



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Remediación Microbiana de Contaminantes Orgánicos e  
Inorgánicos mediante Tecnología de Inmovilización de Compuestos  
Carbonosos: Revisión sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
Ingeniero Ambiental

**AUTORES:**

Jalisto Condori, David (orcid.org/0000-0002-2510-7053)  
Ordinola Quispe, Miguel Alfredo (orcid.org/0000-0002-4464-5455)

**ASESOR:**

Dr. Espinoza Farfan, Eduardo Ronald (orcid.org/0000-0003-4418-7009)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Tratamiento y Gestión de los Residuos

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

LIMA – PERÚ  
2022

## Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a Dios quien ha sido nuestro guía y fortaleza en estos tiempos difíciles, y a nuestros padres quienes siempre estuvieron para apoyarnos y no dejarnos rendir en este largo camino.

## Agradecimiento

En primer lugar, agradecer a Dios por darnos buena salud y cuidarnos siempre. Agradecer a nuestros padres por su apoyo durante esta etapa. También agradecer al Dr. Espinoza Farfán, Eduardo Ronald por el apoyo durante el periodo de la elaboración de tesis.

## Índice de contenidos

Carátula .....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	4
III. METODOLOGÍA .....	15
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	15
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización.....	15
3.3. Escenario de estudio .....	15
3.4. Participantes .....	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	16
3.6. Procedimiento .....	16
3.7. Rigor científico .....	18
3.8. Método de análisis de información .....	18
3.9. Aspectos éticos.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
V. CONCLUSIONES .....	30
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS .....	32
ANEXOS	

## Índice de tablas

<i>Tabla 1. Tipos de contaminantes inorgánicos del agua y sus efectos</i>	10
<i>Tabla 2. Microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos</i>	20
<i>Tabla 3. Métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos</i>	23
<i>Tabla 4. Factores que intervienen en la capacidad de remoción</i>	26

## **Índice de gráficos**

*Gráfico 1. Gráfico N°2. Procedimiento de selección de artículos al estudio ----- 17*

## **Índice de figuras**

*Figura 1. Métodos/técnicas para la inmovilización de células bacterianas ----- 13*

## Resumen

El objetivo del presente trabajo fue determinar la importancia de la aplicación de complejos inmobilizados de microorganismos y material carbonoso para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos; para lo cual la metodología usada consistió en aplicar un tipo de investigación aplicada de diseño sistemático; donde se recolectó 27 artículos con la ayuda del análisis documental.

Los microorganismos con mayor uso son las bacterias, siendo ello corroborado por el 98% de los investigadores y los contaminantes orgánicos degradados incluyen principalmente tintes, bencenos, HAPs y sus derivados, hidrocarburos de petróleo y contaminantes orgánicos diversos. Los métodos de inmobilización más usados son la adsorción (71%) y el atrapamiento (29%). Los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmobilizados se ven influidas por la temperatura y el pH. Donde la tasa de descoloración de los colorantes aumenta con un gradiente de temperatura de 20 a 30 °C. Pero también el pH, desempeña un papel fundamental en la eliminación de los contaminantes, ya que, afecta a la actividad de los microorganismos, a las propiedades de carga superficial de los metales (loides) y de los contaminantes orgánicos iónicos, y a las propiedades fisicoquímicas de los McMIC.

**Palabras clave:** microbiano, contaminación, tecnología, inmobilización, carbonoso

## Abstract

The objective of the present work was to determine the importance of the application of immobilized complexes of microorganisms and carbonaceous material for the elimination of organic and inorganic contaminants; for which the methodology used consisted in applying a type of applied research of systematic design; where 27 articles were collected with the help of documentary analysis.

The microorganisms with the greatest use are bacteria, being this corroborated by 98% of the researchers and the organic pollutants degraded include mainly dyes, benzenes, PAHs and their derivatives, petroleum hydrocarbons and diverse organic pollutants. The most commonly used immobilization methods are adsorption (71%) and entrapment (29%). The factors involved in the removal capacity of immobilized adsorbents are influenced by temperature and pH. Where the rate of decolorization of the dyes increases with a temperature gradient of 20 to 30 °C. But also the pH, plays a fundamental role in the removal of contaminants, since, it affects the activity of microorganisms, the surface charge properties of metals (loids) and ionic organic contaminants, and the physicochemical properties of McMICs.

**Keywords:** microbial, contamination, technology, immobilization, carbonaceous.

# I. INTRODUCCIÓN

La modernización de la industrialización ha generado que la producción se intensifique, generando la deliberación de los materiales tóxicos peligrosos conocidos como metaloides; entre los contaminantes también se encuentran los radionúclidos y contaminantes orgánicos (Santos Francés et al., 2018, p.2). En donde, los daños negativos que generan dichos contaminantes afectan el ecosistema, así como la salud del ser humano (Price J. y Forrest J., 2016, p.3).

Es así que, mediante un estudio realizado, se revisó la contaminación por elementos traza (As, Cd, Cu, Pb, Cr, Ni y Zn) en estudios de 31 ciudades de América Latina, incluidos Argentina, Brasil, Colombia, Chile, Cuba y México, entre 2011 y 2020, donde metales como As, Cd, Cu, Pb y Zn fueron señalados como los principales contaminantes en la capa superior del suelo urbano (Penteado Priscila et al., 2022, p.1). Así mismo, se tuvo que América Latina necesita lineamientos específicos para el suelo considerando los antecedentes locales (Mohammad Ali et al., 2017, p.7).

Así también, es el caso de los contaminantes orgánicos, siendo que, según la última estimación de 2019, la producción mundial de plástico alcanzó los 368 millones de toneladas (Orona Návar C. et al., 2022, p.2). Por ejemplo, cálculos recientes indican que se han generado 1,6 millones de toneladas/día de residuos plásticos en todo el mundo desde marzo de 2020, y que se desechan diariamente 3.400 millones de mascarillas desechables (Benson N. et al., 2021, p.1).

Y es que, los plásticos producidos en masa son persistentes debido a su alta resistencia a la biodegradación (Verla Andrew W. et al., 2019, p.2). Mientras que los metales pesados y otros contaminantes inorgánicos como oligoelementos, ácidos minerales, metales, compuestos metálicos, sales inorgánicas (Wasewar K. et al., 2020, p.3). Metales con compuestos orgánicos como complejos, sulfatos y cianuros, que tienen una concentración superior a los límites permisibles pueden contaminar el agua (Priyadarshanee M. et al., 2022, p.33).

Estos contaminantes inorgánicos pueden no ser biodegradables y persisten en el entorno circundante (Yadav Ashutosh et al., 2019, p.3). Así también, presentan un efecto disruptivo en la salud pública y también en la flora y fauna acuática (Borah Preetismita et al., 2020, p.2).

Por tales motivos, en los últimos años, se ha prestado mayor atención a los impactos ambientales de este tipo de contaminantes inorgánicos y orgánicos. Por lo que, se necesitan altos estándares de tratamiento de fuentes contaminadas debido a las estrictas regulaciones ambientales (Usman M. y Ho Y., 2020, p.1).

Desde los últimos años, se vienen usando métodos físicos y químicos donde el principal objetivo es la descontaminación ambiental; en los cuales se aplican los métodos de adsorción, filtración, electro catálisis, oxidación entre otros (Palanivel T. et al., 2020, p.2). Pero, aunque algunos han presentado resultados favorables presentan desventajas como el alto costo o requieren mucha energía (Varjani S. et al., 2017, p.3).

Siendo así que para disminuir los contaminantes empleando tratamientos de bajos costos y alta eficiencia se puede hablar de la inmovilización microbiana; siendo este ampliamente estudiado y generando un gran interés (rahman Z., 2020, p.2). Y es que, en comparación con las células libres la inmovilización microbiana presenta mayor densidad de la célula y la actividad biológica, generando un gran potencial hacia los contaminantes ambientales, así como presentar una fácil recolección y regeneración celular (Giese E. et al., 2020, p.2).

Por lo que, la selección de un soporte adecuado para la inmovilización de microorganismos es fundamental; siendo considerados los materiales carbonosos (MC) (Partovinoa A. y Rasekh B., 2018, p.2). Donde, el carbón activado (CA), el biocarbón (BC), los de carbono (CNTs), y el grafeno y sus derivados son los considerados para este uso (Bouabidi Z. et al., 2019, p.2).

Ante lo expuesto se generó la siguiente pregunta que nos genera el problema de estudio: ¿Cuáles es la importancia de la aplicación de complejos inmovilizados de microorganismos y material carbonoso para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos?

Así mismo, se plantearon las siguientes preguntas específicas:

**PE1:** ¿Cuáles son los microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización?

**PE2:** ¿Cuáles son los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos?

**PE3:** ¿Cuáles son los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados?

De tal manera, mediante el problema general se elaboró el siguiente objetivo de estudios con los respectivos objetivos específicos:

**Objetivo general:** Determinar la importancia de la aplicación de complejos inmovilizados de microorganismos y material carbonoso para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos

**OE1:** Analizar los microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización

**OE2:** Clasificar los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos

**OE3:** Identificar los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados

El presente trabajo de investigación realizará una recopilación de estudios científicos actuales para encontrar microorganismos que puedan presentar un alto nivel como degradadores de contaminantes orgánicos e inorgánicos, así mismo, compuestos inmovilizados de materiales carbonosos. Por lo cual, este trabajo presenta una justificación teórica, donde se pretende realizar este estudio para encontrar nuevas posibles aplicaciones en la contaminación ambiental de una manera que los costos sean menores a otros métodos, así como una opción que presente contaminación secundaria posiblemente menor a la de otros. Siendo dirigido a los ingenieros competentes del campo de la ingeniería, para que puedan tener mayores alcances de métodos potenciales en el tratamiento de diversos contaminantes ambientales.

## II. MARCO TEÓRICO

Shen Ying et al., (2017, p.1); investigó la viabilidad de la biorremediación de cadmio (Cd) utilizando el complejo inmovilizado de microalgas-biocarbón (MBIC). Se variaron los principales parámetros operativos (p. ej., pH, dosis de biosorbente, concentración inicial de Cd(II) y relación microalga-biocarbón) para comparar la capacidad de tratamiento de algas viables (*Chlorella* sp.), biocarbón y MBIC. Se encontró que las isotermas de biosorción obtenidas mediante el uso de algas o biocarbón tenían predicciones de Langmuir satisfactorias, mientras que el modelo de isoterma de adsorción que mejor se ajustaba a MBIC era el modelo Sips. La capacidad máxima de adsorción de Cd(II) de MBIC con una relación *Chlorella* sp.:biocarbón de 2:3 ( $217,41 \text{ mg g}^{-1}$ ) fue mayor que la de *Chlorella* sp. ( $169,92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) o biocarbón ( $95,82 \text{ mg g}^{-1}$ ) solo. El modelo de pseudo-segundo orden se ajustó al proceso de biosorción del pozo MBIC ( $R^2 > 0.999$ ).

Shen Ying et al., (2018, p.1); en su estudio aplicó un complejo de gránulos derivados del jacinto de agua inmovilizados con *Chlorella* sp. en la biorremediación de Cadmio (Cd). Los resultados mostraron que la eficiencia de eliminación de Cd(II) se relacionó positivamente con la eficiencia de inmovilización de algas y la capacidad de bioacumulación de algas. Dado que una mayor hidrofilia de la superficie conduce a una mayor eficiencia de inmovilización, se seleccionó el gránulo de biocarbón de hoja de jacinto de agua (WLBp) como el vehículo óptimo. Se obtuvo una eficiencia máxima de eliminación de Cd(II) del 92,45 % mediante el complejo de WLBp inmovilizado con células de algas en fase de crecimiento estacionario e iluminado con una intensidad de luz de  $119 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Concluyendo que las pruebas de recuperación tanto en células de microalgas como en WLBp demostraron que las células de algas y el sedimento de biocarbón se pueden reciclar y reutilizar económicamente.

Teng Zedong et al., (2020, p.1); en su investigación presenta bioperlas, que se implementaron con la ayuda de un portador de esferas porosas de diseño propio, mediante cepas de PSB inmovilizadas *Leclercia adecarboxylata* (en lo sucesivo, L1-5). Además, en este estudio también se investigó la eficiencia de pasivación del plomo a través de bioperlas en diferentes condiciones y su mecanismo. Los resultados indicaron que el fosfato solubilizado por bioperlas podría alcanzar 30 mg/L en medio  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  que contiene 1 mM  $\text{Pb}^{2+}$ , y la mayor tasa de eliminación de  $\text{Pb}^{2+}$  en medio líquido de peptona de res podría alcanzar el 93%, que es mejor que el de las

bacterias libres. Además, también se concluyó que el plomo podría transformarse en una textura cristalina estable, como  $Pb_5(PO_4)_3Cl$  y  $Pb_5(PO_4)_3OH$ . Tanto los grupos hidrófobos como los hidrófilos de las bioesferas podían capturar  $Pb^{2+}$ , lo que indicaba que la atracción electrostática y el intercambio de iones también eran el mecanismo de adsorción de  $Pb^{2+}$ .

Chen Haoming et al., (2019, p.1); en su trabajo investigó la viabilidad de aplicar biocarbón modificado con PSB para mejorar la inmovilización de  $Pb^{2+}$ . Se seleccionaron un biocarbón alcalino producido a partir de cáscara de arroz (RB) y un biocarbón ligeramente ácido producido a partir de lodo (SB). Demostró que los biocarbón pueden eliminar eficazmente el  $Pb^{2+}$  a través de la adsorción, es decir, las concentraciones acuosas de Pb después de la adición de RB y SB se redujeron en un 18,61 y un 53,89 %, respectivamente. La adición de PSB aumentó el  $Pb^{2+}$ remoción para ambos biocharres (a 24.11 y 60.85%, respectivamente). En particular, PSB mejoró significativamente la formación de piromorfita estable en la superficie de SB. Esto se debe a que el PSB distribuido uniformemente mejoró la liberación de P y reguló el pH en la superficie del biocarbón. Además, las partículas pequeñas (<0,074 mm) mostraron su mayor capacidad para inducir la formación de piromorfita, tanto para RB como para SB. Sin embargo, SB demostró una mayor capacidad de sorción, junto con su contenido más abundante de P, lo que proporcionó una plataforma más adecuada para atraer PSB para inmovilizar metales pesados.

Youngwilai Atcharaporn et al., (2020, p.2); en su estudio tiene como objetivo investigar el potencial de la eliminación de manganeso mediante el desarrollo de biocarbón inmovilizado en células microbianas. La industria del vinagre de madera genera un gran volumen de residuos de madera carbonizada (biocarbón natural) a partir del proceso pirolítico. Esta es la primera investigación que utiliza este residuo de bajo valor combinado con tratamiento biológico para la purificación del agua. Se utilizaron biocharres crudos y modificados con peróxido de hidrógeno para inmovilizar una bacteria oxidante de manganeso eficaz, *Streptomyces violaruscepa* SBP1 (SBP1). Los resultados demostraron que el biocarbón modificado tenía una mayor proporción de grupos funcionales que contenían oxígeno, lo que condujo a una mejor eliminación de manganeso. La adsorción de manganeso por el biocarbón modificado ajustó modelos de pseudo-segundo orden y de Langmuir con una capacidad máxima

de adsorción de  $1,15 \text{ mg g}^{-1}$ . El biocarbón modificado con SBP1 proporcionó la mayor eficiencia de eliminación con un 78 %.

Wang Ting et al., (2018, p.1); en su trabajo de investigación utilizó dos tipos de biocarbón, uno derivado de paja de maíz (CBC) y otro de estiércol de cerdo (PBC), como portadores de una bacteria (B38) para adsorber metales pesados en solución. CBC exhibió una alta afinidad por Hg(II), mientras que PBC mostró una gran capacidad de adsorción de Pb(II). Después de cargar con B38, la capacidad de sorción de los cosorbentes mejoró para Pb(II), pero se debilitó para Hg(II). En un sistema binario, la capacidad total de adsorción a Hg-Pb (CBC+B38,  $136,7 \text{ mg/g}$ ; PBC+B38,  $181,3 \text{ mg/g}$ ) en cosorbentes fue igual a la suma de los valores de un solo componente para Hg(II) y Pb(II). Las interacciones electrostáticas y la precipitación son los principales mecanismos en la adsorción de Hg(II). En contraste, las interacciones catión- $\pi$  y la precipitación estuvieron involucradas en el proceso de sorción de Pb(II). Además, los sitios de sorción de Hg(II) y Pb(II) se superpusieron parcialmente en la superficie del biocarbón, pero fueron diferentes en los cosorbentes.

Bharti Vikash et al., (2019, p.1); aisló especies bacterianas para metabolizar moléculas de tinte de masas de agua ricas en tinte. La mejor especie microbiana para tal aplicación se seleccionó entre las poblaciones bacterianas aisladas mediante la realización de estudios de degradación por lotes de azul de metileno (MB) con las cepas bacterianas utilizando NaCl-levadura como medio nutritivo. La especie bacteriana más adecuada fue *Alcaligenes faecalis* (*A. faecalis*) según la secuenciación 16S rDNA. Los parámetros del proceso se optimizaron y bajo las condiciones óptimas (p. ej., tamaño de inóculo de 3 mL, temperatura de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 150 ppm y tiempo de 5 días), se eliminó el 96,2 % de MB. Además, la eficacia para la separación de MB combinando biopelícula con biocarbón se midió mediante un método de biosorción en un lecho empacado.biorreactor (PBBR) en el que se inmovilizaron los microbios . Las eficiencias máximas de eliminación de MB, cuando se probaron con 50 ppm de colorante utilizando reactores por lotes que contenían células libres de *A. faecalis* y las mismas células inmovilizadas en la superficie del biocarbón, resultaron ser del 81,5 % y 89,1 %, respectivamente. El PBBR operado en modo de reciclaje continuo a una alta concentración de colorante de 500 ppm proporcionó una eliminación del 87,0 % de MB a través de una cinética de segundo orden durante 10 días.

Talha Md Abu et al., (2018, p.2); en su estudio, las especies bacterianas capaces de degradar los desechos de color se aislaron de los cuerpos de agua ubicados cerca del grupo de alfombras en el distrito Bhadohi de UP, India. Entre las especies aisladas, la mejor se seleccionó sobre la base de su capacidad para degradar el rojo Congo en experimentos por lotes utilizando NaCl-Levadura como medio nutritivo y, además, se identificó como *Brevibacillus parabrevis*. mediante secuenciación de ADNr 16S. Los parámetros del proceso se optimizaron para lograr la máxima degradación en experimentos por lotes y resultaron ser: tamaño del inóculo: 3 ml, temperatura: 30 °C, tiempo: 6 días, lo que llevó a una eliminación del 95,71 % de la muestra de colorante. El experimento mostró que las bacterias inmovilizadas con biocarbón de cáscara de coco en modo continuo mostraron una degradación mucho mejor que el estudio por lotes sin inmovilización.

Li Beibei et al., (2018, p.1); en su trabajo, el bagazo de caña de azúcar y los residuos agrícolas ricos en azúcares reductores actuaron como un biorreductor verde para el óxido de grafeno (GO) y como un soporte sostenible para la inmovilización de *Burkholderia cepacia*. Por tanto, este nuevo biomaterial que contenía tanto óxido de grafeno reducido (RGO) como *Burkholderia cepacia*, era capaz de adsorción inicial de verde de malaquita (MG) y su posterior biodegradación. Después de 60 h, inmovilizado *Burkholderia cepacia* degradó más MG (98,5 %) que un cultivo celular de *Burkholderia cepacia* (87,7 %) solo. La espectroscopia Raman confirmó que el bagazo redujo con éxito el GO y que, en consecuencia, se preparó un compuesto (B-RGO). SEM indicó que *Burkholderia cepacia* estaba bien inmovilizada y los estudios cinéticos mostraron que la adsorción de MG en el compuesto desarrollado se ajustaba a un modelo cinético de pseudo segundo orden ( $R^2 > 0,99$ ). La biodegradación de MG se confirmó mediante la detección de productos de degradación apropiados como N, N-dimetilanilina y 4-(dimetilamino) benzofenona utilizando GC-MS, UV y FT-IR, y mediante la cinética de biodegradación de primer orden de mejor ajuste.

Huang Jiaming et al., (2019, p.2); tiene como objetivo de estudio desarrollar un enfoque para reducir la exclusión mutua de bacterias en el consorcio sintético en la degradación de BaP. Se aislaron ocho cepas bacterianas degradantes de BaP a partir de un enriquecimiento con BaP como única fuente de carbono. Por lo tanto dos cepas de *Cupriavidus* spp. exhibieron una mayor capacidad de degradación (3.02–3.30 mg

$L^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) y fueron seleccionadas como las “buenas degradadoras” en los consorcios sintéticos. Debido a la exclusión mutua, la capacidad de degradación de BaP se redujo ( $1,47\text{--}1,77 \text{ mg } L^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) cuando las otras cepas se añadieron a “buenos degradadores” mezclando directamente los inóculos. Esta exclusión mutua se mitigó mediante la inmovilización independiente, en la que las cepas se incluyeron en alginato de sodio antes de construir el consorcio. El consorcio construido por inmovilización independiente exhibió una capacidad de degradación de BaP comparable con las cepas de alta eficiencia. Por lo tanto, la inmovilización independiente puede ser un enfoque avanzado en la síntesis de consorcio funcional.

Después de exponer los antecedentes que aplican la remediación microbiana de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización de compuestos carbonosos, se muestra a continuación la problemática del estudio.

La calidad del agua y del suelo ha experimentado enormes cambios desde la era de la industrialización; con el crecimiento socioeconómico, han aumentado los tipos de contaminantes en el medio ambiente (Chen Yaoning et al., 2020, p.2). Los contaminantes se mezclan con el suelo y se filtran a numerosas masas de agua donde interfieren en los procesos naturales de los ecosistemas, afectando la flora y la fauna (Li weila y Achal V., 2020, p.1).

Ante ello, con el avance de la tecnología, hay una aparición de numerosos contaminantes orgánicos e inorgánicos en el medio ambiente, lo que hace que el progreso sea un arma de doble filo (Tiwari N. et al., 2021, p.341).

Los contaminantes orgánicos e inorgánicos se introducen en el medio ambiente a través de plantas industriales, actividades domésticas y otras actividades cerca de los ríos, de la eliminación de aguas residuales de la ciudad o el pueblo, y de los pesticidas utilizados en la agricultura que se filtran a las aguas subterráneas o a los cuerpos de agua cercanos (Kinigopoulou V. et al., 2022, p.1).

Así mismo, debido a la acción antropogénica, el suelo y los depósitos de agua del mundo están contaminados por varios tipos de contaminantes, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Bjorklund G. et al., 2020, p.2). Los tintes, los plásticos, los pesticidas, los insecticidas, los productos farmacéuticos y los

metales pesados, por nombrar algunos. Estos contaminantes se dividen en orgánicos e inorgánicos, según los elementos presentes en ellos.

Los contaminantes inorgánicos se clasifican como se muestra en el gráfico 1.

**Gráfico N°1. Clasificación de contaminantes inorgánicos**

Contaminantes inorgánicos	Ácidos.- Liberados por los efluentes industriales
	Bases.- Como el amoníaco liberado por la industria alimentaria
	Residuos químicos.- Procedentes de procesos industriales y residuos agrícolas
	Metales pesados.- Procedentes de vehículos de motor y del drenaje de las minas
	Limo o materiales de grano fino y en polvo.- Procedentes de las obras de construcción, etc.

*Elaboración propia*

Además, los distintos tipos de contaminantes inorgánicos están formados por minerales y no proceden de organismos vivos (Borah P. et al., 2020, p.4).

La mala eliminación de las aguas residuales, los efluentes industriales, las prácticas agrícolas, la minería y los explosivos son motivos que afectan directa o indirectamente a la calidad del agua y del suelo (Abbas Z. et al., 2018, p.3). Estos compuestos tienen efectos adversos en el sistema acuático natural y también pueden introducirse en la red alimentaria, y como la mayoría de ellos son persistentes, pueden causar diversas enfermedades en los seres humanos tras su consumo (Mon Marta et al., 2019, p.1).

Así también, los contaminantes inorgánicos se encuentran comúnmente en el medio ambiente de forma bastante natural, pero a veces su cantidad suele ser significativamente alta o desequilibrada en el medio ambiente abierto (debido a diversas actividades antropogénicas) (Braghiroli F. et al., 2018, p.1). Estas especies de contaminantes inorgánicos pueden ser cualquier compuesto de oligoelementos, sales inorgánicas, oligoelementos, metales y parte de estructuras organometálicas (Rodríguez H. et al., 2016, p.3).

Entre las cuales, las industrias textiles producen grandes cantidades de aguas residuales que contienen compuestos orgánicos, en particular tintes, en varios rangos, incluyendo múltiples tipos de productos químicos como dispersantes, ácidos, álcalis y portadores (Gai S. et al., 2021, p.2). Siendo, el principal contaminante que causa la contaminación del agua de la industria textil es el tinte (Gadore V. y Ahmaruzaman M., 2021, p.2). Se calcula que entre el 10% y el 15% del total de los tintes (280.000 toneladas) utilizados en la fabricación de textiles se liberan anualmente en el medio ambiente en todo el mundo (Lellis B. et al., 2019, p.2).

Así también, químicamente los explosivos modernos son sustancias orgánicas, que en su mayoría contienen el elemento nitrógeno (Mohammadzadeh K. et al., 2018, p.5). Los explosivos también contienen sustancias como el plomo (Pb), el uranio (U), el hexahidro-1,-3,5-trinitro1,3,5-triazina (RDX), el dinitrotolueno (DNT) y el trinitrotolueno (TNT) (Thomas J. et al., 2018, p.2). Estos compuestos suelen ser resistentes a los tratamientos y persisten en la biosfera, lo que supone una amenaza para la salud humana y el ecosistema por sus efectos tóxicos (Propp V. et al., 2021, p.2).

Siendo así que, como consecuencia, la descarga desenfrenada de efluentes industriales que comprenden metales pesados tóxicos y compuestos orgánicos volátiles en los cuerpos de agua (como ríos y lagos) ha creado toxicidad tanto para el medio ambiente como para la salud (Jha Ankita et al., 2022, p.1). Debido a que, la contaminación provocada por contaminantes orgánicos e inorgánicos como pesticidas, explosivos, plásticos, lubricantes, etc. afecta a diferentes ecosistemas según el lugar donde se vierten (Machado I. y Dol I., 2021, p.2).

Debido a ello, se presenta la tabla 1 en la que se detalla los tipos de contaminantes inorgánicos del agua, su origen y su impacto en el medio ambiente:

**Tabla N°1. Tipos de contaminantes inorgánicos del agua y sus efectos**

<b>Tipos</b>	<b>Fuentes</b>	<b>Impactos</b>
<b>Ácidos y bases</b>	Generado a través de aplicaciones domésticas, aplicaciones industriales y de laboratorio.	Menos dañino, si se neutraliza. Tienen graves efectos en los tejidos de los organismos vivos incluyendo las plantas.

<b>Sulfuros metálicos</b>	Generalmente se genera a partir de la minería, y actividades industriales.	Su eliminación o presencia en el entorno abierto medio ambiente puede generar ácido sulfúrico bajo la influencia de la precipitación de agua y la actividad microbiana.
<b>Perclorato (ácidos perclóricos y sus sales)</b>	Se utiliza en una variedad de aplicaciones de síntesis química aplicaciones y producción de explosivos.	Es muy persistente en la naturaleza, y puede dañar la función tiroidea en el cuerpo humano.
<b>Amoníaco</b>	Generado por varias industrias como plantas de fertilizantes, plantas de tratamiento de agua de agua y las industrias de procesamiento de alimentos	La exposición a una cantidad excesiva de amoníaco puede causar daños cerebrales y también afectar al sistema de circulación sanguínea.
<b>Residuos químicos</b>	Procesamiento químico y laboratorio subproductos y residuos basados en aplicaciones residuos	Tienen un efecto de leve a grave en el organismo vivo dependiendo de las características de los residuos químicos.
<b>Metales y sus sales</b>	Producido por la minería y la fundición actividades seguidas de la eliminación de residuos	Puede tener una variedad de efectos adversos dependiendo de las características del metal y sus sales.
<b>Metales pesados</b>	Vehículos de motor, drenaje ácido de minas y aplicaciones de laboratorio.	Bien conocido por varios problemas asociados problemas debido a la citotoxicidad y a la bioacumulación.
<b>Abonos inorgánicos (incluidos los nitratos y derivados del fosfato)</b>	Se utiliza sobre todo para aumentar la productividad de la agricultura y la horticultura.	Una presencia excesiva es perjudicial para la la salud. También es responsable de la floración de algas o eutrofización.
<b>Limo</b>	Se genera a partir de la escorrentía del agua de obras de construcción, tala de árboles, tormentas y de desmonte.	Peor aspecto físico, necesidad de de filtración y/o sedimentación adicionales procesos adicionales para su uso o aplicaciones.
<b>Basura sólida (plástico, papel, vidrio, etc.)</b>	Generado para el material no reciclado	Puede generar lixiviación de contaminantes.

*Fuente: Modificado de Speight J. y Speight J., 2017*

En el ser humano, los principales trastornos de la salud relacionados con los contaminantes son el cáncer, los daños hereditarios, las discapacidades congénitas, los daños reproductivos (Boncel S. et al., 2016, p.4). Así también, las alteraciones

endocrinas, los efectos sobre el comportamiento, los defectos en el desarrollo de los embriones, el sistema inmunitario, los daños en el sistema circulatorio y varios otros (Bhatia S. y devraj S., 2017, p.25).

En última instancia, está afectando a los humanos y la biodiversidad, causando toxicidad y dolencias (Tang Kuok H. et al., 2022, p.3).

Por tales motivos, se menciona a la biorremediación; ya que, es un proceso que puede convertir los contaminantes en compuestos menos tóxicos con la ayuda de plantas (fitorremediación) o microorganismos (Mohammadi A. et al., 2022, p.2).

Principalmente se utilizan microorganismos para la biodegradación de compuestos, ya que la tecnología de fitorremediación requiere mucho tiempo, lo que supone una desventaja importante para la degradación a través de las plantas (Kinigopoulou V. et al., 2022, p.3). La biodegradación de los contaminantes orgánicos e inorgánicos depende de las condiciones de reacción, los microorganismos y la naturaleza de los propios contaminantes (Shikuku V. et al., 2019, p.17).

Además, en comparación con los procesos de tratamiento físico y químico, la biorremediación utiliza microorganismos (incluidos hongos, bacterias y algas) en forma de células libres, biopelículas o agregados (o flóculos de lodos activados) (Tang Y. y Xu J., 2021, p.306). Además, desempeña un papel importante a la hora de ofrecer una solución más ecológica, rentable y sostenible para el tratamiento de aguas, aire y suelos contaminados; por lo tanto, los métodos de tratamiento biológico se han utilizado ampliamente para tratar los contaminantes orgánicos e inorgánicos (Tanum J. et al., 2022, p.5).

Algunos procesos de degradación requieren la presencia de oxígeno, lo que se conoce como biodegradación aeróbica, donde el oxígeno es el aceptor de electrones (Varjani sunita J., 2016, p.3). Algunos procesos ocurren en ausencia de aire, denominados biodegradación anaeróbica, donde el oxígeno es el aceptor de electrones como el nitrato, el sulfato y otros (Verma P. y Ratan J., 2020, p.2).

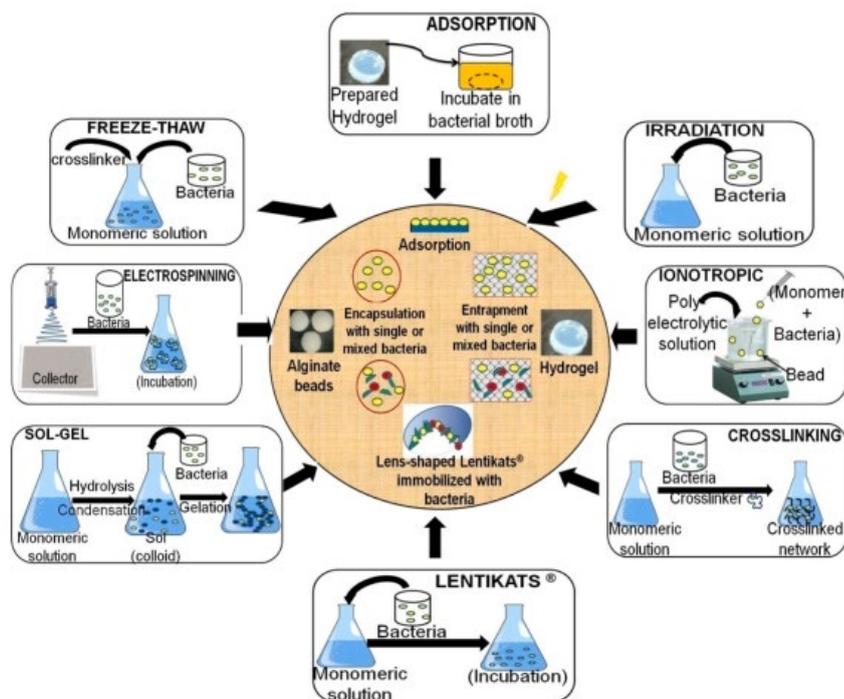
Pero, además, para reducir costos de la remediación de microorganismos se aplica la inmovilización; siendo la inmovilización de microorganismos un tipo de método de bioaumentación, que se obtiene mediante la inmovilización celular, microbiana en soportes utilizando métodos físicos y/o químicos (Bouabidi Z. et al., 2019, p.3).

Debido a que, aparte de la aplicación directa de microorganismos, en la que se exponen libremente a los medios de desecho contaminados en el suelo, el aire o el agua, un enfoque alternativo es cuando las células microbianas se cultivan y se inmovilizan (o encapsulan) y los microbios inmovilizados se exponen a los medios contaminados indirectamente (Das M. Adholeya A., 2016, p.3).

En comparación con las células libres, la inmovilización microbiana presenta una mayor densidad celular y actividad biológica, así como un mayor poder de soportar perturbaciones ambientales y presentan mayor recolección y regeneración celular (Hena S. y Znad H., 2018, p.201). Estas células inmovilizadas muestran un inmenso potencial para limpiar una amplia gama de contaminantes y también cantidades no deseadas de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo de las corrientes de aguas residuales (Krasňan V. et al., 2017, p.4).

A lo largo de los años, se han desarrollado muchos métodos/técnicas para la inmovilización de células microbianas en hidrogeles y los métodos más comunes y esenciales son la adsorción, el acoplamiento covalente, la reticulación de microorganismos, la encapsulación en un gel de polímero y el Atrapamiento en una matriz (Ver figura 1).

**Figura N°1. Métodos/técnicas para la inmovilización de células bacterianas**



Fuente: Extraído de Mehrotra T. et al., 2021

Pero, casi siempre la disponibilidad y la función de aquellos microorganismos inmovilizados se encuentran alterados por el tipo de soporte utilizado, por lo que la selección de un soporte adecuado para la inmovilización de microorganismos es fundamental (Partovinia A. y Rasekh B., 2018, p.2).

Por lo que los materiales carbonosos (MC) como la activación del carbón (CA), el biochar (BC), los nanotubos de carbono (CNT), el grafeno y los diversos materiales derivados son también materiales comúnmente empleados para realizar el mismo trabajo (Nasrollahzadeh M. et al., 2021, p.2). Estas propiedades son beneficiosas para la adhesión y el crecimiento microbiano en los MC (Teng Z. et al., 2020, p.2).

Además, algunos MC presentan un excelente rendimiento en la eliminación de contaminantes, protegiendo así a los microorganismos de los contaminantes y manteniendo la actividad y la estabilidad microbiana (Shen Yin et al., 2017, p.3).

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo de diseño de investigación**

Este estudio tuvo como método de estudio la investigación aplicada, siendo descrito por Carter S. et al., (2019, p.2), como el método que recopila información que intenta describir un tema en lugar de medirlo: se trata de impresiones, opiniones y puntos de vista. Además, una encuesta cualitativa es menos estructurada y tiene como objetivo profundizar en el tema en cuestión para recopilar información sobre las motivaciones, el pensamiento y las actitudes de las personas.

Ante ello, el tipo de investigación es aplicada, ya que, se lleva a cabo con el objetivo de encontrar soluciones prácticas y específicas permitiéndonos explicar el mundo que nos rodea y solucionar una problemática (Lozada J., 2014, p.5). Siendo este tipo de investigación elegido, ya que, se buscó resolver la importancia de la aplicación de complejos inmovilizados de microorganismos y material carbonoso para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

El diseño aplicado es sistemático; debido a que, es aquella que se genera desde la codificación abierta para recaudar información literaria, así como de elaborar las categorías y subcategorías del estudio (Sovacool B. et al., 2018, p.2). Por tal motivo este diseño de investigación fue el aplicado, ya que, se va a recoger información de estudios científicos actualizados acerca de la aplicación de complejos inmovilizados de microorganismos y material carbonoso.

#### **3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización**

Las categorías se elaboraron para reducir la información que se va a plasmar por cada objetivo de estudio, siendo tres las categorías seleccionadas microorganismos con mayor uso, métodos de inmovilización más usados, factores que intervienen en la capacidad de remoción. Mientras que las sub categorías planteadas en la matriz (ver anexo 1), se elaboraron para clasificar y plasmar resultados claros y exactos.

#### **3.3. Escenario de estudio**

El escenario de una investigación es el estudio natural en el que los autores interactúan para realizar los procedimientos o el desarrollo, pudiendo ser universidades, instituciones, campos, laboratorios, entre otros. Debido a ello al ser

este un estudio sistemático los escenarios considerados son aquellos que describen los investigadores en sus trabajos científicos.

### **3.4. Participantes**

Los participantes que intervienen en el presente trabajo de investigación sistemático son las fuentes sciencedirect, scopus y Proquest.

Siendo estas fuentes quienes participan en el acceso a la búsqueda, recolección y selección de citas, artículos científicos. Debido a que son plataformas indizadas que brindan sus bases de datos como servicios en línea de manera abierta a nivel mundial.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

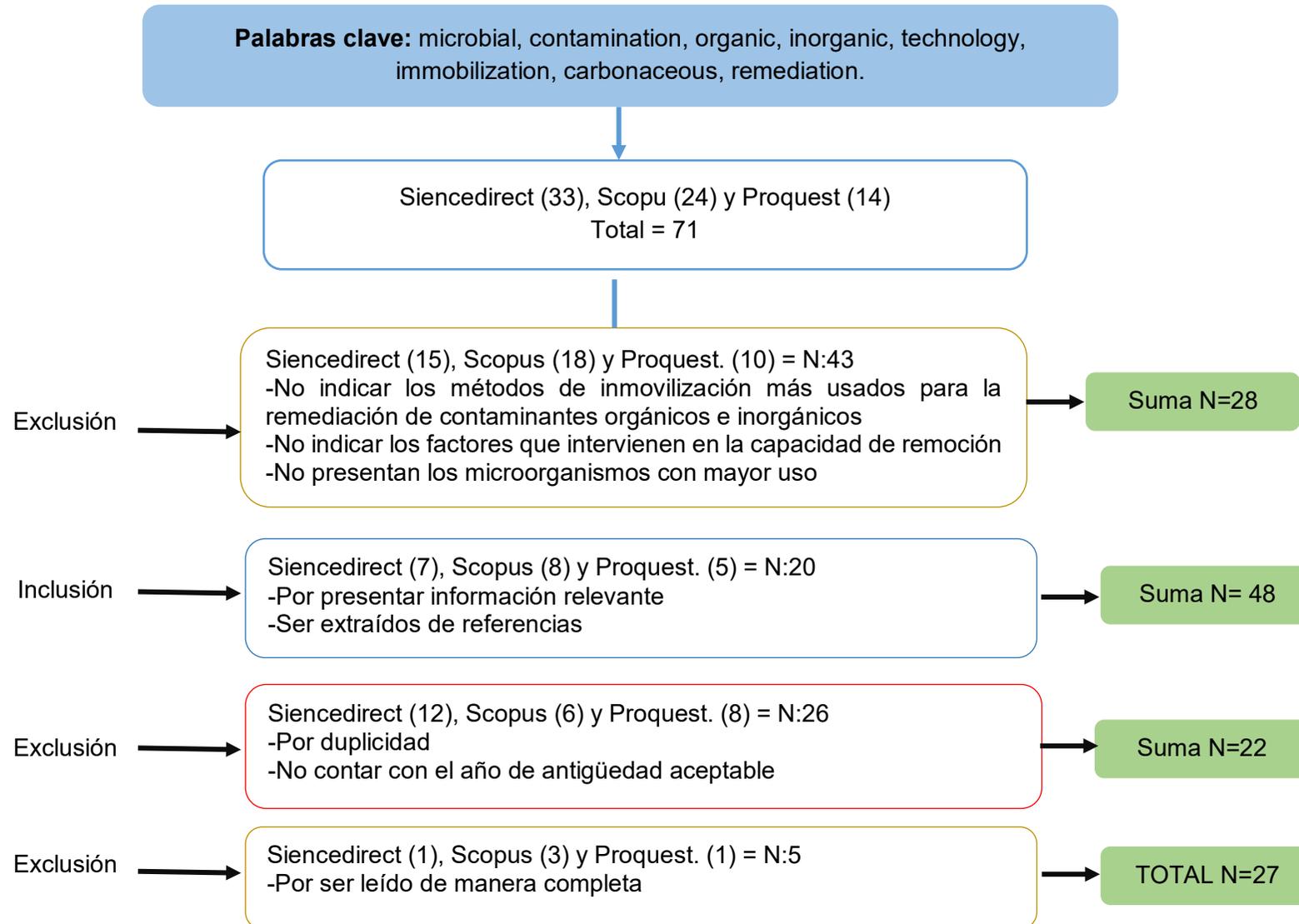
Es así como se decidió utilizar la ficha de recolección de datos como instrumento de estudio (Ver anexo 2); debido a que este permite plasmar los datos relevantes e importantes de un documento, con la finalidad de permitir una fácil recuperación y un acceso rápido al documento original (Ocak G. y Ocak I., 2016, p.648).

En la ficha propuesta de elaboración propia se brindan detalles como: los tipos de los microorganismos, los métodos de inmovilización, los factores que intervienen en la capacidad de remoción, datos del autor, metodología, resultados y conclusiones.

### **3.6. Procedimiento**

El estudio se realizó mediante una recolección de estudios científicos de tres plataformas virtuales, empleando palabras de búsqueda en inglés. Donde, después de la recolección de un conglomerado de artículos científicos se pasaron por filtros de inclusión y exclusión.

**Gráfico N°2. Procedimiento de selección de artículos al estudio**



### **3.7. Rigor científico**

El rigor científico al encargarse que el desarrollo de la investigación se realice de manera controlada, planificada y que la metodología y cada una de las etapas del estudio cumpla un rigor intelectual; por lo cual se buscó cumplir con 4 criterios que permitieron que la investigación cuente con el rigor. Siendo la dependencia, confirmabilidad, transferibilidad y credibilidad los cumplidos y descritos por Cornejo et.al., (2011, pág.15), a continuación:

Dependencia; debe existir la solides de los datos o la información brindada, generando la seguridad de la información. Siendo este criterio conseguido una vez dejado la mayor información relevante posible de la metodología, diseño, técnicas usadas, entre otros de cómo se llevó a cabo el desarrollo del estudio.

Confirmabilidad; este criterio busca que la información brindada sea lo más imparcial posible, donde no existan puntos de vista a favor o dando opiniones, para que se pueda conseguir la objetividad de los resultados de manera equitativa.

Transferibilidad; es el poder de utilizar la información obtenida de un estudio aplicado en otros contexto o campos, sirviendo esta información de referencia o guía. Ante ello este criterio lo cumplió dejando los datos de los autores de quienes se utilizó sus artículos, así mismo, se brindó los resultados detallados para que no existan campos vacíos y lo puedan utilizar en otros trabajos.

Credibilidad, este criterio consiste en el uso de métodos como el uso de la triangulación o comprobación en base a la recolección del material, como las referencias, para obtener el valor de verdad de la investigación. Con ello, este criterio fue aplicado el uso de la triangulación donde se aplicó el análisis documental, con las referencias dejadas y detalladas de cada estudio.

### **3.8. Método de análisis de información**

El método científico es utilizar los métodos que presentan mayores estándares y las mejores prácticas del método científico. Siendo así que, se utiliza el método de triangulación, ya que, este método permite usar una o varias técnicas para desarrollar los resultados del estudio.

Entre estas se elaboró las categorías y sub categorías de estudio donde se demuestran a continuación:

Categorías: especie de microorganismos, métodos de inmovilización, factores que intervienen en la capacidad de remoción

Subcategorías: Bacterias, Microalgas, Levadura; Adsorción; Atrapamiento, Temperatura, pH, concentración inicial de contaminantes

### **3.9. Aspectos éticos**

Los aspectos éticos cumplidos fueron: a) Derecho a la autoría; mediante la cita de cada investigador aplicando la norma ISO 690. b) Cumplimiento del código de ética, mediante el uso de la guía observable de la UCV. s) Trabajo de autenticidad, siendo corroborado por el programa anti plagio turnitin.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La importancia de la aplicación de complejos inmovilizados de microorganismos y material carbonoso para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos es la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización de compuestos carbonosos; para lo cual se debe analizar los microorganismos con mayor uso, clasificar los métodos de inmovilización más usado e identificar los factores que intervienen en la capacidad de remoción.

Siendo así que mediante la tabla 2 se analizaron los microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización, teniendo como criterio el tipo de microorganismo.

**Tabla N°2. Microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos**

Microorganismos	Tipo de microorganismo	Contaminante	Art.
<i>Chlorella sp.</i>	Microalga	Cd(II)	Shen Ying et al., (2017, p.1)
<i>Chlorella sp</i>	Microalga	Cd(II)	Shen Ying et al., (2018, p.1)
<i>Leclercia adecarboxylata</i>	Bacteria	Pb(II)	Teng Zedong et al., (2020, p.1)
<i>Enterobacter sp.</i>	Bacteria	Pb(II)	Chen Haoming et al., (2019, p.1)
<i>Enterobacter (bacteria) sp.</i>	Bacteria	Pb(II)	
<i>Streptomyces violarius</i>	Bacteria	Mn(II)	Youngwilai Atcharaporn et al., (2020, p.2)
<i>UV-mutant subtilis Bacillus</i>	Bacteria	Cocontaminación por Hg-Pb	Wang Ting et al., (2018, p.1)
<i>Enterococcus avium</i>	Bacteria	Cu(II), Fe(III), Pb(II), Cd(II), Ni(II), Cr(III)	Yan Jia et al., (2018, p.1)

<b><i>Shewanella sp.</i></b>	Bacteria	Cr(VI)	Shen Liang et al., (2018, p.1)
<b><i>Lysinibacillus sp.</i></b>	Bacteria	U(VI)	Zhao C. et al., (2019, p.1)
<b><i>Alcaligenes faecalis</i></b>	Bacteria	Azul de metileno	Bharti Vikash et al., (2019, p.1)
<b><i>Brevibacillus parabrevis</i></b>	Bacteria	Congo rojo	Talha Md Abu et al., (2018, p.2)
<b><i>Burkholderia cepacia</i></b>	Bacteria	Verde malaquita	Li Beibei et al., (2018, p.1)
<b><i>Paracoccus denitrificans</i></b>	Bacteria	N,Ndimetilformamida	Zheng Yuan et al., (2016, p.2)
<b><i>Cupriavidus Spp.</i></b>	Bacteria	Benzo[a]pireno	Huang Jiaming et al., (2019, p.2)
<b><i>Pseudomonas aeruginosa</i></b>	Bacteria	acenafteno	Lu Li et al., (2018, p.2)
<b><i>Pseudomonas taiwanensis</i></b>	Bacteria	Lawsone	Yang Li et al., (2018, p.1)
<b><i>Sphingomonas sp.</i></b>	Bacteria	4-bromodifenglio éter	Du Jingting et al., (2016, p.2)
<b>Nonilfenol degradante</b>	Bacteria	nonilfenol	Lou Liping et al., (2019, p.1)
<b><i>Pseudomonas sp.</i></b>	Bacteria	tolueno	Liu Shu H. et al., (2019, p.2)
<b><i>Pseudomonas sp.</i></b>	Bacteria	tolueno	Lin Chin Wen et al., (2019, p.1)
<b><i>Pseudomonas aeruginosa</i></b>	Bacteria	Bisfenol A	Mita L. et al., (2016, p.1)
<b><i>Arthrobacter sp.</i></b>	Bacteria	atrazina	Yu T. et al., (2020, p.1)
<b><i>Pseudomonas citronellolis</i></b>	Bacteria	Fenol	Zhao Ling et al., (2020, p.1)

Los microorganismos inmovilizados en BC se han aplicado ampliamente para mejorar directa o indirectamente la inmovilización y la eliminación de diferentes contaminantes, por ello mediante la tabla 2 se tiene que los microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante

tecnología de inmovilización son las bacterias, siendo ello corroborado por el 98% de los investigadores.

Ello debido a que varias bacterias degradadoras de contaminantes orgánicos inmovilizadas en los CMs (principalmente BC y AC) contribuyen a la completa degradación de los contaminantes orgánicos en un corto periodo de tiempo (0-24h), lo cual era irrealizable para los CMs solos o las células libres.

Siendo así corroborado por los diversos autores en la tabla 2, donde varios metales pesados (por ejemplo, Fe (III), Pb (II), Cu (II), Ni (II), Cr (II), Cd (II)) fueron eliminados simultáneamente por el complejo inmovilizado de bacterias con las eficiencias de eliminación de 89.2, 77.0, 97.1, 51.5, 98,1, 12,4%, respectivamente (Yan Jia et al., 2018, p.1).

Además, también se tiene que los estudios de los últimos años comparados demuestran que los contaminantes orgánicos degradados con microorganismos inmovilizados incluyen principalmente tintes, bencenos, HAPs y sus derivados, hidrocarburos de petróleo y contaminantes orgánicos diversos. Lu Li et al., (2018, p.2), Yang Li et al., (2018, p.1), Du Jingting et al., (2016, p.2), Liu Shu H. et al., (2019, p.2), Mita L. et al., (2016, p.1), Lou Liping et al., (2019, p.1), Lin Chin Wen et al., (2019, p.1).

Así también lo corroboran Lin Chin Wen et al., (2019, p.1) y Liu et al., (2019, p.1), donde las bacterias degradadoras de tolueno (*Pseudomonas sp.*) atrapadas en perlas de BC con PVA como agente de reticulación en el filtro de biotrituración (BTF) podrían mantener una alta actividad celular y fortalecer la tolerancia contra las altas concentraciones de tolueno, mejorando las eficiencias de biodegradación del tolueno.

Y es que ello se debe a que los méritos de las bacterias degradadoras inmovilizadas incluyen la estabilidad térmica superior a la de las células libres y las altas eficiencias de degradación en sucesivas corridas de degradación (Teng Zedong et al., 2020, p.1).

Pero Zhao Ling et al., (2020, p.1), señala cierta discrepancia, afirmando que, cabe destacar que la eliminación de contaminantes orgánicos por parte de las bacterias inmovilizadas se vería obstaculizada por BC con una afinidad excesivamente fuerte por los contaminantes orgánicos debido al ataque restringido del contaminante orgánico por parte de las bacterias.

Siendo así que Gong et al. (2020, p.2), presenta un estudio diferente a las afirmaciones que se observan por los otros investigadores, donde investigó el tratamiento de efluentes de digestión anaeróbica de ganado mediante microalgas incrustadas en CA y alginato de sodio y en general, el 92% del nitrógeno total (TN) y el 98% del fósforo total (TP) fueron eliminados por las células inmovilizadas.

Presentando apoyo se encuentran Shen Ying et al., (2017, p.1) y Shen Ying et al., (2018, p.1); quienes utilizaron la microalga de *Chlorella sp.* como microorganismo para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización.

Por otro lado, se clasificaron los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos mediante la tabla 3.

**Tabla N° 3. Métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos**

<b>Método Inmoviliz.</b>	<b>Fuente</b>	<b>Microorganismos</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Art.</b>
<b>Adsorción</b>	Agua jacinto BC	<i>Chlorella sp.</i> (microalga)	Cd(II)	Shen Ying et al., (2017, p.1)
<b>Adsorción</b>	Agua jacinto BC	<i>Chlorella sp.</i> (microalga)	Cd(II)	Shen Ying et al., (2018, p.1)
<b>Atrapamiento</b>	Cascarilla de arroz BC	<i>Leclercia adecarboxylata</i> (bacteria)	Pb(II)	Teng Zedong et al., (2020, p.1)
<b>Adsorción</b>	Cáscara de arroz BC	<i>Enterobacter sp.</i> (bacteria)	Pb(II)	Chen Haoming et al., (2019, p.1)
<b>Adsorción</b>	Lodos BC	<i>Enterobacter sp.</i> (bacteria)	Pb(II)	p.1)
<b>Adsorción</b>	Eucalyptus hojas BC	<i>Streptomyces violarus</i> (bacteria)	Mn(II)	Youngwilai Atcharaporn et al., (2020, p.2)
<b>Adsorción</b>	Paja de maíz BC	<i>UV-mutant Bacillus subtilis</i> (bacteria)	Cocontaminación por Hg-Pb	Wang Ting et al., (2018, p.1)
<b>Adsorción</b>	GO	<i>Enterococcus avium</i> (bacteria)	Cu(II), Fe(III), Pb(II), Cd(II), Ni(II), Cr(III)	Yan Jia et al., (2018, p.1)
<b>Adsorción</b>	rGO	<i>Shewanella sp.</i> (bacteria)	Cr(VI)	Shen Liang et al., (2018, p.1)

<b>Atrapamiento</b>	GO	<i>Lysinibacillus sp.</i> (bacteria)	U(VI)	Zhao C. et al., (2019, p.1)
<b>Adsorción</b>	Casuarina Semillas BC	<i>Alcaligenes faecalis</i>	Azul de metileno	Bharti Vikash et al., (2019, p.1)
<b>Adsorción</b>	Coco conchaBC	<i>Brevibacillus parabrevis</i>	Congo rojo	Talha Md Abu et al., (2018, p.2)
<b>Adsorción</b>	rGO	<i>Burkholderia cepacia</i>	Verde malaquita	Li Beibei et al., (2018, p.1)
<b>Atrapamiento</b>	GO	<i>Paracoccus denitrificans</i>	N,Ndimetilformamida	Zheng Yuan et al., (2016, p.2)
<b>Adsorción</b>	AC	<i>Cupriavidus Spp.</i>	Benzo[a]pireno	Huang Jiaming et al., (2019, p.2)
<b>Adsorción</b>	Arroz pajaBC	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	acenafteno	Lu Li et al., (2018, p.2)
<b>Atrapamiento</b>	Pino MassonBC	<i>Pseudomonas taiwanensis</i>	Lawson	Yang Li et al., (2018, p.1)
<b>Adsorción</b>	Maíz pajaBC	<i>Sphingomonas sp.</i>	4-bromodifenglio éter	Du Jingting et al., (2016, p.2)
<b>Adsorción</b>	Bambú carbón	nonilfenol degradante bacterias	nonilfenol	Lou Liping et al., (2019, p.1)
<b>Atrapamiento</b>	Bambú BC	<i>Pseudomonas sp.</i>	tolueno	Liu Shu H. et al., (2019, p.2)
<b>Atrapamiento</b>	Bambú BC	<i>Pseudomonas sp.</i>	tolueno	Lin Chin Wen et al., (2019, p.1)
<b>Adsorción</b>	GAC	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Bisfenol A	Mita L. et al., (2016, p.1)
<b>Adsorción</b>	Maíz pajaBC	<i>Arthrobacter sp.</i>	Atrazina	Yu T. et al., (2020, p.1)
<b>Atrapamiento</b>	Maní conchaBC	<i>Pseudomonas citronellolis</i>	Fenol	Zhao Ling et al., (2020, p.1)

De acuerdo con la tabla 3 se proporcionó una visión detallada de los métodos de síntesis de las Mcs y su aplicación en la remediación de suelos, aguas residuales y gases de escape; donde, los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos son la adsorción y el atrapamiento, donde la adsorción presenta un 71% de estudios que lo aplican con 17 de 24 estudios, mientras que el atrapamiento un 29% con 7 de 24 estudios aplicados.

Ello debido a que la adsorción es uno de los métodos más importantes y útiles para la inmovilización de microorganismos debido a su simplicidad y fácil funcionamiento (Bouabidi et al., 2019, p.5). Así La inmovilización de microorganismos a través de la adsorción se logra inicialmente por la transferencia de células desde la solución a granel a la superficie de los MC, seguido por la colonización de las células adsorbidas en los MC (Lou Liping et al., 2019, p.1).

Así lo corrobora Gong et al. (2020, p.2), quien menciona que los efectos sinérgicos de la adsorción de CA y la absorción de las microalgas contribuyeron a la eliminación de TP de manera eficiente.

Así también, Fan Jixiang et al., (2017, p.1) y Zheng Yuan et al., (2016, p.1), demuestran que la eliminación de DMF por la aplicación de la inmovilización celular se consiguió por medio del mecanismo de dos etapas; en la cual la primera consistió en eliminar de manera acelerada la DMF por el método de adsorción en la superficie ultra grande de PGO mediante las fuerzas de van der Waals o la unión puente de Hidrógeno entre DMF y las células inmovilizadas; siendo así como la biodegradación por parte de las células inmovilizadas cumplió un papel principal para la remoción de DMF en la segunda etapa.

Zhao Ling et al., (2020, p.1), también presenta apoyo con los resultados de su estudio, donde señala que el efecto sinérgico de la adsorción las eficiencias de eliminación de H<sub>2</sub>S por parte de las bacterias inmovilizadas fueron superiores al 90%, lo cual fue significativamente mayor que el de la CA o las bacterias por sí solas.

Pero ello es rechazado por Lu Jiasheng et al., (2020, p.3), quien afirma en su estudio que la inmovilización de microorganismos por adsorción no presentará cambios en la estructura natural de las células ya que las fuerzas de unión son demasiado débiles entre células y portadores por lo que, dicho método es el más adecuado para la inmovilización celular, la más factible y la biodegradación de contaminantes OPs a una escala de laboratorio.

Por otro lado, se identificaron los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados mediante la tabla 4, teniendo como criterio la capacidad de remoción de los materiales carbonosos.

**Tabla N°4. Factores que intervienen en la capacidad de remoción**

Microorganismos	Contam.	Conc. inicial	Condiciones de reacción	Capacidad de remoción		Art.
				Microbios	%	
<b><i>Chlorella sp.</i></b> (microalga)	Cd(II)	100 mg/L	pH : 6 T = 26 °C; Tiempo = 48 h	169.9 mg/g	217.4 mg/g	Shen Ying et al., (2017, p.1)
<b><i>Chlorella sp.</i></b> (microalga)	Cd(II)	10 mg/L	pH : 6.0; T = illuminac. Tiempo = 24 h	-	92.5%	Shen Ying et al., (2018, p.1)
<b><i>Leclercia adecarboxylata</i></b> (bacteria)	Pb(II)	200 mg/L	pH : 5.0; T = 30 °C; Tiempo = 24 h	~40.0%	93.0%	Teng Zedong et al., (2020, p.1)
<b><i>Enterobacter sp.</i></b> (bacteria)	Pb(II)	1000 mg/L	pH : 7.2–7.4; T = 30 °C; Tiempo = 3 día	-	24.1%	Chen Haoming et al., (2019, p.1)
<b><i>Enterobacter sp.</i></b> (bacteria)	Pb(II)	1000 mg/L	pH : 7.2–7.4; T = 30 °C; Tiempo = 3 día	-	60.9%	
<b><i>Streptomyces violarius</i></b> (bacteria)	Mn(II)	3 mg/L	pH : n.a.; T = 40 °C; Tiempo = 3–5 día	-	67.8–74.8%	Youngwilai Atcharaporn et al., (2020, p.2)
<b><i>UV-mutant Bacillus subtilis</i></b> (bacteria)	Co contam. por Hg-Pb	Hg, Pb: 100, 1040 mg/L	pH : 5; T = 20 °C; Tiempo = 24 h	-	53.7 mg/g Hg; 83.0 mg/g Pb	Wang Ting et al., (2018, p.1)
<b><i>Enterococcus avium</i></b> (bacteria)	Cu(II), Fe(III), Pb(II), Cd(II), Ni(II), Cr(III)	1 mM	pH : 7.5; T = 30 °C; Tiempo = 24 h	42.1, 24.1, 51.0, 13.5, 46.0, 9.2%, respectivamente	89.2, 77.0, 97.1, 51.5, 98.1, 12.4%, respectivamente	Yan Jia et al., (2018, p.1)
<b><i>Shewanella sp.</i></b> (bacteria)	Cr(VI)	55 mg/L	pH : 7.0–7.5; T = 30 °C;	47.4%	96.3%	Shen Liang et al.,

			Tiempo = 48 h			(2018, p.1)
<b><i>Lysinibacillus sp.</i></b> (bacteria)	U(VI)	25 mg/L	pH : 4.5; T = 30 °C; Tiempo = 16 h	-	149.3 mg/g	Zhao C. et al., (2019, p.1)
<b><i>Alcaligenes faecalis</i></b>	Azul de metileno	50 mg/L	pH; T = 30 °C; Tiempo = 48 h	81.5%	89.1%	Bharti Vikash et al., (2019, p.1)
<b><i>Brevibacillus parabrevis</i></b>	Congo rojo	500 mg/L	pH; T = 30 °C; Tiempo = 48 h	77.8%	88.9%	Talha Md Abu et al., (2018, p.2)
<b><i>Burkholderia cepacia</i></b>	Verde malaquita	100 mg/L	pH : 5.5; T = 30 °C Tiempo = 96 h	87.7%	99.3%	Li Beibei et al., (2018, p.1)
<b><i>Paracoccus denitrificans</i></b>	Dimetil formamida	2000 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C Tiempo = 14 h	-	100%	Zheng Yuan et al., (2016, p.2)
<b><i>Cupriavidus Spp.</i></b>	Benzo[a] pireno	50 mg/L	pH : 7.2–7.4; T = 28 °C Tiempo = 14 día	-	> 80%	Huang Jiaming et al., (2019, p.2)
<b><i>Pseudomonas aeruginosa</i></b>	acenafteno	3.5 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C Tiempo= 120 h	-	76–78%	Lu Li et al., (2018, p.2)
<b><i>Pseudomonas taiwanensis</i></b>	Lawsone	200 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C Tiempo = 9 h	60–65%	100%	Yang Li et al., (2018, p.1)
<b><i>Sphingomonas sp.</i></b>	4-bromodifen glio éter	500 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C; Tiempo = 24 h	10%	93%	Du Jingting et al., (2016, p.2)
<b>nonilfenol degradante bacterias</b>	nonilfenol	50 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C; Tiempo = 8 día	43.3%	69.5%	Lou Liping et al., (2019, p.1)
<b><i>Pseudomonas sp.</i></b>	tolueno	2.2 g/m <sup>3</sup>	pH : 6.8; T = 25–41 °C; Tiempo = 139–157 día	-	98.7%	Liu Shu H. et al., (2019, p.2)

<b><i>Pseudomonas sp.</i></b>	tolueno	< 5 g/m <sup>3</sup>	pH : 6.8; T = 25–30 °C; Tiempo = 5 día	-	93.7–95.8%	Lin Chin Wen et al., (2019, p.1)
<b><i>Pseudomonas aeruginosa</i></b>	Bisfenol A	46 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C; Tiempo = 24 h	< 20%	> 80%	Mita L. et al., (2016, p.1)
<b><i>Arthrobacter sp.</i></b>	atrazina	50 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C; Tiempo = 1 h	90%	100%	Yu T. et al., (2020, p.1)
<b><i>Pseudomonas citronellolis</i></b>	Fenol	600, 800, 1000 mg/L	pH : 7.0; T = 30 °C; Tiempo = 60 h	29,6%, 24,5%, 0%, respectivamente	98,9%, 90,5%, 69,6%, respectivamente	Zhao Ling et al., (2020, p.1)

Se tiene que, de acuerdo a la tabla 4, los factores involucrados en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados pueden encontrarse afectados por diversos factores ambientales, como la temperatura, el pH, la concentración inicial de contaminantes y el tiempo de contacto, pero la temperatura, el pH son los factores clave que afectan a la eficacia de la eliminación. Por lo tanto, la exploración de las condiciones óptimas para la máxima eliminación de contaminantes es crucial para la aplicación de la tecnología de inmovilización de microorganismos basada en MC.

Los resultados encontrados se deben a que la temperatura afecta a la actividad de los microorganismos y al rendimiento de los portadores asociados a los MC y ello es corroborado por estudios como Abu Talha et al., (2018, p.1) y Bharti et al., (2019, p.2), que han demostrado que la tasa de descoloración de los colorantes aumentó con un gradiente de temperatura de 20 a 30 °C, lo que podría explicarse por la mayor capacidad de crecimiento y metabolismo de las bacterias funcionales.

Así mismo lo reafirman en sus estudios Zhao Ling et al., (2020, p.1), Yu T. et al., (2020, p.1), Lin Chin Wen et al., (2019, p.1), Lou Liping et al., (2019, p.1), Huang Jiaming et al., (2019, p.2), con una temperatura de 30°C, 30°C, 25 a 30°C, 30°C, 28°C; respectivamente.

Siendo así la temperatura uno de los factores que intervienen en la capacidad de remoción; por influencia que presenta en la solubilidad del oxígeno en el sistema de

reacción, lo que a su vez puede afectar indirectamente a la actividad de los microorganismos (Yang Li et al., 2018, p.1).

Pero también el pH, desempeña un papel fundamental en la eliminación de los contaminantes, ya que afecta a la actividad de los microorganismos, a las propiedades de carga superficial de los metales (loides) y de los contaminantes orgánicos iónicos, y a las propiedades fisicoquímicas de los McMIC.

Así también Mita L. et al., (2016, p.1); señalan que la actividad microbiana es sensible al pH ambiental. En general, los valores de pH favorables para el crecimiento y la actividad de la mayoría de los microorganismos, oscilan entre 6,0 y 8,0. Así mismo, Lin Chin Wen et al., (2019, p.1); afirma que más del 90% de la degradación de los contaminantes se logró a niveles de pH que van de 6,0 a 7,0.

Así también lo corroboran los siguientes autores mostrados en la tabla 4: Liu Shu H. et al., (2019, p.2), Shen Ying et al., (2018, p.1), Shen Ying et al., (2017, p.1), Lin Chin Wen et al., (2019, p.1) y Yu T. et al., (2020, p.1),

## V. CONCLUSIONES

La importancia de la aplicación de complejos inmovilizados de microorganismos y material carbonoso para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos es la eliminación de diversos contaminantes del suelo, las aguas residuales y los gases de escape que se genera con la inmovilización de los diversos microorganismos, así mismo se puede realizar las siguientes conclusiones en base a los objetivos específicos estudiados.

Los microorganismos con mayor uso son las bacterias, siendo ello corroborado por el 98% de los investigadores. Además, también se tiene que los contaminantes orgánicos degradados con microorganismos inmovilizados incluyen principalmente tintes, bencenos, HAPs y sus derivados, hidrocarburos de petróleo y contaminantes orgánicos diversos. Ello debido a que varias bacterias degradadoras de contaminantes orgánicos inmovilizadas en los CMs (principalmente BC y AC) contribuyen a la completa degradación de los contaminantes orgánicos en un corto periodo de tiempo (0-24h).

Los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos son la adsorción y el atrapamiento, donde la adsorción presenta un 71% de estudios que lo aplican con 17 de 24 estudios, mientras que el atrapamiento un 29% con 7 de 24 estudios aplicados. Ello debido a que la adsorción es uno de los métodos más importantes y útiles para la inmovilización de microorganismos debido a su simplicidad y fácil funcionamiento.

Los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados se ven influidas por la temperatura y el pH. Por lo tanto, la exploración de las condiciones óptimas para la máxima eliminación de contaminantes es crucial para la aplicación de la tecnología de inmovilización de microorganismos basada en MC. Además, se ha demostrado que la tasa de descoloración de los colorantes aumenta con un gradiente de temperatura de 20 a 30 °C, lo que podría explicarse por la mayor capacidad de crecimiento y metabolismo de las bacterias funcionales. Pero también el pH, desempeña un papel fundamental en la eliminación de los contaminantes, ya que, afecta a la actividad de los microorganismos, a las propiedades de carga superficial de los metales (loides) y de los contaminantes orgánicos iónicos, y a las propiedades fisicoquímicas de los McMIC.

## **VI. RECOMENDACIONES**

La biodegradación por bacterias inmovilizadas que degradan contaminantes orgánicos e inorgánicos puede proporcionar una opción ecológica para el tratamiento de medios ambientales, sin embargo, este mecanismo de biodegradación necesita ser investigado más a fondo; por ello se realiza las siguientes recomendaciones:

Las células inmovilizadas han sido ampliamente exploradas en el tratamiento de múltiples contaminantes orgánicos y contaminantes inorgánicos, sin embargo, no se han realizado estudios sistemáticos sobre la biodegradación de productos farmacéuticos (por ejemplo, antibióticos) mediante esta tecnología; por ello se recomienda ahondar en dicho tema.

Se recomienda realizar la comparación de la combinación de compuestos carbonosos y las bacterias funcionales, ya que, se podría lograr la eliminación simultánea de varios contaminantes por parte de los CMs inmovilizados con dos o más tipos de microorganismos con diferentes funciones.

Por último, es indispensable realizar investigaciones más profundas sobre la seguridad ecológica y las funciones metabólicas de los microorganismos inmovilizadas antes de su aplicación en el control de la contaminación ambiental.

## REFERENCIAS

- ABBAS, Zohaib, et al. A critical review of mechanisms involved in the adsorption of organic and inorganic contaminants through biochar. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, vol. 11, no 16, p. 1-23. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3790-1>
- BENSON, Nsikak U.; BASSEY, David E.; PALANISAMI, Thavamani. COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, 2021, vol. 7, no 2, p. e06343. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06343>
- BHATIA, S. C.; DEVRAJ, Sarvesh. Pollution control in textile industry. WPI Publishing, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/9781315148588>
- BHARTI, Vikash, et al. Biodegradation of methylene blue dye in a batch and continuous mode using biochar as packing media. *Environmental research*, 2019, vol. 171, p. 356-364. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.051>
- BJØRKLUND, Geir, et al. Uranium in drinking water: a public health threat. *Archives of Toxicology*, 2020, vol. 94, no 5, p. 1551-1560. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02676-8>
- BONCEL, Sławomir, et al. Interactions of carbon nanotubes with aqueous/aquatic media containing organic/inorganic contaminants and selected organisms of aquatic ecosystems—a review. *Chemosphere*, 2016, vol. 136, p. 211-221. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.095>
- BORAH, Preetismita; KUMAR, Manish; DEVI, Pooja. Types of inorganic pollutants: metals/metalloids, acids, and organic forms. En *Inorganic Pollutants in Water*. Elsevier, 2020. p. 17-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0>
- BORAH, Preetismita; KUMAR, Manish; DEVI, Pooja. Types of inorganic pollutants: metals/metalloids, acids, and organic forms. En *Inorganic*

Pollutants in Water. Elsevier, 2020. p. 17-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00002-0>

BOUABIDI, Zineb B.; EL-NAAS, Muftah H.; ZHANG, Zhien. Immobilization of microbial cells for the biotreatment of wastewater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, vol. 17, no 1, p. 241-257. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0795-7>

BRAGHIROLI, Flavia Lega, et al. Activated biochar as an effective sorbent for organic and inorganic contaminants in water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, vol. 229, no 7, p. 1-22. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3889-8>

CHEN, Haoming, et al. Enhanced Pb immobilization via the combination of biochar and phosphate solubilizing bacteria. *Environment international*, 2019, vol. 127, p. 395-401. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.068>

CHEN, Yaoning, et al. Synthesis, application and mechanisms of Ferro-Manganese binary oxide in water remediation: A review. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 388, p. 124313. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124313>

DAS, Manab; ADHOLEYA, Alok. Potential uses of immobilized bacteria, fungi, algae, and their aggregates for treatment of organic and inorganic pollutants in wastewater. *En Water challenges and solutions on a global scale*. American Chemical Society, 2016. p. 319-337. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/bk-2015-1206.ch015>

DU, Jingting, et al. The biosorption capacity of biochar for 4-bromodiphengl ether: study of its kinetics, mechanism, and use as a carrier for immobilized bacteria. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no 4, p. 3770-3780. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5619-8>

FAN, Jixiang, et al. Bio-engineered graphene-based cage for efficient local enrichment and biodegradation of aqueous organic wastes. *Scientific*

Reports, 2017, vol. 7, no 1, p. 1-11. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01539-0>

GADORE, Vishal; AHMARUZZAMAN, Md. Tailored fly ash materials: A recent progress of their properties and applications for remediation of organic and inorganic contaminants from water. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, vol. 41, p. 101910. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101910>

GAI, Shuang, et al. Structural Design of Low Toxicity Metal–Organic Frameworks for Multifunction Detection of Organic and Inorganic Contaminants from Water. *Inorganic Chemistry*, 2021, vol. 60, no 14, p. 10387-10397. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00936>

GIESE, Ellen C., et al. Immobilized microbial nanoparticles for biosorption. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2020, vol. 40, no 5, p. 653-666. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1751583>

HENA, Sufia; ZNAD, Hussein. Membrane bioreactor for pharmaceuticals and personal care products removal from wastewater. En *Comprehensive analytical chemistry*. Elsevier, 2018. p. 201-256. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.005>

HUANG, Jiaming, et al. Application of independent immobilization in benzo [a] pyrene biodegradation by synthetic microbial consortium. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no 20, p. 21052-21058. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05477-4>

JHA, Ankita, et al. Biofiltration techniques in the remediation of hazardous inorganic and organic contaminants. En *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs)*. Elsevier, 2022. p. 137-154. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823946-9.00012-7>

KINIGOPOULOU, Vasiliki, et al. Microplastics as carriers of inorganic and organic contaminants in the environment: A review of recent progress.

Journal of Molecular Liquids, 2022, p. 118580. Disponible en:  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118580>

KRASŇAN, Vladimír, et al. Immobilization of cells and enzymes to LentiKats®. Applied microbiology and biotechnology, 2016, vol. 100, no 6, p. 2535-2553. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7283-4>

LELLIS, Bruno, et al. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. Biotechnology Research and Innovation, 2019, vol. 3, no 2, p. 275-290. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>

LI, Beibei, et al. New nano-biomaterials for the removal of malachite green from aqueous solution via a response surface methodology. Water research, 2018, vol. 146, p. 55-66. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.006>

LI, Weila; ACHAL, Varenyam. Environmental and health impacts due to e-waste disposal in China—A review. Science of the Total Environment, 2020, vol. 737, p. 139745. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139745>

LIN, Chi-Wen, et al. Biodegradation kinetics and microbial dynamics of toluene removal in a two-stage cell-biochar-filled biotrickling filter. Journal of Cleaner Production, 2019, vol. 238, p. 117940. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117940>

LIU, Shu-Hui, et al. Microbial community in a pilot-scale biotrickling filter with cell-immobilized biochar beads and its performance in treating toluene-contaminated waste gases. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019, vol. 144, p. 104743. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104743>

LOU, Liping, et al. Adsorption and degradation in the removal of nonylphenol from water by cells immobilized on biochar. Chemosphere, 2019, vol. 228, p. 676-684. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.151>

- LU, Jiasheng, et al. Application of cell immobilization technology in microbial cocultivation systems for biochemicals production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, vol. 59, no 39, p. 17026-17034. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01867>
- LU, Li, et al. Removal of acenaphthene from water by Triton X-100-facilitated biochar-immobilized *Pseudomonas aeruginosa*. *RSC advances*, 2018, vol. 8, no 41, p. 23426-23432. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C8RA03529F>
- MACHADO, Ignacio; DOL, Isabel. Optimization of straightforward methods for the monitoring of organic and inorganic contaminants in strawberries. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, vol. 103, p. 104090. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104090>
- MITA, Luigi, et al. Bisphenol A removal by a *Pseudomonas aeruginosa* immobilized on granular activated carbon and operating in a fluidized bed reactor. *Journal of hazardous materials*, 2015, vol. 291, p. 129-135. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.072>
- MOHAMMADI, Ali Akbar, et al. Nickel and iron-based metal-organic frameworks for removal of organic and inorganic model contaminants. *Environmental Research*, 2022, vol. 212, p. 113164. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113164>
- MOHAMMAD, Ali, et al. (ed.). *Inorganic pollutants in wastewater: Methods of analysis, removal and treatment*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00007-X>
- MOHAMMADZADEH KAKHKI, Roya; TAYEBEE, Reza; HEDAYAT, Sara. Phthalhydrazide nanoparticles as new highly reusable organic photocatalyst in the photodegradation of organic and inorganic contaminants. *Applied Organometallic Chemistry*, 2018, vol. 32, no 2, p. e4033. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/aoc.4033>
- MON, Marta, et al. Multivariate metal–organic frameworks for the simultaneous capture of organic and inorganic contaminants from water. *Journal of the*

American Chemical Society, 2019, vol. 141, no 34, p. 13601-13609.  
Disponibile en: <https://doi.org/10.1021/jacs.9b06250>

NASROLLAHZADEH, Mahmoud, et al. Carbon-based sustainable nanomaterials for water treatment: state-of-art and future perspectives. *Chemosphere*, 2021, vol. 263, p. 128005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128005>

ORONA-NÁVAR, Carolina, et al. Microplastics in Latin America and the Caribbean: A review on current status and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 309, p. 114698. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114698>

PALANIVEL, Thenmozhi Murugaian, et al. Bioremediation of copper by active cells of *Pseudomonas stutzeri* LA3 isolated from an abandoned copper mine soil. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 253, p. 109706. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109706>

PARTOVINIA, Ali; RASEKH, Behnam. Review of the immobilized microbial cell systems for bioremediation of petroleum hydrocarbons polluted environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018, vol. 48, no 1, p. 1-38. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1439652>

PENTEADO, Priscila Bassi, et al. Inorganic pollution in urban topsoils of Latin American cities: A systematic review and future research direction. *CATENA*, 2022, vol. 210, p. 105946. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105946>

PRICE, Jeffrey; FORREST, Jeffrey. Practical airport operations, safety, and emergency management: Protocols for today and the future. Butterworth-Heinemann, 2016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800515-6.00012-3>

PRIYADARSHANEE, Monika, et al. Mechanism of toxicity and adverse health effects of environmental pollutants. En *Microbial Biodegradation and*

Bioremediation. Elsevier, 2022. p. 33-53. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85455-9.00024-2>

PROPP, Victoria R., et al. Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 276, p. 116474. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116474>

RAHMAN, Zeeshanur. An overview on heavy metal resistant microorganisms for simultaneous treatment of multiple chemical pollutants at co-contaminated sites, and their multipurpose application. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, vol. 396, p. 122682. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122682>

RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, Ángel, et al. Assessment of human health hazards associated with the dietary exposure to organic and inorganic contaminants through the consumption of fishery products in Spain. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 557, p. 808-818. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.035>

SANTOS-FRANCÉS, Fernando, et al. Concentration of uranium in the soils of the west of Spain. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 236, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822279-9.00006-3>

SHEN, Liang, et al. Enhance wastewater biological treatment through the bacteria induced graphene oxide hydrogel. *Chemosphere*, 2018, vol. 190, p. 201-210. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.105>

SHEN, Ying, et al. Microalgal-biochar immobilized complex: a novel efficient biosorbent for cadmium removal from aqueous solution. *Bioresource technology*, 2017, vol. 244, p. 1031-1038. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.085>

SHEN, Ying, et al. Enhancing cadmium bioremediation by a complex of water-hyacinth derived pellets immobilized with *Chlorella* sp. *Bioresource technology*, 2018, vol. 257, p. 157-163. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.060>

- SHIKUKU, Victor (ed.). Effects of emerging chemical contaminants on water resources and environmental health. IGI Global, 2019. Disponible en: [https://books.google.com.pe/books?id=MdPQDwAAQBAJ&lpg=PP1&ots=X\\_PzcQqQ4n&dq=Chapter%2013%20-%20Ecological%20health%20risks%20of%20emerging%20organic%20contaminants&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=Chapter%2013%20-%20Ecological%20health%20risks%20of%20emerging%20organic%20contaminants&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=MdPQDwAAQBAJ&lpg=PP1&ots=X_PzcQqQ4n&dq=Chapter%2013%20-%20Ecological%20health%20risks%20of%20emerging%20organic%20contaminants&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=Chapter%2013%20-%20Ecological%20health%20risks%20of%20emerging%20organic%20contaminants&f=false)
- SPEIGHT, J. G.; SPEIGHT, J. G. Sources and types of inorganic pollutants. Environmental Inorganic Chemistry for Engineers, 2017, p. 231-282. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849891-0.00005-9>
- TALHA, Md Abu, et al. Bioremediation of Congo red dye in immobilized batch and continuous packed bed bioreactor by *Brevibacillus parabrevis* using coconut shell bio-char. Bioresource Technology, 2018, vol. 252, p. 37-43. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.081>
- TANG, Kuok Ho Daniel, et al. Immobilized enzyme/microorganism complexes for degradation of microplastics: A review of recent advances, feasibility and future prospects. Science of The Total Environment, 2022, p. 154868. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154868>
- TANG, Yihong; XU, Jing. Application of microbial precipitation in self-healing concrete: A review on the protection strategies for bacteria. Construction and Building Materials, 2021, vol. 306, p. 124950. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124950>
- TANUM, Junjira, et al. Generation of zinc ion-rich surface via in situ growth of ZIF-8 particle: Microorganism immobilization onto fabric surface for prohibit hospital-acquired infection. Chemical Engineering Journal, 2022, p. 137054. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137054>
- TENG, Zedong, et al. Enhanced passivation of lead with immobilized phosphate solubilizing bacteria beads loaded with biochar/nanoscale zero valent iron composite. Journal of hazardous materials, 2020, vol. 384, p. 121505. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121505>

- THOMAS, Jennifer L., et al. Application of a co-polymeric solid phase extraction cartridge to residues containing nitro-organic explosives. *Forensic Chemistry*, 2018, vol. 11, p. 38-46. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.08.006>
- TIWARI, Neha; GARUA, Bhavika; SHARMA, Jai Gopal. Microbial diversity, interactions, and biodegradation/biotransformation of organic and inorganic contaminants. *En Wastewater Treatment Reactors*. Elsevier, 2021. p. 341-372. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823991-9.00001-0>
- USMAN, Muhammad; HO, Yuh-Shan. A bibliometric study of the Fenton oxidation for soil and water remediation. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 270, p. 110886. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110886>
- VARJANI, Sunita J.; GNANSOUNOU, Edgard; PANDEY, Ashok. Comprehensive review on toxicity of persistent organic pollutants from petroleum refinery waste and their degradation by microorganisms. *Chemosphere*, 2017, vol. 188, p. 280-291. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.005>
- VARJANI, Sunita J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*, 2017, vol. 223, p. 277-286. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- VERLA, Andrew Wirnkor, et al. Microplastic–toxic chemical interaction: a review study on quantified levels, mechanism and implication. *SN Applied Sciences*, 2019, vol. 1, no 11, p. 1-30. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1352-0>
- VERMA, Priyanshu; RATAN, Jatinder Kumar. Assessment of the negative effects of various inorganic water pollutants on the biosphere—an overview. *Inorganic Pollutants in Water*, 2020, p. 73-96. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00005-6>

- WANG, Ting, et al. Adsorption of heavy metals from aqueous solution by UV-mutant *Bacillus subtilis* loaded on biochars derived from different stock materials. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2018, vol. 148, p. 285-292. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.039>
- WASEWAR, Kailas L.; SINGH, Surinder; KANSAL, Sushil Kumar. Process intensification of treatment of inorganic water pollutants. En *Inorganic Pollutants in Water*. Elsevier, 2020. p. 245-271. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818965-8.00013-5>
- YADAV, Ashutosh, et al. Phytotoxicity, cytotoxicity and genotoxicity evaluation of organic and inorganic pollutants rich tannery wastewater from a Common Effluent Treatment Plant (CETP) in Unnao district, India using *Vigna radiata* and *Allium cepa*. *Chemosphere*, 2019, vol. 224, p. 324-332. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.124>
- YAN, Jia, et al. Enhanced sulfate and metal removal by reduced graphene oxide self-assembled *Enterococcus avium* sulfate-reducing bacteria particles. *Bioresource technology*, 2018, vol. 266, p. 447-453. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.012>
- YANG, Li, et al. Biodegradation of 2-hydroxy-1, 4 naphthoquinone (lawsone) by *Pseudomonas taiwanensis* LH-3 isolated from activated sludge. *Scientific reports*, 2017, vol. 7, no 1, p. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06338-1>
- YOUNGWILAI, Atcharaporn, et al. Simultaneous manganese adsorption and biotransformation by *Streptomyces violaceus* strain SBP1 cell-immobilized biochar. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 713, p. 136708. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136708>
- YU, Tianmiao, et al. A bio-functions integration microcosm: self-immobilized biochar-pellets combined with two strains of bacteria to remove atrazine in water and mechanisms. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 384, p. 121326. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121326>

ZHAO, Changsong, et al. Uranium (VI) adsorption from aqueous solutions by microorganism-graphene oxide composites via an immobilization approach. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 236, p. 117624. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117624>

ZHAO, Ling, et al. Biochar as simultaneous shelter, adsorbent, pH buffer, and substrate of *Pseudomonas citronellolis* to promote biodegradation of high concentrations of phenol in wastewater. *Water Research*, 2020, vol. 172, p. 115494. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115494>

ZHENG, Yuan, et al. Efficient simultaneous adsorption-biodegradation of high-concentrated N, N-dimethylformamide from water by *Paracoccus denitrificans*-graphene oxide microcomposites. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, no 1, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/srep20003>

## ANEXOS:

**Anexo N°1. Tabla de matriz de categorización apriorística**

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	CRITERIO 1
<p><b>Analizar los microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización</b></p>	<p>¿Cuáles son los microorganismos con mayor uso para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante tecnología de inmovilización?</p>	<p>Microorganismos con mayor uso (Mohammadi A. et al., 2022, p.2).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bacterias</li> <li>• Microalgas</li> <li>• Levadura</li> </ul> <p>(Verma P. y Ratan J., 2020, p.2).</p>	<p>De acuerdo al tipo de microorganismo y la cantidad de estudios</p>
<p><b>Clasificar los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos</b></p>	<p>¿Cuáles son los métodos de inmovilización más usados para la remediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante compuestos carbonosos?</p>	<p>Métodos de inmovilización más usados (Boncel S. et al., 2016, p.4).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adsorción</li> <li>• Atrapamiento</li> </ul> <p>(Tanum J. et al., 2022, p.5).</p>	<p>De acuerdo al contaminante</p>
<p>Identificar los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados</p>	<p>¿Cuáles son los factores que intervienen en la capacidad de remoción de los adsorbentes inmovilizados?</p>	<p>Factores que intervienen en la capacidad de remoción (Machado I. y Dol I., 2021, p.2).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura</li> <li>• pH,</li> <li>• Concentración inicial de contaminantes</li> </ul> <p>(Kinigopoulou V. et al., 2022, p.3).</p>	<p>De acuerdo a la capacidad de remoción de los materiales carbonosos</p>

**Anexo 2. Ficha de análisis de contenido**

 UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	<b>FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS</b>
---	--------------------------------------

**TÍTULO:**

PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACIÓN	LUGAR DE PUBLICACIÓN
TIPO DE INVESTIGACIÓN:		AUTOR (ES):
CÓDIGO		
METODOLOGÍA		
ESPECIE DE MICROORGANISMOS		
MÉTODOS DE INMOVILIZACIÓN		
FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA CAPACIDAD DE REMOCIÓN		
RESULTADOS		
CONCLUSIONES:		



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, ESPINOZA FARFAN EDUARDO RONALD, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "Remediación Microbiana de Contaminantes Orgánicos e Inorgánicos mediante Tecnología de Inmovilización de Compuestos Carbonosos: Revisión sistemática", cuyos autores son JALISTO CONDORI DAVID, ORDINOLA QUISPE MIGUEL ALFREDO, constato que la investigación tiene un índice de similitud de %, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

Hemos revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

SAN JUAN DE LURIGANCHO, 30 de Diciembre del 2022

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
ESPINOZA FARFAN EDUARDO RONALD : 40231227 <b>ORCID:</b> 0000-0003-4418-7009	Firmado electrónicamente por: ERESPINOZAF el 30- 12-2022 11:15:28

Código documento Trilce: INV - 1013000