment to environmental migration. *ACS EST Water* 3, 3980–3991
- Chen, C. P., Chen, Y. M., Nguyen, T. N. A., Chou, S. S., & Huang, C. (2024). Effective treatment of cyanide containing coking wastewater by catalytic ozonation with a novel ruthenium-supported catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114356>
- Chen, Y., Song, Y., Chen, Y., Zhang, X., & Lan, X. (2020). Comparative experimental study on the harmless treatment of cyanide tailings through slurry electrolysis. *Separation and Purification Technology*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117314>
- Correa Marín, H., & Neyra Medina, P. (2019). Cinética de oxidación del cianuro libre en agua por aplicación de ozono (Tesis para optar el Título de Ingeniero Ambiental y Prevención de Riesgos). Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca. Recuperado de <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/967/CIN%C3%89TICA%20DE%20OXIDACION%20DEL%20CIANURO%20LIBR>
- Dell' Anno, F. et al. (2021). Bacteria, fungi and microalgae for the bioremediation of marine sediments contaminated by petroleum hydrocarbons in the omics era. *Microorganisms* 9, 1695
- Deng, Y. & Zhao, R. (2015). Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- Dhongade, S., Meher, A. K. & Mahapatra, S. (2022). Removal of free cyanide (CN⁻) from water and wastewater using activated carbon: a review, 355–379 https://doi.org/10.1007/978-981-19-1847-6_15

- Dhongade, S., Meher, A. K. & Mahapatra, S. (2022). Removal of free cyanide (CN⁻) from water and wastewater using activated carbon: a review, 355–379
https://doi.org/10.1007/978-981-19-1847-6_15
- Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., & Lu, D. (2021). *Efficient degradation of cyanide in gold mine tailings via alkaline chlorination: Industrial applications and environmental benefits*. *Journal of Cleaner Production*, 302, 126946.
- Ebbs, S. (2004). Biological degradation of cyanide compounds. In *Current Opinion in Biotechnology* (Vol. 15, Issue 3, pp. 231–236).
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2004.03.006>
- Estrada, C., Galeano, N., & Restrepo, G. (2020). Evaluation of cyanide and heavy metals removal in liquid effluents from small mining's gold benefit, by adsorption with activated carbon and hydrogen peroxide in Segovia, Antioquia. *Dyna, Revista de la Facultad de Minas*, 87(212), 9–17. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.79716>
- Freitas, J., & Horta, D. (2023). Impacts of cyanide in gold mining and cyanide removal methodologies in liquid waste from gold processing. *Revista de Metalurgia*, 59(3).
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.247>
- Guarnizo Ruiz, J. D., & Saa Cardona, L. N. (2022). Análisis de alternativas para la remoción del cianuro presente en los efluentes de los relaves de minas auríferas, Trabajo de grado especialización. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- H. A. García-Perdomo, «Conceptos fundamentales de las revisiones sistemáticas/metaanálisis», *Urología Colombiana*, vol. 24, n.o 1. Elsevier Doyma, pp. 28-34, 1 de abril de 2015. doi: 10.1016/j.uroco.2015.03.005.

- Halet, F., Yeddou, A. R., Chergui, S., Nadjemi, B., & Ould-Dris, A. (2015). Eliminación de cianuro de soluciones acuosas por adsorción en carbón activado preparado a partir de subproductos lignocelulósicos. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35(12), 1736–1741. <https://doi.org/10.1080/01932691.2015.1005311>
- Huda, M. F. & Helmy, Q. (2021). Removal of cyanide from alumina smelter wastewater using precipitation and filtration technique. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 896, 012075
- Jaramillo-Fierro, X. & León, R. (2023). Effect of doping TiO₂ NPs with lanthanides (La, Ce and Eu) on the adsorption and photodegradation of cyanide—a comparative study. *Nanomaterials* 13, 1068.
- Jaramillo-Fierro, X., Cuenca, G., & Ramón, J. (2023). Comparative Study of the Effect of Doping ZnTiO₃ with Rare Earths (La and Ce) on the Adsorption and Photodegradation of Cyanide in Aqueous Systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(4). <https://doi.org/10.3390/ijms24043780>
- Jawale, R. H., Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2014). Treatment of cyanide containing wastewater using cavitation based approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(4), 1392–1399. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.01.025>
- Kao, CM, Chen, KF, Liu, JK *et al.*(2006). Degradación enzimática de nitrilos por *Klebsiella oxytoca* . *Appl Microbiol Biotechnol* <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0129-0>
- Khodadad, A., Teimoury, P., Abdolahi, M., & Samiee, A. (2008). Desintoxicación de cianuro en aguas de relaves de una planta procesadora de oro utilizando hipoclorito de calcio y sodio [Detoxification of cyanide in gold processing plant tailings water using calcium and sodium hypochlorite]. *Mine Water and the Environment*, 27, 127-127.

- Kim, T. K. et al. (2018). Degradation mechanism of cyanide in water using a UV LED/H₂O₂/Cu²⁺ system. *Chemosphere* 208, 441–449
- Kolade, M., et al. (2016). Estudios sobre el mecanismo de bloqueo de poros y la viabilidad técnica de un proceso híbrido PAC-MF para la recuperación de agua de riego a partir de POME biotratado. *Ciencia y tecnología de la separación*, 51, 2047-2061. doi:10.1080/01496395.2016.1192192
- Kumar, V., Kumar, V., & Bhalla, T. C. (2015). Packed bed reactor for degradation of simulated cyanide-containing wastewater. *3 Biotech*, 5(5), 641-646. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0261-6>
- Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.05.027>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), e1–e34. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.06.006>
- Luque-Almagro, V. M. et al. (2018). Exploring anaerobic environments for cyanide and cyano derivatives microbial degradation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 102, 1067
- Lv, C., Ding, J., Qian, P., Li, Q., Ye, S., & Chen, Y. (2015). Comprehensive recovery of metals from cyanidation tailings. *Minerals Engineering*, 70, 141-147.
- Martín, A., Arias, J., López, J., Santos, L., Venegas, C., Duarte, M., Ortíz-Ardila, A., de Parra, N., Campos, C., & Zambrano, CC (2020). Evaluación del Efecto de la Minería de Oro

- sobre la Calidad del Agua en Monterrey, Bolívar (Colombia). *Agua*, 12 (9), 2523.
<https://doi.org/10.3390/w12092523>
- Mego Estela, E. (2016). Evaluación de la oxidación química con peróxido de hidrógeno y ósmosis inversa en el tratamiento de efluentes de minera Coimolache (Maestría en Desarrollo y Medio Ambiente). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca. Recuperado de <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/1301/TESIS%20MAESTRIA%20ENRIQUE%20MEGO%20Rev.3%20%28LDE%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2010). Documento de tipología de proyectos.
- Mudarra, J. (2016). Efectos del carbón activado de la cáscara de coco, reforzado con iones cúpricos, en la remoción de soluciones cianuradas (Tesis para optar el Título de Ingeniero Ambiental). Universidad Cesar Vallejo, Trujillo. Recuperado de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/6880/mudarra_vj.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Nava Alonso, F., Elorza Rodriguez, E., Uribe Salas, A., & Pérez Garibay, R. (2007). Chemical analysis of cyanide in cyanidation process: Review of methods. *Revista de Metalurgia*, 43(2), 8.
<https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/48/48>
- Ojaghi, A., Tonkaboni, S. Z. S., Shariati, P., & Doulati Ardejani, F. (2018). Novel cyanide electro-biodegradation using *Bacillus pumilus* ATCC 7061 in aqueous solution. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16(2), 99–108.
<https://doi.org/10.1007/s40201-018-0289-3>

Procuraduría General de la Nación (2024). Informe nacional: minería ilegal y contaminación por Mercurio en Colombia.

<https://www.procuraduria.gov.co/Documents/2024/Diciembre%202024/Informe%20Nacional%20Miner%c3%ada%20Ilegal%20y%20Contaminaci%c3%b3n%20por%20Mercurio%20en%20Colombia%20%281%29.pdf>

Química de México México Felix-Navarro, S., María, R., Lin, W., Aqueous Solutions, E., María Felix-Navarro, R., Wai Lin, S., Violante-Delgadillo, V., Zizumbo-Lopez, A., & Perez-Sicairos, S. (2011). Cyanide Degradation by Direct and Indirect Electrochemical Oxidation in Electro-active Support Cyanide Degradation by Direct and Indirect Electrochemical Oxidation in Electro-active Support Electrolyte Aqueous Solutions Article. In *Journal of the Mexican Chemical Society* (Vol. 55, Issue 1). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47521267009>

Rangel-González, M. G., Solís-Domínguez, F. A., Herrera-Martínez, A., Carrillo-González, R., López-Luna, J., del Carmen Angeles González-Chávez, M., & Rodríguez, M. D. (2024). Cyanide biodegradation: a scoping review. In *International Journal of Environmental Science and Technology*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05885-1>

Razanamahandry, L. C., Andrianisa, H. A., Karoui, H., Kouakou, K. M., & Yacouba, H. (2016). Biodegradation of free cyanide by bacterial species isolated from cyanide-contaminated artisanal gold mining catchment area in Burkina Faso. *Chemosphere*, 157, 71–78. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2016.05.020>

Rivera, A., et al. (2021). Biological treatment for the degradation of cyanide: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1418-1433. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.030

- Sánchez-Serrano, S., Pedraza-Navarro, I., & Donoso-González, M. (2022). How to conduct a systematic review under PRISMA protocol? Uses and fundamental strategies for its application in the educational field through a practical case study. *Bordon. Revista de Pedagogía*, 74(3), 51–66. <https://doi.org/10.13042/Bordon.2022.95090>
- Srivastava, A. C. & Duvvuru Muni, R. R. (2010). Phytoremediation of cyanide. In: *Plant Adaptation and Phytoremediation* 399–426, https://doi.org/10.1007/978-90-481-9370-7_18 (Springer Netherlands, Dordrecht).
- Supromin, N., & Potivichayanon, S. (2024). Bioremediation of metal cyanide complexes from electroplating wastewater for long-term application using *Agrobacterium tumefaciens* SUTS 1 and *Pseudomonas monteilli* SUTS 2.3 *Biotech*, 14(1), 283. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-04122-3>
- Tran, Q. B., Lohitnavy, M., & Phenrat, T. (2019). Assessing potential hydrogen cyanide exposure from cyanide-contaminated mine tailing management practices in Thailand's gold mining. *Journal of Environmental Management*, 249, Article 109357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109357>
- treatments, *Biotechnol. Adv.* 21 501–511.
- Vargas-Rueda, J. A., Alonso, A. R., Luna-Sánchez, R. M., Lartundo-Rojas, L., & Cabrera-Sierra, R. (2024). Enhanced Cyanide Oxidation to Cyanate via Photocatalytic Ozonation: Comparing Sol–Gel and Hydrothermal Synthesis of BiVO₄ Catalysts. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(12). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07637-w>
- Vuono, D. C., Vanneste, J., Figueroa, L. A., Hammer, V., Aguilar-Huaylla, F. N., Malone, A., Smith, N. M., Garcia-Chevesich, P. A., Bolaños-Sosa, H. G., Alejo-Zapata, F. D., Polanco-Cornejo, H. G., & Bellona, C. (2021). Photocatalytic advanced oxidation

- processes for neutralizing free cyanide in gold processing effluents in arequipa, southern peru. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179873>
- Y.B. Patil, K.M. Paknikar, (2000). Development of a process for biot detoxification of metal cyanides from wastewater, *Process Biochem.* 35 1139–1151.
- Yang, W, ., Liu, G., Chen, Y., Miao, D., Wei, Q., Li, H., Ma, L., Zhou, K., Liu, L., & Yu, Z. (2020). Persulfate enhanced electrochemical oxidation of highly toxic cyanide-containing organic wastewater using boron-doped diamond anode. *Chemosphere* 252, 126499. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126499>
- Zhang, S., Tao, H., & Li, X. (2015). Estudio sobre las características y los métodos de eliminación segura de escorias de cianuración en Yunnan [Study on the characteristics and safe disposal methods of one cyanidation slag in Yunnan]. *Yunnan Metallurgy*, 44, 40-43.
- Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2021). *Iron recovery from cyanide tailings by adsorption on activated carbon: A case study of Yanacocha Mine, Peru.* *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124215.

Apéndices

Apéndice A

Lista de verificación metodología PRISMA 2020

Sección/tema	ítem n.º	ítem de la lista de verificación
TÍTULO		
Título	1	Identifique la publicación como una revisión sistemática
RESUMEN		
Resumen estructurado	2	Vea la lista de verificación para resúmenes estructurados de la declaración PRISMA 2020
INTRODUCCIÓN		
Justificación	3	Describa la justificación de la revisión en el contexto del conocimiento existente
Objetivos	4	Proporcione una declaración explícita de los objetivos o las preguntas que aborda la revisión
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especifique los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis
Fuentes de información	6	Especifique todas las bases de datos, registros, sitios web, organizaciones, listas de referencias y otros recursos de búsqueda o consulta para identificar los estudios. Especifique la fecha en la que cada recurso se buscó o consultó por última vez.
Estrategia de búsqueda	7	Presente las estrategias de búsqueda completas de todas las bases de datos, registros y sitios web, incluyendo cualquier filtro y los límites utilizados.
Proceso de selección de los estudios	8	Especifique los métodos utilizados para decidir si un estudio cumple con los criterios de inclusión de la revisión, incluyendo cuántos autores de la revisión cribaron cada registro y cada publicación recuperada, si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización en el proceso.

Sección/tema	ítem n.º	ítem de la lista de verificación
Proceso de extracción de los datos	9	Indique los métodos utilizados para extraer los datos de los informes o publicaciones, incluyendo cuántos revisores recopilaron datos de cada publicación, si trabajaron de manera independiente, los procesos para obtener o confirmar los datos por parte de los investigadores del estudio y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.
Lista de los datos	10a	Enumere y defina todos los desenlaces para los que se buscaron los datos. Especifique si se buscaron todos los resultados compatibles con cada dominio del desenlace (por ejemplo, para todas las escalas de medida, puntos temporales, análisis) y, de no ser así, los métodos utilizados para decidir los resultados que se debían escoger.
	10b	Enumere y defina todas las demás variables para las que se buscaron datos (por ejemplo, características de los participantes y de la intervención, fuentes de financiación). Describa todos los supuestos formulados sobre cualquier información ausente (missing) o incierta.
Evaluación del riesgo de sesgo de los estudios individuales	11	Especifique los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo de los estudios incluidos, incluyendo detalles de las herramientas utilizadas, cuántos autores de la revisión evaluaron cada estudio y si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.
Medidas del efecto	12	Especifique, para cada desenlace, las medidas del efecto (por ejemplo, razón de riesgos, diferencia de medias) utilizadas en la síntesis o presentación de los resultados.

Sección/tema	ítem n.º	ítem de la lista de verificación
Métodos de síntesis	13a	Describa el proceso utilizado para decidir qué estudios eran elegibles para cada síntesis (por ejemplo, tabulando las características de los estudios de intervención y comparándolas con los grupos previstos para cada síntesis (ítem n.º5).
	13b	Describa cualquier método requerido para preparar los datos para su presentación o síntesis, tales como el manejo de los datos perdidos en los estadísticos de resumen o las conversiones de datos.
	13c	Describa los métodos utilizados para tabular o presentar visualmente los resultados de los estudios individuales y su síntesis.
	13d	Describa los métodos utilizados para sintetizar los resultados y justifique sus elecciones. Si se ha realizado un metanálisis, describa los modelos, los métodos para identificar la presencia y el alcance de la heterogeneidad estadística, y los programas informáticos utilizados.
	13e	Describa los métodos utilizados para explorar las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios (por ejemplo, análisis de subgrupos, meta regresión).
	13f	Describa los análisis de sensibilidad que se hayan realizado para evaluar la robustez de los resultados de la síntesis.
Evaluación del sesgo en la publicación	14	Describa los métodos utilizados para evaluar el riesgo de sesgo debido a resultados faltantes en una síntesis (derivados de los sesgos en las publicaciones)
Evaluación de la certeza de la evidencia	15	Describa los métodos utilizados para evaluar la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace.
RESULTADOS		
Selección de los estudios	16a	Describa los resultados de los procesos de búsqueda y selección, desde el número de registros identificados en la búsqueda hasta el número de estudios incluidos en la revisión, idealmente utilizando un diagrama de flujo.

Sección/tema	ítem n.º	ítem de la lista de verificación
	16b	Cíte los estudios que aparentemente cumplieran con los criterios de inclusión, pero que fueron excluidos, y explique por qué fueron excluidos.
Características de los estudios	17	Cíte cada estudio incluido y presente sus características.
Riesgo de sesgo de los estudios individuales	18	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo para cada uno de los estudios incluidos.
Resultado de los estudios individuales	19	Presente, para todos los desenlaces y para cada estudio: a) los estadísticos de resumen para cada grupo (si procede) y b) la estimación del efecto y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza), idealmente utilizando tablas estructuradas o gráficos.
Resultados de la síntesis	20a	Para cada síntesis, resuma brevemente las características y el riesgo de sesgo entre los estudios contribuyentes.
	20b	Presente los resultados de todas las síntesis estadísticas realizadas. Si se ha realizado un metanálisis, presente para cada uno de ellos el estimador de resumen y su precisión (por ejemplo, intervalo de credibilidad o de confianza) y las medidas de heterogeneidad estadística. Si se comparan grupos, describa la dirección del efecto.
	20c	Presente los resultados de todas las investigaciones sobre las posibles causas de heterogeneidad entre los resultados de los estudios.
	20d	Presente los resultados de todos los análisis de sensibilidad realizados para evaluar la robustez de los resultados sintetizados.
Sesgos en la publicación	21	Presente las evaluaciones del riesgo de sesgo debido a resultados faltantes (derivados de los sesgos de las publicaciones) para cada síntesis evaluada.
Certeza de la evidencia	22	Presente las evaluaciones de la certeza (o confianza) en el cuerpo de la evidencia para cada desenlace evaluado.
DISCUSIÓN		

Sección/tema	ítem n.º	ítem de la lista de verificación
Discusión	23a	Proporcione una interpretación general de los resultados en el contexto de otras evidencias.
	23b	Argumente las limitaciones de la evidencia incluida en la revisión.
	23c	Argumente las limitaciones de los procesos de revisión utilizados.
	23d	Argumente las implicaciones de los resultados para la práctica, las políticas y las futuras investigaciones.
OTRA INFORMACIÓN		
Registro y protocolo	24a	Proporcione la información del registro de la revisión, incluyendo el nombre y el número de registro, o declare que la revisión no ha sido registrada.
	24b	Indique dónde se puede acceder al protocolo, o declare que no se ha redactado ningún protocolo.
	24c	Describa y explique cualquier enmienda a la información proporcionada en el registro o en el protocolo.
Financiación	25	Describa las fuentes de apoyo financiero o no financiero para la revisión y el papel de los financiadores o patrocinadores en la revisión.
Conflicto de intereses	26	Declare los conflictos de intereses de los autores de la revisión.
Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales.	27	Especifique qué elementos de los que se indican a continuación están disponibles al público y dónde se pueden encontrar: plantillas de formularios de extracción de datos, datos extraídos de los estudios incluidos, datos utilizados para todos los análisis, código de análisis, cualquier otro material utilizado en la revisión.

Apéndice B

Algunos documentos no accesibles durante la revisión

Título	Revista	Autores	Tipo de documento
Sistemas de tratamiento pasivo basados en humedales para efluentes de procesamiento de mineral de oro que contienen cianuro residual, metales y especies de nitrógeno	Journal of Environmental Monitoring (JEM)	(Álvarez et al., 2013)	Artículo

Estado de la investigación sobre el tratamiento de aguas residuales que contienen cianuro en las empresas de fundición de oro	Springer Nature	-	Capítulo de un libro
Selección de un método apropiado para eliminar el cianuro de las aguas residuales de la mina de oro de Moteh utilizando un enfoque matemático	Springer Nature	(Seyyed et al., 2018)	Artículo
Microbios y enzimas microbianas para la degradación del cianuro	Springer Nature	-	Artículo
Biodegradación	Springer Nature	-	Artículo
Contaminación del suelo y el agua por cianuro: fuentes, toxicidad y posibles estrategias de remediación	ScienceDirect	(Abdul et al., 2023)	Capítulo de un libro
Condiciones de operación para la biorremediación continua de aguas residuales contaminadas con cianuro libre utilizando <i>Aspergillus awamori</i>	Water science and technology	(Santos et al., 2014)	Artículo

Apéndice C

Artículos descartados después de leerlos completamente

Autores	Documento	Método aplicado	Razón	Descripción
(Zhang et al., 2020)	Enhanced photocatalytic reaction and mechanism for treating cyanide-containing wastewater by silicon-based nano-titania	Nano Titania (nano-TiO ₂) a base de silicio.	Información irrelevante	El artículo habla sobre el tratamiento de aguas residuales con cianuro en la industria aurífera, pero no se centra en el método de degradación de cianuro en general.
(Nesbitt et al., 2021)	Remediation of reduced sulfur species effects on gold and silver recovery during cyanide leaching	Adición de sales de sulfito a las lechadas de lixiviación de cianuro.	Información similar	El artículo se centra en la industria minera y la degradación de cianuro en aguas residuales de lixiviación de minerales, anteriormente ya se

Autores	Documento	Método aplicado	Razón	Descripción
				encontraron artículos con información similar.
(Weishi et al., 2022)	Long-term degradation characteristics of cyanide in closed monofills and its effects on the environment and human health: Evidence from nine landfill sites in northern China	Mono rellenos de residuos de cianuro (CRM) (degradación natural)	Información irrelevante	El artículo se centra en la gestión de residuos de cianuro en mono rellenos de residuos de cianuro (CRM) y no en la degradación de cianuro en aguas residuales en general
(Razanamahandry et al., 2019)	Performance of various cyanide degrading bacteria on the biodegradation of free cyanide in water	Biodegradación del cianuro libre (CNL) por bacterias degradadoras de cianuro (BDC)	Información similar	El artículo no menciona la aplicación del método de degradación de cianuro en aguas residuales industriales, lo que limita su alcance.
(Zhou et al., 2019)	Adsorption isotherms, degradation kinetics, and leaching behaviors of cyanogen and hydrogen cyanide in eight texturally different agricultural soils from China	La fumigación con cianógeno (C2N2)	Información irrelevante	Se enfoca en la degradación del C2N2 y sus productos de degradación en suelos agrícolas, no en aguas residuales.
(Zhuang et al., 2024)	Analysis on pollutants removal and sludge characteristics of a novel two-phase anaerobic/aerobic/integrated deoxygenated and anoxic reactor associated with membrane process for treating pesticide wastewater	Químicos, biológicos, electroquímicos y fotoquímicos	Información similar	El artículo menciona la aplicación de métodos que ya se especificaron en los artículos seleccionados.
(Freitas et al., 2023)	Impacts of cyanide in gold mining and cyanide removal methodologies in liquid waste from gold processing	Químicos, biológicos, electroquímicos y fotoquímicos	Información similar	El artículo menciona la aplicación de métodos que ya se especificaron en los artículos seleccionados.
(Wang et al., 2013)	Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide	No especifica el método para la degradación de cianuro, explica la Dicyandiamida (DCD) en la	-	-

Autores	Documento	Método aplicado	Razón	Descripción
		agricultura y su efecto en la nitrificación y la acumulación de nitratos en suelos y vegetales		
(Sharma et al., 2014)	Effect of cyanide on phenolic and aromatic hydrocarbons biodegradation under anaerobic and anoxic conditions	Biodegradación	Información similar	El artículo menciona la aplicación de métodos que ya se especificaron en los artículos seleccionados.
(Mekuto et al., 2015)	Biodegradation of free cyanide and subsequent utilization of biodegradation by-products by Bacillus consortia: optimization using response surface methodology	Biodegradación	Información similar	El artículo menciona la aplicación de métodos que ya se especificaron en los artículos seleccionados.

Apéndice D

Artículos sobre los métodos de degradación de cianuro presentes en aguas residuales con publicaciones citadas entre el año 2021 al 2023

Documento	Autores	Citas
Biodegradation of cyanide to ammonia and carbon dioxide by an industrially valuable enzyme from the newly isolated Enterobacter z	(Javaheri et al., 2021)	3
Photocatalytic Advanced Oxidation Processes for Neutralizing FreeCyanide in Gold Processing Effluents in Arequipa, Southern Peru	(Vuono et al., 2021)	6

Effects of physicochemical properties of Au cyanidation tailings on cyanide microbial degradation	(Anning et al., 2021)	8
A catalytic ozonation process using MgO/persulfate for degradation of cyanide in industrial wastewater: mechanistic interpretation, kinetics and by-products	(Croué et al., 2021)	13
Comparing the efficacy of catalytic ozonation and photocatalytic degradation of cyanide in industrial wastewater using ACF-TiO ₂ : catalyst characterisation, degradation kinetics, and degradation mechanism	(Goodarzvand et al., 2022)	3
Alkaline-extracted cyanide from cassava wastewater and its sole induction of chromosomal aberrations in <i>Allium cepa</i> L. root tips	(Ogunyemi et al., 2022)	3
Comparative Study of the Effect of Doping ZnTiO ₃ with Rare Earths (La and Ce) on the Adsorption and Photodegradation of Cyanide in Aqueous Systems	(Jaramillo et al., 2023)	8

Apéndice E

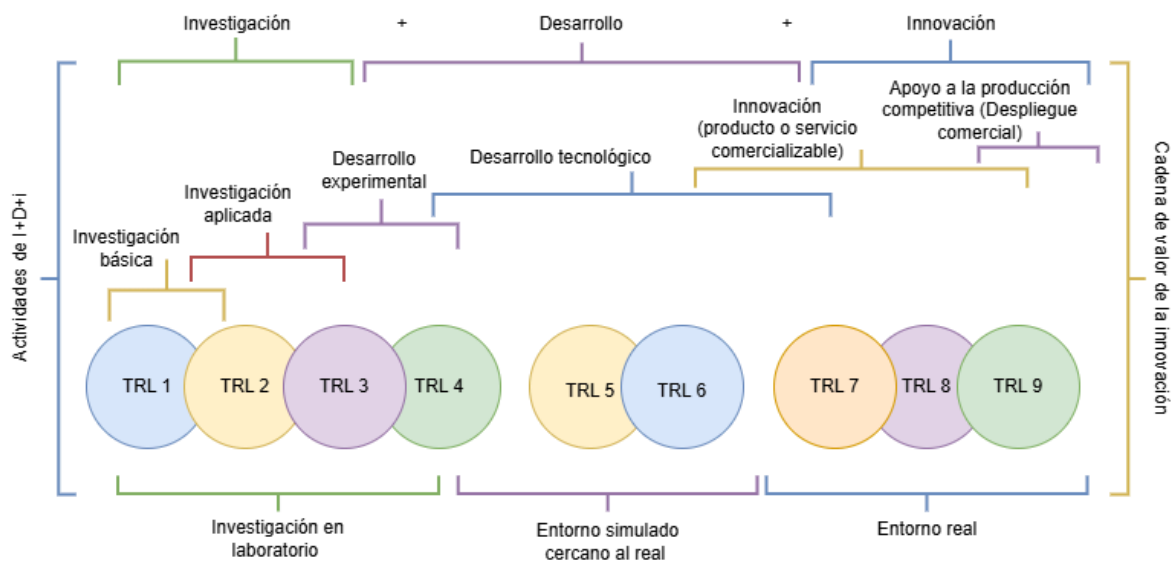
Niveles de preparación tecnológica (TRL)

Los niveles de preparación tecnológica (TRL) permite identificar el nivel de desarrollo de las actividades de I+D+i con las diferentes etapas del desarrollo tecnológico, En la Figura 1 se presentan los diferentes TRL y el entorno en el que cada nivel trabaja. los niveles del 1 al 4 definen una tecnología con factibilidad a escala laboratorio; los niveles 5 y 6 se muestran una

factibilidad técnico y financiero de la tecnología en un entorno pequeño, mientras que del 7 al 9 definen una factibilidad a nivel de innovación.

Figura 1

Niveles TRL, actividades de I+D+i y TRL Definición



Nota: Adaptado por los autores de la Guía técnica de autoevaluación para el reconocimiento de la unidad I+D+i de la empresa (COLCIENCIAS, 2017).

Apéndice F

Comparación de los métodos que presentaron menor eficiencia de degradación de cianuro

Autor	Técnica	Tipo de cianuro	Tipo de agua	Condiciones de operación	Eficiencia de degradación	
					Degradación máxima	Degradación con H ₂ O ₂
(Jawale et al., 2014)	Físico	Cianuro complejo	Aguas residuales industriales	Tiempos de operación para cada método: Cavitación acústica 80 min y la hidrodinámica 120 min.	Cavitación acústica: 54,17% Cavitación hidrodinámica: 44,02%	Cavitación acústica: 61,22% Cavitación hidrodinámica: 51,29%
(Ojaghi et al., 2018)	Biodegradación Convencional	Cianuro libre y simple	Aguas residuales industriales /mineras (baja toxicidad)	Biodegradación Convencional Microorganismo: <i>Bacillus pumilus</i> ATCC 7061	Tiempo de tratamiento: 230–396 h (100–200 mg/l) pH: 9 Temperatura: 30 °C	60–98.8% No menciona
	Electro-Biodegradación	Cianuro libre, simples y complejos debiles	Aguas industriales /mineras de alta toxicidad	Electro-Biodegradación Microorganismo: <i>Bacillus pumilus</i> ATCC 7061	Corriente eléctrica: Sí (2.0 V, 6 mA/cm ²) Tiempo de tratamiento:	98.6–99.7% 2% No menciona

					36–301 h (100–500 mg/l) pH: 9 Temperatura: 30 °C Inversión de polaridad : Cada 1–5 s		
Electro-Degradación	Cianuro libre	Aguas con inhibidores biológicos o necesidad de pretratamiento	Electro-Degradación	Corriente eléctrica: Sí (2.0 V, 6 mA/cm ²) Tiempo de tratamiento: 36–301 h (100–500 mg/l) pH: 9 Temperatura: 30 °C Inversión de polaridad : Cada 1–5 s	19.75–60.04%	No menciona	
(Mekuto et al., 2017)	Biodegradación	Cianuro libre	aguas residuales mineras.	Pseudomonas aeruginosa criopreservadas (-80°C) pH: 8.5. Temperatura: 25°C. Velocidad de agitación: 120 rpm. Tiempo de Degradación: <10 horas	~61%	No menciona	

(Montalvo et al., 2021)	Físico-Químico	Cianuro libre	Aguas residuales de galvanoplastia	Hidrocavitación (HC) sola	Presión de entrada: 4 bar pH: 9.5 Temperatura: 30 °C Tiempo de tratamiento: 120 min	70%	No menciona
	Químico	Cianuro libre y complejos	Aguas residuales de galvanoplastia	Peróxido de Hidrógeno (H ₂ O ₂) solo	Relación molar H ₂ O ₂ :CN ⁻ : 6:1	63%	
	Físico-Químico	Cianuro libre y complejos	Aguas residuales de galvanoplastia	Combinación HC + H ₂ O ₂	Presión de entrada: 4 bar pH: 9.5 Temperatura: 30 °C Relación molar H ₂ O ₂ :CN ⁻ : 1.5:1 (óptima) Tiempo de tratamiento: 120 min	99.9%	

