



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Tecnología Sostenible en la Remediación de Contaminantes en
Agua y Suelo Empleando Biosurfactantes y sus Estrategias de
Mejora: Revisión Sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Gallo Chipana, Ibet Placida (ORCID: 0000-0003-4000-2863)
Montesinos Durand, Luis Eduardo (ORCID: 0000-0002-0407-7908)

ASESOR:

Dr. Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio (ORCID: 0000-0003-1485-5854)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos
LIMA – PERÚ

2022

DEDICATORIA

A dios por darme salud y la fortaleza necesaria para salir adelante en las dificultades de cada etapa en mi vida, a nuestros padres quienes fueron nuestro principal apoyo y motivación a lo largo de nuestra formación profesional, a nuestros docentes que con su dedicación nos ayudaron a alcanzar nuestro objeto.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar nuestro agradecimiento a nuestro asesor de tesis, Dr. Fernando Antonio Sernaque, por la dedicación y apoyo que nos brindó a lo largo de la elaboración de nuestra tesis, asimismo a nuestros abuelos quienes han sido parte importante dentro de nuestras vidas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA	14
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	14
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	14
3.3. Escenario de estudio	16
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	29
VI. RECOMENDACIONES.....	30
REFERENCIAS.....	31
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Matriz de Categorización Apriorística</i>	15
<i>Tabla 2. Estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible</i>	20
<i>Tabla 3. Cambios presentados en el sistema acuático y terrestre aplicando biosurfactantes</i>	22

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Principales características, fuentes principales y toxicidad de los HAP</i> -----	9
<i>Figura 2. Materias primas, beneficios, inconvenientes y aplicaciones de los biosurfactantes</i>	12
<i>Figura 3. Biodegradación de contaminantes usando biosurfactantes</i> -----	12

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1. Clasificación de los HAP en función de su aparición</i>	10
<i>Gráfico 2. Procedimiento de selección de artículos</i>	17
<i>Gráfico 3. Porcentaje de eficiencia en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante</i>	25
<i>Gráfico 4. Porcentaje de eficiencia en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante</i>	27

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

HAP	: hidrocarburos aromáticos policíclicos
COH	: compuestos orgánicos hidrófobos
MOS	: materia orgánica del suelo
EPA	: Agencia de Protección del Medio Ambiente

RESUMEN

Este trabajo más relevante de las tecnologías sostenibles en la remediación de contaminantes en agua y suelo empleando biosurfactantes y sus estrategias de mejora; para la cual presentó una metodología de tipo aplicada de diseño narrativo de tópico; donde se realizó el estudio de búsqueda, recolección y selección de estudios.

Mediante los 27 artículos científicos añadidos al estudio se tuvo; que las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible es mediante el desarrollo de cepas de alto rendimiento mediante el empleo de ingeniería metabólica; siendo la estrategia más empleada la adición de genes y eliminación de genes. Además, los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante se muestran en la eficiencia del tratamiento del agua contaminado, presentando un promedio del 80 al 90%. debido a que al ayudar en la remediación de los contaminantes como hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos monoaromáticos y metales pesados que se generan en la industria del petróleo como principal contaminante; mejora la eficiencia de la biodegradación debido a su propiedad de superficie activa. Por último, los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible también se muestran en la eficiencia del tratamiento del suelo, donde, se demostró que existe un porcentaje de eficiencia de su uso en menor proporción a diferencia de su aplicación en el sistema acuático; siendo este que presenta un promedio porcentual del 60 al 80%.

Palabras clave: tecnologías sostenibles, remediación, contaminación del agua, suelos contaminados, biosurfactantes

ABSTRACT

The objective of this research work is to determine which are the most relevant aspects of sustainable technologies in the remediation of contaminants in water and soil using biosurfactants and their improvement strategies; for which it presented a methodology of applied type of topical narrative design; where the search, collection and selection of studies were carried out.

Through the 27 scientific articles added to the study, it was found that the strategies to improve the production of biosurfactants and increase their power as a sustainable technology is through the development of high performance strains through the use of metabolic engineering; being the most used strategy the addition of genes and elimination of genes. In addition, the changes presented in the contaminated aquatic system by applying the biosurfactant are shown in the efficiency of the contaminated water treatment, presenting an average of 80 to 90%. due to the fact that by helping in the remediation of contaminants such as polyaromatic hydrocarbons, monoaromatic hydrocarbons and heavy metals that are generated in the oil industry as the main pollutant; it improves the efficiency of biodegradation due to its surface active property. Finally, the changes presented in the contaminated terrestrial system by applying the biosurfactant as a sustainable technology are also shown in the efficiency of soil treatment, where, it was demonstrated that there is a percentage of efficiency of its use in a lower proportion as opposed to its application in the aquatic system; being this one that presents an average percentage of 60 to 80%.

Keywords: sustainable technologies, remediation, water pollution, contaminated soils, biosurfactants.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es vital para la existencia continua de todas las formas de vida conocidas en la tierra; es un recurso único e insustituible (Liu wen shen et al., 2019). Existe tierra adentro como agua superficial (p. ej., lagos, lagunas, estanques, arroyos y ríos) o como agua subterránea (p. ej., pozos excavados a mano, perforaciones y manantiales) (Islam M. et al., 2017, p.2). Y la calidad del suelo y del agua determina la salud de un ecosistema acuático (Morgado E. et al., 2018, p.1).

El almacenamiento de agua subterránea y la productividad de los acuíferos suelen ser altos dentro de las cuencas sedimentarias, sin embargo, la disponibilidad de agua subterránea no es una solución universal al deterioro de la calidad del agua (Mahmoud E. y Ghoneim A., 2016, p.1).

La calidad de las aguas subterráneas es tan importante como su inmensa cantidad y el agua potable no solo debe ser segura sino también aceptable en términos de apariencia, olor y sabor (Liquete Camilo et al., 2016, p.2). Aunque los estándares de agua potable pueden diferir según el país y la región, el agua subterránea considerada segura para beber no debería representar un riesgo para la salud de sus consumidores durante toda la vida de consumo (OMS, 2017, p.1).

Existe el desafío de la contaminación del agua derivada de actividades antropogénicas o procesos geológicos naturales (Karatat A. y Karatats E., p. 4). Cuando estos contaminantes ingresan al subsuelo, persisten, a veces, por períodos más prolongados dentro del suelo y el sistema acuífero, causando graves problemas de salud cuando los humanos los ingieren más allá del límite permisible prescrito (Onwudili J et al., 2016, p.2).

La extracción de agua subterránea contaminada para beber se ha relacionado con cáncer (arsénico, asbesto), enfermedades hepáticas y renales (plomo, mercurio, cadmio) (Rahim D. et al., 2022, p.2). Así también, riesgos de embarazo y daño neurológico y menor coeficiente intelectual (plomo, arsénico) y enfermedades óseas y esqueléticas (plomo, fluoruro, cadmio), mientras que otros podrían representar una grave amenaza para la vegetación, el hábitat de los peces y la vida silvestre (Obinna I. et al., 2019, p.3).

Ante lo expuesto se puede mencionar a los surfactantes; quienes son derivados del petróleo o sintetizados químicamente que exhiben propiedades de tensión activa y, por lo tanto, se emplean en casi todas las tareas rutinarias diarias (Mohanty S. et al., 2021, p.2).

Cabe mencionar que, en 2016, el mercado de biosurfactantes fue de US\$ 30,64 mil millones y se esperaba que aumentara US\$ 39,86 mil millones en el año 2021. El mercado de biosurfactantes tiene una generación de ingresos de US\$ 1,8 mil millones con una ganancia anticipada del 8% en 2023 a US\$ 2,6 mil millones eso condujo a la generación de 540 kilo toneladas de biosurfactante (Gaur vIVEK k, et al., 2021, P.1).

Debido a las preocupaciones ambientales y las ventajas de los biosurfactantes sobre los sintéticos, a saber, la biodegradabilidad, la baja toxicidad, la estabilidad en una amplia temperatura y pH y sal, el enfoque de los investigadores se ha desplazado hacia los surfactantes microbianos (Varjani S. et al., 2017, p.3). Siendo llevado a la amplia gama de aplicaciones de biosurfactantes, incluso en el medio ambiente (Varjani S. et al., 2021, p.3).

Por tal motivo, ante lo expuesto se realiza la siguiente pregunta de estudio: ¿Cuáles son los aspectos más relevantes de las tecnologías sostenibles en la remediación de contaminantes en agua y suelo empleando biosurfactantes y sus estrategias de mejora?

Así mismo se detalla los siguientes problemas específicos:

PE1: ¿Cuáles son las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo?

PE2: ¿Cuáles son los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible?

PE3: ¿Cuáles son los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible?

De igual forma se plantean el objetivo de estudio: Determinar cuáles son los aspectos más relevantes de las tecnologías sostenibles en la remediación de contaminantes

en agua y suelo empleando biosurfactantes y sus estrategias de mejora; así también se plantearon los siguientes objetivos específicos del estudio:

OE1: Definir cuáles son las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo

OE2: Detallar cuáles son los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible

OE3: Detallar cuáles son los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible

Siendo así, que el estudio tiene como finalidad estudiar y recaudar investigaciones con los avances tecnológicamente factibles en la investigación de biosurfactantes que pueden permitir a los investigadores desarrollar tecnologías más seguras y confiables en la remediación del suelo y agua; por tal motivo el presente trabajo de investigación presenta una justificación teórica, siendo enfocados a los futuros investigadores para que se pueda despertar interés e incrementar estudios ampliando nuevos campos.

II. MARCO TEÓRICO

La tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo empleando biosurfactantes así como sus estrategias de mejora para una mayor remediación son descritas a continuación por diversos autores a nivel mundial quienes emplean biosurfactantes:

Zhang Junhui et al., (2016); en su artículo evaluó la eficiencia de eliminación de petróleo crudo de los biosurfactantes lipopeptídicos producidos por *B. atrophaeus* 5-2a y su viabilidad para su uso en la recuperación microbiana mejorada de petróleo. Para lo cual aisló una cepa productora de biosurfactantes, *Bacillus atrophaeus* 5-2a, de un suelo contaminado con petróleo en el yacimiento petrolífero de Ansai, en el noroeste de China y la producción de biosurfactantes por *B. atrophaeus* 5-2a se probó en medios de cultivo que contenían ocho fuentes de carbono y fuentes de nitrógeno. Dando como resultado que la producción de un biosurfactante crudo fue de $0,77 \text{ g L}^{-1}$ y su tensión superficial fue de $26,52 \pm 0,057 \text{ mN m}^{-1}$ en un medio basal que contiene azúcar moreno (fuente de carbono) y urea (fuente de nitrógeno), además, los biosurfactantes producidos por la cepa 5-2a demostraron una excelente actividad de esparcimiento de aceite y crearon una emulsión estable con aceite de parafina y los biosurfactantes tuvieron éxito en una prueba para simular la recuperación microbiana mejorada de petróleo, eliminando el 90,0 y el 93,9 % del petróleo crudo adsorbido en arena y papel de filtro, respectivamente.

Chen Qingguo et al., (2021); en su trabajo dos metales pesados, plomo (Pb) y mercurio (Hg), en sedimentos intermareales marinos fueron removidos por RB preparado a escala de laboratorio. Los resultados mostraron que el Pb y el Hg podrían eliminarse de manera eficiente del sedimento intermareal en el medio ambiente marino mediante el uso de RB producido por una cepa de *pseudomonas aeruginosa*. A una concentración crítica de micelas de $43,73 \text{ mg L}^{-1}$, se extrajo el 62,50 % de Pb y el 50,20 % de Hg de la muestra de sedimento intermareal marino que contenía $520,32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Pb y $13,15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Hg (peso seco).

El Sheshtawy H. et al., (2016); en su estudio la bacteria *Bacillus licheniformis* DSM = 13 cepa ATCC 14580 y la levadura *Candida albicans* IMRU 3669 se utilizaron para la producción de biosurfactantes. Las propiedades superficiales de los biosurfactantes producidos se confirmaron determinando el poder

de emulsificación y la tensión superficial y los biosurfactantes brutos se han extraído del crecimiento del cultivo sobrenadante. Los rendimientos de biosurfactantes crudos fueron de aproximadamente 1 y 12 g/l para *B. licheniformis* y *C. albicans* respectivamente. Además, los resultados revelaron que el poder de emulsificación se ha incrementado hasta un 96 % y un 65 % con queroseno para cepas bacterianas y de levadura, respectivamente. La tensión superficial disminuyó de 72 a 36 mN/m después de 72 h de incubación con *B. licheniformis* y 45 mN/m después de 4 días de incubación con *C. albicans*.

Phulpoto I. et al., (2020); presenta como objetivo principal de su estudio investigar la cepa bacteriana S2MT recientemente aislada para la producción de biosurfactantes similares a la surfactina y sus aplicaciones potenciales para la remediación de suelos contaminados con petróleo. En este estudio, la cepa S2MT se aisló del sedimento del lago y se identificó como *Bacillus nealsonii* según la microscopía electrónica transmitida (TEM) y la tipificación del ARNr 16S. La cepa S2MT produjo un biosurfactante que redujo la tensión superficial ($34,15 \pm 0,6$ mN/m) y mostró un excelente potencial emulsionante para el queroseno ($55 \pm 0,3\%$). Además, el rendimiento máximo del producto biosurfactante de 1300 mg/L se logró cuando la composición del medio de cultivo se optimizó a través de la metodología de superficie de respuesta (RSM). Los resultados mostraron que el 2% de glicerol y el 0,1% de NH₄ NO₃ fueron los mejores sustratos de carbono/nitrógeno para la producción de biosurfactantes.

Tripathi V. et al., (2020); Presenta como objetivo de su estudio investigar la capacidad de producción de biosurfactantes de cinco bacterias metabolizadoras de hidrocarburos poliaromáticos (PAH), como *Ochrobactrum anthropi* IITR07, *Pseudomonas mendocina* IITR46, *Microbacterium esteraromaticum* IITR47, *Pseudomonas aeruginosa* IITR48 y *Stenotrophomonas maltophilia* IITR87. Estas bacterias mostraron producción de biosurfactantes utilizando glucosa al 2% como sustrato rico; la cepa IITR47 produjo el más alto con 906 y 534 mg/L de biosurfactante en presencia de naftaleno y petróleo crudo como únicas fuentes de carbono. *P. aeruginosa* IITR48 mostró la menor tensión superficial a 29 N/m y el mayor índice de emulsión al 63 %. Los biosurfactantes producidos se identificaron como glicolípidos y ramnolípidos según el análisis de espectroscopia infrarroja transformada de Fourier.

Gaur Vivek K. et al., (2019); caracterizó el ramnolípido producido a partir de *Lysinibacillus sphaericus* IITR51 y se evaluó su capacidad para disolver pesticidas hidrofóbicos. *L. sphaericus* produjo 1,6 g/L de un biosurfactante aniónico que redujo la tensión superficial de 72 N/m a 52 N/m con un índice de emulsificación del 48 %. El biosurfactante se encontró estable en un amplio rango de pH (4,0–10,0), temperatura (4–100 °C), concentración de sal (2–14 %) y se identificó como ramnolípido. A la concentración de 90 mg/l, el ramnolípido mostró una disolución mejorada de α -, β -endosulfán y γ -hexaclorociclohexano hasta 7,2, 2,9 y 1,8 veces, respectivamente. Concluyendo mediante los resultados que la utilidad del ramnolípido para mejorar la disolución y, por lo tanto, aumentar la biodisponibilidad.

Wu Qun et al., (2019); Presenta como objetivo de investigación desarrollar un enfoque de ingeniería sistemática para mejorar la biosíntesis de surfactina. Primero, restauramos la actividad biosintética de la surfactina al integrar un gen *sfp completo* en el *Bacillus subtilis* no productor.168 y obtuvo un título de surfactina de 0,4 g/l. En segundo lugar, redujimos la competencia al eliminar los genes relacionados con la formación de biopelículas y las vías de péptido sintetasa/policétido sintasa no ribosomales (3,8 % del genoma total), lo que aumentó el título de surfactina en 3,3 veces. En tercer lugar, mejoramos la tolerancia celular a la surfactina al sobreexpresar proteínas potenciales asociadas a la autorresistencia, lo que aumentó aún más el título de surfactina en 8,5 veces. En cuarto lugar, aumentamos el suministro de ácidos grasos de cadena ramificada precursores mediante la ingeniería de la ruta de biosíntesis de ácidos grasos de cadena ramificada, lo que resultó en un aumento del título de surfactina a 8,5 g/l (un aumento de 20,3 veces). Finalmente, debido a la preferencia de la ruta glicolítica por el crecimiento celular, desviamos el precursor acetil-CoA lejos del crecimiento celular a la biosíntesis de surfactina al mejorar la transcripción de *srfA*.

Tiso Till et al., (2020); en su artículo se desarrolló casetes de expresión para la integración estable de los genes de biosíntesis de ramnolípidos en el genoma que superó los sistemas de expresión basados en plásmidos. Además, se mejoró la estabilidad genética de la cepa de producción mediante el uso de un promotor inducible. Para mejorar la síntesis de ramnolípidos, se eliminaron los rasgos que consumen energía y/o carbono: mutantes negativos para la síntesis de la maquinaria flagelar o el polímero de almacenamiento PHA mostraron un aumento de la producción en un 50%. La variación del tiempo de inducción dio como resultado un

aumento del 18% en los títulos. Se llevó a cabo un aumento de escala de los matraces de agitación utilizando un biorreactor de 1 L.

Jiao Song et al., (2017); en su estudio se identificaron y clonaron cuatro promotores potentes, *P groE*, *P cdd*, *P rplK* y *P sspE*, a partir del genoma de *B. subtilis* THY-7, un nuevo productor de surfactina que se identificó a partir del suelo con una concentración de 0,55 g . /L título de surfactina. Se seleccionó un promotor óptimo, *PgroE*, para reemplazar el promotor de la surfactina sintasa (*SrfA*) THY-7 nativo mediante recombinación homóloga de cruz simple; sin embargo, la cepa diseñada resultante que contiene el *PLa sustitución de groE* no sintetizó surfactina. Donde los resultados muestran que la capacidad impulsora de *Pg2* se mejoró aún más mediante la inclusión de dos mutaciones puntuales en las regiones -35 y -10 para producir el nuevo promotor *Pg3*. *Pg3* exhibió una actividad súper fuerte medida por la sobreexpresión del gen informador *lacZ* (aproximadamente 3000 U). La cepa de sustitución de *Pg3* THY-7/ *Pg3 - srfA* produjo hasta 9,74 g/L de surfactina en un fermentador de 5 L.

Roelants S. et al., (2016); en su estudio describió cepas prometedoras de *S. bombicola* que producen únicamente lactonas (utilizando una cepa de sobreexpresión de *sble* o únicamente SL ácidas (usando una cepa con delección de *sble*, que se describió recientemente, pero aún no se ha caracterizado: Δ *sble*). Las nuevas cepas de *S. bombicola* se utilizaron para investigar los procesos de producción (fermentación y purificación) de SL lactónicas o ácidas. Las cepas mantienen las altas productividades inherentes del tipo salvaje o incluso funcionan un poco mejor y, por lo tanto, representan una oportunidad industrial realista. Se obtuvieron SL 100 % ácidas con un patrón de acetilación mixta para la cepa Δ *sble*, mientras que la capacidad inherente para producir selectivamente SL lactónicas aumentó significativamente (+42 %) para la cepa *oe sble* (99% de SL lactónicas). Además, el efecto regulador del citrato sobre la formación de SL de lactona para el tipo salvaje estuvo ausente en esta nueva cepa, lo que indica que es más robusta y más adecuada para la producción industrial de SL lactónicas.

Ante los estudios mencionados se generó una breve introducción de la problemática en la contaminación en agua y suelo por lo cual se vienen elaborando diversas tecnologías sostenibles en su remediación empleando biosurfactantes y sus

estrategias de mejora; así también a continuación se expone el estudio a realizar, el problema, sus efectos, sus métodos de tratamiento y mejora.

El crecimiento de la población mundial y el aumento de las actividades industriales, humanas y antropológicas que conlleva han contribuido a un aumento exponencial de la concentración de contaminantes tóxicos en el medio ambiente (Bhatt P. et al., 2021, p.2). Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, el impacto de estos contaminantes se considera elevado, lo que se refleja en la amenaza que pesa sobre más de 1141 especies (Hussain K. et al., 2018, p.2).

Por otra parte, debido al visible impacto de los contaminantes en los ecosistemas, tanto las comunidades científicas como las no científicas han hecho más hincapié en la contaminación del suelo y agua, además de la contaminación por metales pesados e hidrocarburos, como Dzerzhinsk (Rusia), Kabwa (Zambia) y La Oroya (Perú) (Bonelli M. et al., 2017, p.2).

Siendo que, la contaminación por hidrocarburos de petróleo, petróleo y metales pesados se está convirtiendo en un problema grave adicional debido a la creciente demanda de productos relacionados con el petróleo crudo y los productos derivados del petróleo crudo en varios campos de aplicación (Jimoh A. et al., 2019, p.1).

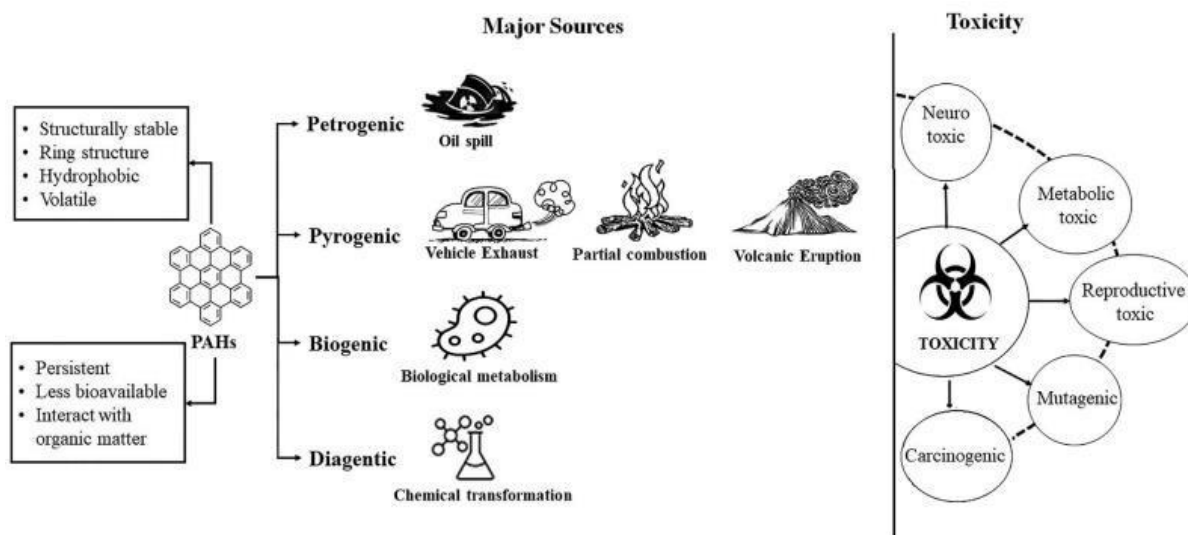
Dicha contaminación ha despertado muchas consideraciones y atractivos, ya que conduce a daños ecológicos en los ecosistemas marinos, acuáticos y terrestres (Varjani S. y Upasani V., 2017, p.4).

Debido a que, la contaminación del suelo presenta diversas fuentes de contaminación y dado que el suelo actúa como sumidero último de los contaminantes, la contaminación del suelo provoca varios efectos peligrosos para la salud, como nacimientos prematuros, problemas gástricos, cáncer, retraso mental y abortos (Olatunde K. et al., 2021, p.1).

Además, la presencia de grandes zonas de tierras contaminadas, como el delta del río Níger (hidrocarburos de petróleo), Accra (Ghana) (residuos electrónicos), Hazaribagh (Bangladesh) (residuos de curtiduría), Tirupur (India) (tintes textiles), ha cambiado el rumbo de la investigación medioambiental hacia la contaminación del suelo (Dai C. et al., 2021, p.7).

Así mismo, los suelos contaminados con hidrocarburos orgánicos hidrófobos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), vienen representando una grave amenaza para el ecosistema y la salud humana. (Ver figura 1).

Figura N°1: Principales características, fuentes principales y toxicidad de los HAP



Fuente: Rathankumar A. et al., (2021)

Como se observa en la figura 1, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son algunos de los contaminantes orgánicos más perjudiciales para el ecosistema del suelo, y se clasifican dentro de los compuestos orgánicos hidrófobos (COH).

Así mismo, la mayoría de los HAP se producen debido a las actividades antropogénicas asociadas a la urbanización y las industrias, así como a las debidas a actividades naturales, como las erupciones volcánicas (Baldwin Austin K. et al., 2017, p.2). En función de su aparición, los HAP pueden agruparse como se observa en el gráfico 1.

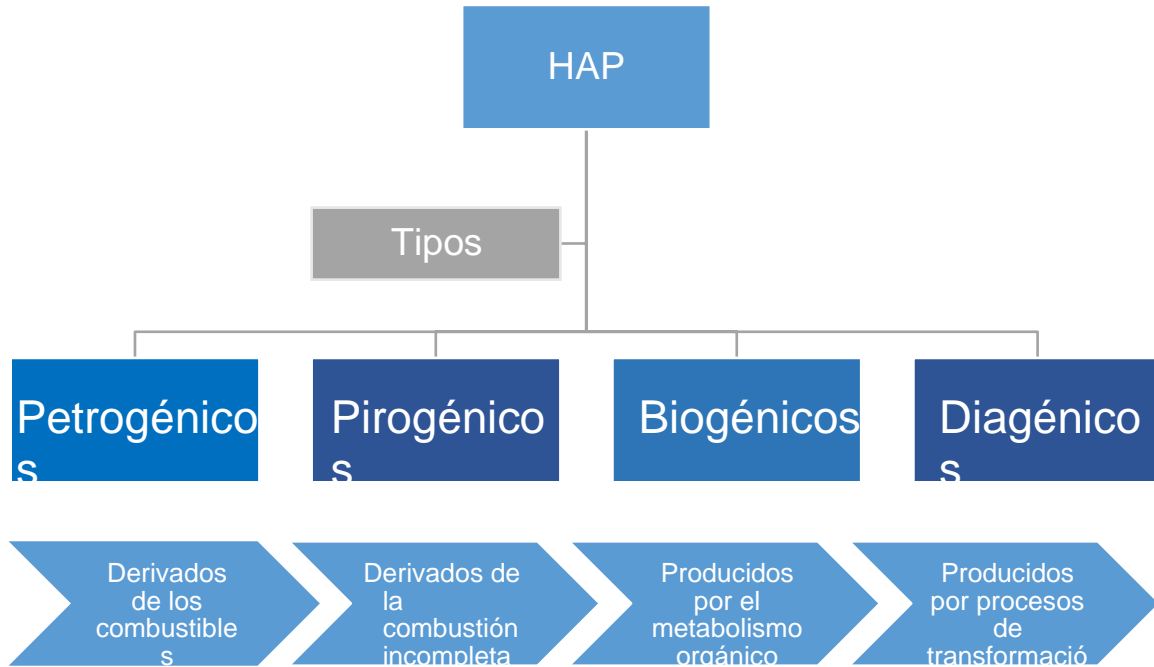
Además, la sorción y desorción de los PAH, debido a la interacción con la materia orgánica del suelo (MOS) y otros contaminantes, afecta en gran medida el destino y la eficiencia de la micoremediación del suelo contaminado.

Debido a las amplias clasificaciones de los contaminantes presentes en el suelo, en aras de la simplicidad, estos compuestos se agrupan como contaminantes orgánicos o inorgánicos (Zhang P. y Chen Y., 2017, p.2).

Casi todas las estructuras de los contaminantes orgánicos están formadas por carbono e hidrógeno como columna vertebral y pueden clasificarse como

hidrocarburos del petróleo, pesticidas, productos farmacéuticos y sus derivados, y compuestos clorados (Rathankumar A. et al., 2020, p.4).

Gráfico N°1: Clasificación de los HAP en función de su aparición



Elaboración propia

Por otro lado, los contaminantes inorgánicos consisten en compuestos radiactivos, metales pesados, sales y nutrientes (Cha M. et al., 2022, p.2). Independientemente de la diversidad estructural y química de estos contaminantes, su naturaleza hidrofóbica y su estabilidad estructural hace que sean persistentes a la degradación (Liu Q. et al., 2019, p.3).

Estos contaminantes tienen la capacidad de unirse a la materia orgánica del suelo (SOM), que enmascara su presencia y, por tanto, resiste el proceso de degradación (Voleyney G. et al., 20187, p.2). Además, la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) agrupó 126 contaminantes como prioritarios según la Ley de Aguas Limpias de 1977 en función de sus niveles de toxicidad y persistencia (Wise S. et al., 2016, p.3).

Entre estos contaminantes prioritarios, los hidrocarburos aromáticos policíclicos son los compuestos de hidrocarburos del petróleo más investigados debido a su potencial toxicidad y persistencia en la naturaleza para su degradación (Iwegbue C. et al., 2021, p.3). Por otro lado, la naturaleza hidrofóbica de los hidrocarburos aromáticos

policíclicos (PAHs) a menudo hace que las estrategias de tratamiento convencionales sean menos eficientes debido a su baja biodisponibilidad (Huang L. et al., 2021, p.2).

Por otro lado, la contaminación de los ecosistemas acuáticos (como lagos, ríos y golfos) con metales tóxicos e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) es también un problema importante para la sociedad moderna (Gao Y. et al., 2021, p.3). Ya que, ambos tipos de contaminantes mencionados pueden ser fuertemente absorbidos en los sedimentos, que se consideran su receptor final (Rizk R. et al., 2022, p.2).

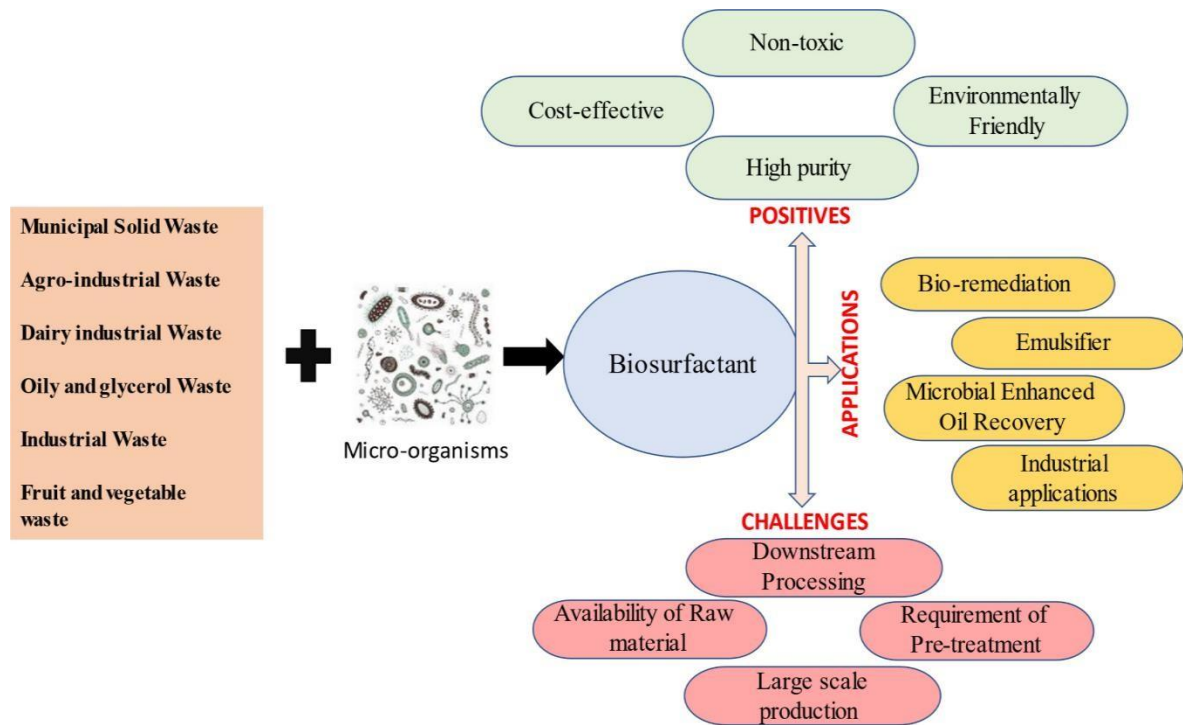
Además, los sedimentos se utilizan con frecuencia para controlar los niveles de contaminación en los medios acuáticos (Mansindi V. et al., 2018, p.2). A su vez, la presencia simultánea de estos contaminantes puede ser una amenaza tóxica directa para la fauna que habita en los sedimentos y los organismos vivos circundantes, afectando, en consecuencia, a los seres humanos a través de la cadena alimentaria (Hahladakis J. et al., 2016, p.4).

Ante ello, los tensioactivos son un grupo diverso de compuestos sintéticos y biológicos que tienen una propiedad tensoactiva común y se utilizan en casi todas nuestras tareas rutinarias diarias (Jahan R. et al., 2020, p.4). La mayor parte de estos tensioactivos están hechos de petróleo y se sintetizan químicamente (Chong H. et al., 2017, p.4). Por el contrario, debido a las preocupaciones ambientales sobre los tensioactivos químicos, el reciente impulso por la tecnología respetuosa con el medio ambiente ha aumentado el uso de tensioactivos microbianos (Johnson P. et al., 2021, p.2).

Debido a ello, los biosurfactantes están ganando popularidad por sus notables ventajas sobre los sintéticos: baja toxicidad, biodegradabilidad, eficacia en un amplio rango de pH y temperatura son solo algunos de ellos (Akbari S. et al., 2018, p.3). Como resultado, ahora se usa en una amplia gama de campos, incluidos los ambientales los alimentos, los remedios, los biomédicos y una variedad de otras aplicaciones comerciales (Banat I. et al., 2019, p.3).

En la figura 1 se representan las diferentes materias primas utilizadas, los beneficios, las aplicaciones y los inconvenientes de los biosurfactantes

Figura N°2: Materias primas, beneficios, inconvenientes y aplicaciones de los biosurfactantes



Fuente: Drakontis C. et al., (2020)

Estos biosurfactantes se producen bajo una amplia gama de condiciones ambientales y de crecimiento, y se sabe que participan principalmente en la mejora de la solubilidad y disponibilidad de diferentes sustratos inmiscibles en agua (Chebbi A. et al., 2021, p.3). Y los miembros de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus* y *Candida* se utilizan predominantemente para la producción de varios biosurfactantes (Santos D. et al., 2016, p.4). (Ver figura 3).

Figura N°3: Biodegradación de contaminantes usando biosurfactantes



Fuente: Santos D. et al., (2016)

En la figura 3 se muestra la biodegradación de los hidrocarburos del petróleo y iones metálicos derivados por los biosurfactantes, donde se produce a través de dos mecanismos. El primero implica un aumento de la biodisponibilidad del sustrato hidrofóbico para los microorganismos, el otro mecanismo involucra la interacción entre el biosurfactante y la superficie celular, dando lugar a cambios en la membrana.

Es así como los biosurfactantes bloquean la formación de puentes de hidrógeno y permiten interacciones hidrofóbicas-hidrofílicas (Almeida D. et al., 2018, p.2).

Además, un biosurfactante típico se compone de dos componentes: un componente hidrofílico y un componente hidrofóbico (Otzen D. et al., 2017, p.1). Donde, el peso molecular, las propiedades fisicoquímicas y el modo de acción de estos compuestos se utilizan para clasificarlos (Jimoh A. et al., 2019, p.5).

Según estas combinaciones, existen biosurfactantes de bajo o alto peso molecular y los biosurfactantes de bajo peso molecular reducen las tensiones superficiales e interfaciales, mientras que los biosurfactantes de alto peso molecular, también reconocidos como bioemulsionantes, son mejores para estabilizar las emulsiones de aceite en agua (Singh S. et al., 2020, p.3).

Entre todos los biosurfactantes actualmente reconocidos, Rhamnolipids, que es uno de los glicolípidos, tiene el mayor potencial para convertirse en la próxima generación de biosurfactantes (Vajani Sunita et al., 2021, p.4). *Pseudomonas* utiliza principalmente para producir estos importantes grupos de tensioactivos microbianos en todo el mundo (Varjani S. y Upasani V., 2021, p.2). Por ello, para satisfacer la gran demanda de biosurfactantes, el proceso de producción se amplió y ahora se utiliza con éxito en varias unidades de producción de biosurfactantes (Singh P. et al., 2019, p.1).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación aplicada se centra en el estudio de un fenómeno en específico, donde se aplicará los conocimientos adquiridos para la directamente en los problemas que se busca resolver (Tamayo y Tamayo, 2006). Por tal motivo, se usó este tipo de investigación, ya que, se pretende mediante la investigación e artículos existentes determinar cuál es la importancia de los biosurfactantes en la contaminación acuática y terrestre.

Mientras que el diseño usado fue el narrativo de tópico, esto debido a que el diseño narrativo cuenta la historia y hechos sucedidos por los participantes quienes formaron parte directa o indirecta de los suscitado en las investigaciones y esta información es pasada por el lector o investigador sin ser alterada (Hernández, 2016, p.702). Por tal motivo en el presente estudio se aplica el tipo de diseño narrativo; siendo que la información que se recolectó de los estudios se mantiene sin ser modificada para usarlas en el desarrollo del presente trabajo.

Además, se define como tópico ya que no se centró en una persona en específico, por el contrario, se enfocó en un tema central el cual es la remediación de contaminantes en agua y suelo empleando biosurfactantes.

3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Las sub categorías que se generan de las categorías se encuentran diseñadas de acuerdo a los 3 problemas específicos del estudio, buscando de esta manera presentar resultados puntuales y ordenados (Ver tabla 1).

Tabla N° 1: Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Criterio 1	Criterio 2
<i>Definir cuáles son las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo</i>	¿Cuáles son las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo?	Estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes	Adición de genes Eliminación de genes Reemplazo de genes (Varjani S. et al., 2016, p.4)	De acuerdo al nombre del biosurfactante	De acuerdo al gen usado para la mejora del biosurfactante
<i>Detallar cuáles son los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible</i>	¿Cuáles son los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible?	Cambios presentados en el sistema acuático aplicando el biosurfactante	Porcentaje de eficacia alta Porcentaje de eficacia baja (Ambust S. et al., 2021, p.2)	De acuerdo al biosurfactante usado	De acuerdo a la concentración de biosurfactante usado
<i>Detallar cuáles son los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible</i>	¿Cuáles son los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible?	Cambios presentados en el sistema terrestre aplicando el biosurfactante	Porcentaje de eficacia alta Porcentaje de eficacia baja (Das Amar et al., 2021, p.1)	De acuerdo al biosurfactante usado	De acuerdo a la concentración de biosurfactante usado

Elaboración propia

3.3. Escenario de estudio

El escenario es considerado el lugar donde ocurren los hechos, por tal motivo, al ser una revisión sistemática se encontraron diversos escenarios en cada uno de los artículos usados, siendo entre estos los laboratorios, campus universitarios y lugares de campo donde se tomaron las muestras y llevaron a cabo los estudios experimentales.

3.4. Participantes

Los participantes a considerar en este trabajo fueron los portales web visitados, los cuales nos permitieron tener acceso a diversos estudios científicos a nivel mundial, siendo estas fuentes indexadas que nos brindaron la confiabilidad de la información obtenida; entre los cuales los participantes del estudio fueron: Scielo, Sciencedirect y Scopus.

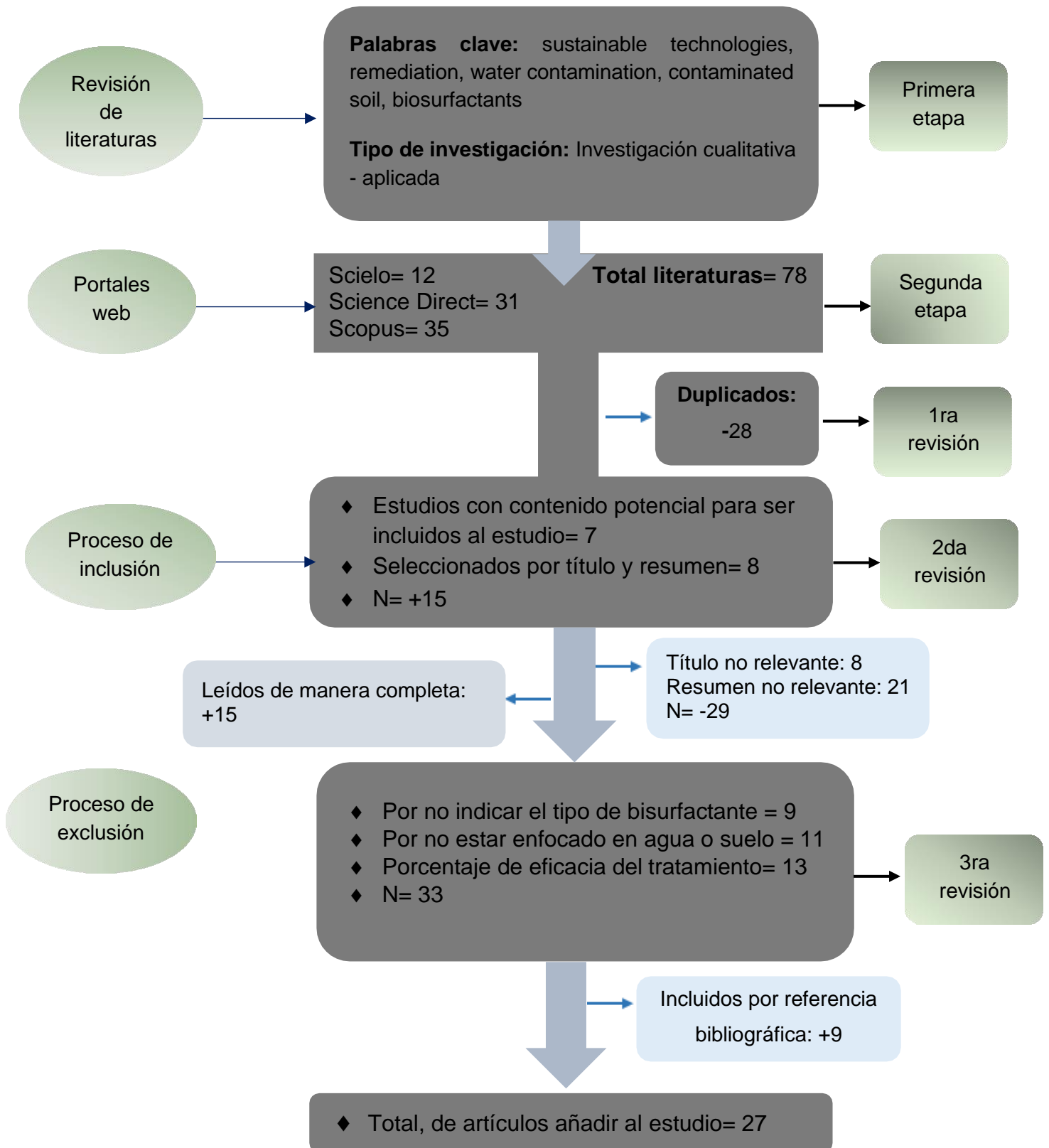
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica usada en este estudio fue el análisis documental y el instrumento empleado fue la ficha de análisis de contenido, siendo este el método de recolección de datos.

Esta ficha permitió la descripción bibliográfica sintetizada de los documentos originales para tener un mayor fácil acceso de la información que nos brinda; extrayéndose los datos como nombre de autor, años de publicación del estudio, fuente, problema del estudio, metodología usada, resultados, conclusiones y recomendaciones.

3.6. Procedimiento

Gráfico N° 2: Procedimiento de selección de artículos



Elaboración propia

3.7. Rigor científico

Este trabajo de investigación cumplió con los criterios de dependencia, confirmabilidad, transferencia y credibilidad; los cuales permitieron que se obtenga el rigor científico del estudio, garantizando el método científico.; de acuerdo con (Guba y Lincoln, 1989, pp. 241-243); se describe lo siguiente:

De acuerdo con Guba y Lincoln (1989, p.241) la dependencia hace referencia a la consistencia de los datos, y esto se encuentra recaudando la mayor información posible que permitan aseverar que la información proporcionada es verídica.

En el criterio de credibilidad el autor debe encaminarse a conseguir la credibilidad del estudio, para ello recoger la mayor cantidad de datos posibles, para que los resultados sean los más creíbles, esto se cumple brindando todos los datos de las técnicas no convencionales usadas para remediar los contaminantes orgánicos persistentes.

La transferibilidad hace referencia al grado en el que se puedan transferir los datos a otros contextos. Esto se logra dejando detallado las metodologías usadas para que otros investigadores puedan continuar con el estudio aplicándolo a otros campos.

El criterio de confiabilidad permite al investigador asegurar la objetividad de la información proporcionada a los lectores.

3.8. Método de análisis de información

El presente estudio empleó diversas técnicas y métodos como es el caso de la matriz apriorística; de la cual se generaron 3 sub categorías:

1. Estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes
2. Cambios presentados en el sistema acuático aplicando el biosurfactante
3. Cambios presentados en el sistema terrestre aplicando el biosurfactante

Y de estas se desplegaron las siguientes sub categorías; que permiten que los resultados generados sean más concisos y ordenados.

Sub categorías:

- Adición de genes
- Eliminación de genes

- Reemplazo de genes

- Porcentaje de eficacia del tratamiento
- Biorremediación del petróleo crudo
- Solubilización de petróleo crudo

- Porcentaje de eficacia del tratamiento
- Biorremediación del petróleo crudo
- Solubilización de petróleo crudo

3.9. Aspectos éticos

Los aspectos éticos que se cumplieron en el presente estudio fueron el respeto a la autoría, para lo cual se realizó el debido citado mediante la norma ISO 690-2, detallando en la bibliografía del trabajo cada cita con su DOI, el cual permite dirigir al documento utilizado, así mismo se utilizó la guía de productos observables de la Universidad Cesar Vallejo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la búsqueda del desarrollo del problema principal del estudio para definir cuáles son las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo, se desarrollaron la tabla 2, 3 y los gráficos 2 y 3, donde se resolverán en las dos primeras tablas las resoluciones de los objetivos para definir cuáles son las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo y detallar cuáles son los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible.

Tabla N°2: Estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible

#	Fuente	Organismo diseñado	Estrategia empleada	Nombre del gen	Organismo fuente de donde se clonó el gen	Nombre del biosurfactante producido
1	Zhang Fang et al., 2020	<i>B. amyloliquefaciens</i> cepa GR167	Eliminación y adición de genes	operón <i>srfA</i>	<i>Bacilo amyloliquefaciens</i> LL3	surfactina
2	Becker F. et al., 2021	<i>Ustilago maydis</i>	Adición de genes	gen aciltransferasa <i>Mac1</i> y <i>Mac2</i>	<i>U. hordei</i> y <i>M. aphidis</i>	Lípidos de manosileritritol
3	Wu Qun et al., 2019	<i>Bacillus subtilis</i> cepa 168	Adición y eliminación de genes	gen <i>sfp</i> y ruta del biofilm respectivamente	<i>B. amyloliquefaciens</i> MT45	surfactina
4	Tiso Till et al., 2020	<i>P. putida</i> KT2440	Eliminación de genes	–	–	Ramnolípido
5	Jung Ju et al., 2014	<i>B. subtilis</i> (pHT43-comXphrC)	Adición de genes	<i>ComX</i> y <i>PhrC</i>	<i>B. subtilis</i>	surfactina
6	Jiao Song et al., 2017	<i>Bacillus subtilis</i>	Adición de genes	<i>PsrfA</i> con <i>Pg3</i>	–	surfactina
7	Roelants Sophie	<i>Starmerella bombicola</i>	Adición de genes	lactona esterasa (<i>sble</i>)	–	Soforolípido

	L. et al., 2016					
8	Roelants S. et al., 2015	<i>candida bombicola</i>	Knock out knock in estrategia	PHAC1co y UGT1co	–	Celobiosalípido y polihidroalcanoatos simultáneos

Elaboración propia

Las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo es mediante el desarrollo de cepas de alto rendimiento mediante el empleo de ingeniería metabólica, ya que, este tiene un enorme potencial para generar una gran cantidad de cepas modificadas (Karlapudi Abraham P. et al., 2018, p.5).

Además, la estrategia más empleada es la adición de genes y la eliminación de genes. Siendo también corroborado por Zhang Fang et al., 2020, en la tabla 2, donde se construyó una cepa GR167 de genoma reducido que carecía de ~ 4,18 % del genoma LL3 de *B. amyloliquefaciens* eliminando algunas regiones genómicas innecesarias. empleando como estrategia de eliminación, posterior a ello, dos promotores PR suc y PR tpxide LL3 se obtuvieron mediante RNA-seq y caracterización de la fuerza del promotor, y luego se sustituyeron individualmente por el promotor srfA nativo en GR167ID para generar GR167IDS y GR167IDT; donde, el mejor mutante GR167IDS mostró una mejora de 678 veces en el nivel transcripcional del operón srfA en relación con GR167ID, y produjo 311,35 mg/L de surfactina, con un aumento de 10,4 veces en relación con GR167.

Además, el biosurfactante producido en mayor cantidad es la surfactina, siendo esto demostrado por Wu Qun et al., 2019, Jung Ju et al., 2014, Jiao Song et al., 2017; usando cepas como *B. amyloliquefaciens* cepa GR167, *Bacillus subtilis* cepa 168, *B. subtilis* (pHT43-comXphrC) y *Bacillus subtilis*.

Así Wu Qun et al., 2019, desarrolló un enfoque de ingeniería sistemática para mejorar la biosíntesis de surfactina, donde, primero, restauró la actividad biosintética de la surfactina al integrar un gen sfp completo en el *Bacillus subtilis* no productor y obtuvo un título de surfactina de 0,4 g/l; en segundo lugar, redujimos la competencia al eliminar los genes relacionados con la formación de biopelículas y las vías de péptido sintetasa/policétido sintasa no ribosomales (3,8 % del genoma total), lo que aumentó

el título de surfactina en 3,3 veces y en tercer lugar, mejoramos la tolerancia celular a la surfactina al sobreexpresar proteínas potenciales asociadas a la autorresistencia, lo que aumentó aún más el título de surfactina en 8,5 veces.

Así mismo, Dobler et al., (2016, p.1). apoyando los resultados mostrados, demostrando que *P. aeruginosa* PAO1, una cepa diseñada que lleva la integración cromosómica mediada por transposones del operón *rhIAB*, mostró un rendimiento máximo de 1,819 g/l de ramnolípidos utilizando aceite de soja como sustrato, con una tasa de productividad constante de 18,95 mg/l/h. Al utilizar glucosa como única fuente de carbono, se logró el rendimiento máximo de 0,784 g/L, con una tasa de productividad de 8,19 mg/L/h. La cepa modificada de *P. aeruginosa* PG201 mientras utilizaba glicerol (2 g/L) como sustrato produjo 2,2 g/L de ramnolípidos con una tasa de productividad de 13,1 mg/L/h.

Por su parte también apoyan la afirmación Zhang Fang et al., 2020, Becker F. et al., 2021, Wu Qun et al., 2019, Tiso Till et al., 2020, Jiao Song et al., 2017, Roelants Sophie L. et al., 2016 y Roelants S. et al., 2015.

Por otro lado, se buscó detallar cuáles son los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible, para lo cual se realizó la clasificación de la tabla 3.

Tabla N° 3: Cambios presentados en el sistema acuático y terrestre aplicando biosurfactantes

#	Biosurfactante	Fuente de microorganismos	Concentración efectiva de biosurfactante	Aplicación	Eficacia del tratamiento	Referencia
APLICACIÓN ACUÁTICA						
1	lipopéptido	<i>Bacilo atrophaeus</i> 5-2a	Sobrenadante de cultivo	Recuperación microbiana mejorada de petróleo	93,9% de recuperación	Zhang Junhui et al., 2016
2	Liquenisin as	<i>Bacilo licheniformis</i>	–	Aplicación in situ de recuperación microbiana	16,6% de recuperación	Karlapudi Abraham P. et

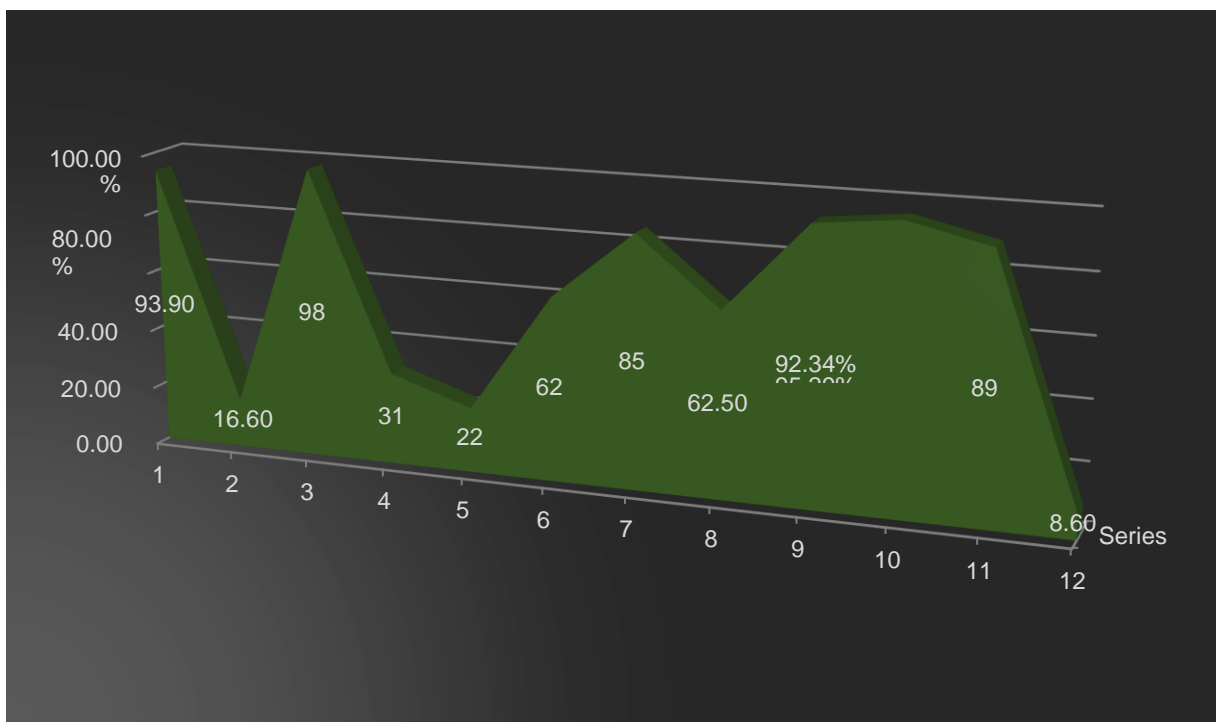
				mejorada de petróleo.		al., 2018
3	Glicolipopéptido Emulsan	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	0,5 mg/ml	Recuperación de petróleo mejorada microbianamente	98% de reducción	Karlapudi A. et al., 2019
4	surfactina	<i>Bacilo coagulans</i>	–	Aumenta la recuperación de aceite	17%–31% de recuperación	Abraham P. et al., 2018
5	surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	1g/L	Aumenta la recuperación de aceite	19%–22% de recuperación	Pereira Jorge F. et al., 2015
6	glicolípido	especies de <i>halomonas</i>	25 ml	Remediación de hidrocarburos vertidos en ecosistemas marinos.	Recuperación del 62% del crudo.	Tripathi L. et al., 2018
7	Fosfolipopéptido	<i>Marinobacter hidrocarbonoclasticus</i>	1% (v/v)	Solubilización de petróleo crudo	13 pliegues eficiente	Tripathi L. et al., 2019
8	Ramnolípido	<i>Rhodococcus solis</i>	–	Biorremediación del petróleo crudo del ambiente contaminado.	85% de degradación	Lee Dong W. et al., 2018
9	Ramnolípido	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	43,73 miligramos por litro	Eficiencia para la eliminación de metales pesados como el mercurio y el plomo	50,20% mercurio y 62,50% plomo	Chen Qingguo et al., 2021
10	Ramnolípido	Especies de <i>Pseudomonas</i>	–	Biodegradación de hidrocarburos	92,34% y 95,29% de degradación de crudo y gasóleo	Karlapudi A. et al., 2018
11	Emulsan	<i>Acinetobacter venetianus</i>	0,1 mg/ml	Eliminación de crudo del	89% de eliminación	Karlapudi et

				medio marino.		al., 2018
1 2	soforolípi do	<i>Candida albicans</i>	–	Recuperación microbiana mejorada de petróleo	8,6% de recuperación	El-Sheshtawy H. et al., 2016
APLICACIÓN TERRESTRE						
1	surfactina	<i>Bacilo nealsonii</i>	10 mg/ml y 40 mg/ml	Reducción del nivel de contaminación del suelo contaminado con un 10 % de aceite de motor pesado	43,6% y 46,7% de reducción	Phulpo to Irfan A. et al., 2020
2	surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	–	Eliminación de metales pesados e hidrocarburos de petróleo	Reducción del 65% y 46% de hidrocarburos de petróleo y metales pesados	Singh A. y Cameotra S., 2015
3	surfactina	<i>Bacillus subtilis</i>	12,5 y 37,5 mg/L	Remediación de suelos contaminados con gasóleo	78,5% y 81,8% de eliminación	Phulpo to I. et al., 2020
4	lipopéptido	<i>Bacillus subtilis</i>	–	Mejora en la recuperación de petróleo y remediación de suelos contaminados.	85% de recuperación	Mulligan Catherine N. et al., 2021
5	saponina	<i>burkholderiapacacia</i>	2000 miligramos por litro	Desorción de cobre y níquel a partir de caolín	83%–85%	Mulligan C. et al., 2020
6	Ramrólípido	<i>estenotrofomona maltofila</i>	1g/L	Eliminación de crudo	8,3 pliegues	Tripathi Varsha et al., 2020
7	Ramrólípido	<i>Lysinibacillus sphaericus</i>	90 miligramos por litro	Solubilización de	1,8 pliegues de alto	Gaur Vivek K. et

Elaboración propia

Con respecto a la tabla 3, se realizaron las gráficas 3 y 4 para esquematizar los porcentajes de eficiencia en los sistemas acuáticos y terrestres; donde se tomaron en cuenta los criterios del biosurfactante usado y la concentración de este empleado.

Gráfico N°3: Porcentaje de eficiencia en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante



Elaboración propia

De acuerdo con el gráfico 3, se demuestra que los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible genera un porcentaje de eficiencia alta del 80 al 90%.

Según Fenibo E. et al., (2019, p.3); ello es debido a que al ayudar en la remediación de los contaminantes como hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos monoaromáticos y metales pesados que se generan en la industria del petróleo como principal contaminante; mejora la eficiencia de la biodegradación debido a su propiedad de superficie activa.

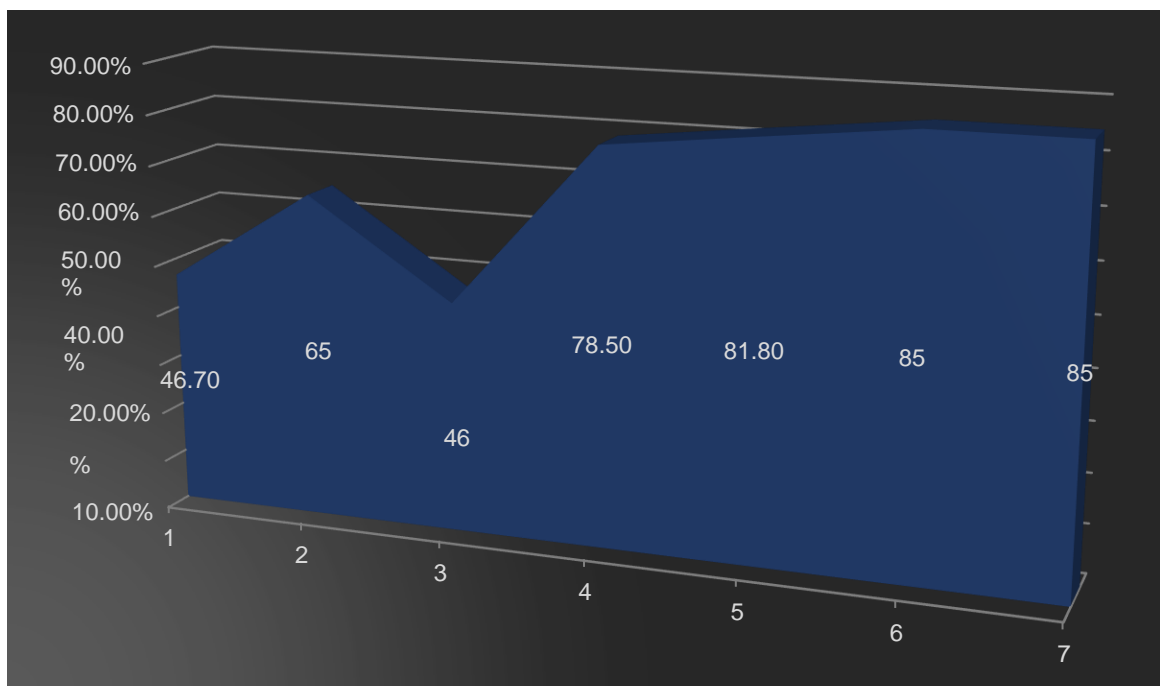
Además, Fenibo Emmanuel O. et al., (2019, p.29, afirma que el biosurfactante crudo producido por *B. subtilis* y *P. aeruginosa* tiene su uso potencial para el proceso de recuperación microbiana mejorada de petróleo.

Los resultados presentados son también respaldados por Zhang Junhui et al., 2016, Karlapudi A. et al., 2019 y Lee Dong W. et al., 2018; presentando porcentajes de eficiencia del tratamiento en un 93,9% de recuperación, 98% de reducción y 85% de degradación respectivamente.

Por su parte Tripathi L. et al., (2019), informó que el biosurfactante jugó un papel fundamental en la remediación de 5,73 millones de toneladas de derrames de petróleo en el océano en todo el mundo entre 1970 y 2016; donde, el biosurfactante se introdujo como un agente dispersante que facilitó la degradación asistida por microbios en un 91%. Mientras que, Tripathi et al., (2018, p.2), sugirió que el biosurfactante producido a partir de microorganismos marinos como las especies de *Halomonas* se puede usar de manera efectiva para la remediación del petróleo derramado en los ecosistemas marinos mediante la síntesis de compuestos activos de superficie que aumentan la solubilidad del hidrocarburo que inicia la biodisponibilidad para los procesos de degradación y recuperación de petróleo.

Lo que es también corroborado por Lee et al., (2018, p.5), menciona que el el biosurfactante de ramnolípido mejoró la biodegradación de más de 15 alcanos de cadena de carbono y muchos estudios recientes informaron la aplicación de géneros bacterianos productores de biosurfactantes, a saber, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Alcanivorax*, *Rhodococcus* y *Corynebacterium* en la eliminación de hidrocarburos del ambiente contaminado por petróleo con tasas de remediación mejoradas.

Gráfico N°4: Porcentaje de eficiencia en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante



Elaboración propia

De acuerdo con el gráfico 4, se demuestra que los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible demuestra que existe un porcentaje de eficiencia de su uso en menor proporción a diferencia de su aplicación en el sistema acuático; siendo este que presenta un promedio porcentual del 60 al 80%.

El biosurfactante derivado de microbios era más eficiente en la eliminación de contaminantes en comparación con los sintéticos, así también y ello es corroborado por el estudio de Phupoto I. et al., (2020, p.3), quien estudió un biosurfactante similar a la surfactina aislado de un aislado ambiental *Bacillus nealsonii*S2MT, donde, estimó que el biosurfactante a una concentración de 10 y 40 mg/L remedió 43.6 y 46.7% del aceite mientras que las mismas concentraciones de dodecilsulfato de sodio redujeron 39.4 y 45.3% en comparación con 18.5% en el control; demostrando que el biosurfactante similar a la surfactina aislado de *Bacillus* presenta mayor capacidad para reducir el nivel de contaminación del suelo.

Pero ello es ratificado por Das et al., (2021, p.2), quien demuestra que la eficiencia de los surfactantes empleando cepas es intermedio, así que en su estudio Se estudió el efecto del tratamiento con biosurfactantes en la eliminación de aceite

del suelo contaminado con petróleo mediante la adición de 50 ml de biosurfactante crudo en combinación con estiércol de vaca y orina de vaca, donde, se registró que solo el 67% del aceite se redujo en comparación con el suelo no tratado.

De acuerdo con Mulligan (2021, p.1), menciona que ello es debido a que la acumulación de una gran cantidad de contaminantes en el suelo, ya sea por calamidades naturales o por actividades humanas, no presenta una eficiente remediación, debido a que los biosurfactantes no son seleccionados de manera efectiva según las propiedades y características de los contaminantes.

Pero ello es rechazado por el estudio de Mulligan C., (2021, p.2), quien menciona que, en este contexto, el uso de biosurfactantes microbianos para la remediación del sitio contaminados en el suelo se ofrece un enfoque efectivo debido a la baja toxicidad, fácil biodegradabilidad, producción rentable y naturaleza ecológica de los biosurfactantes. Así también, lo demuestra Mulligan C. et al., (2020), quien demuestra que el biosurfactante saponina con una concentración del biosurfactante de 2000 miligramos por litro presentó una eficiencia del 58%, demostrando que los biosurfactantes tienen el potencial para la remediación sostenible de suelos debido a su baja toxicidad, biodegradabilidad y eficacia.

Así también Pradeep et al. (2012) demostraron un experimento para determinar el efecto del biosurfactante ramnolípido derivado de *P. aeruginosa* en la fracción total de hidrocarburos de petróleo de un suelo contaminado artificialmente con petróleo.

V. CONCLUSIONES

Se puede concluir que los aspectos más relevantes del objetivo de estudio están enfocados en las técnicas avanzadas para la identificación de biosurfactantes y sus productores; así como las estrategias que podrían ser rentables para la producción de biosurfactantes y que pueden mejorar su aplicabilidad industrial. Siendo así que se detalla en los siguientes puntos como se llegó a dicha conclusión en la explicación de las conclusiones de los tres objetivos específicos:

- De acuerdo al objetivo específicos uno, se puede concluir que las estrategias para mejorar la producción de biosurfactantes e incrementar su poder como tecnología sostenible en la remediación de contaminantes en agua y suelo es mediante el desarrollo de cepas de alto rendimiento mediante el empleo de ingeniería metabólica, ya que, este tiene un enorme potencial para generar una gran cantidad de cepas modificadas. siendo la estrategia más empleada la adición de genes y eliminación de genes. También se concluye que el biosurfactante producido en mayor cantidad es la surfactina.
- Además, de acuerdo con el segundo objetivo específico se tiene que los cambios presentados en el sistema acuático contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible se muestran en la eficiencia del tratamiento del agua contaminado, presentando un promedio del 80 al 90%. debido a que al ayudar en la remediación de los contaminantes como hidrocarburos poliaromáticos, hidrocarburos monoaromáticos y metales pesados que se generan en la industria del petróleo como principal contaminante; mejora la eficiencia de la biodegradación debido a su propiedad de superficie activa.
- Por último, mediante el tercer objetivo específicos, los cambios presentados en el sistema terrestre contaminado aplicando el biosurfactante como tecnología sostenible también se muestran en la eficiencia del tratamiento del suelo, donde, se demostró que existe un porcentaje de eficiencia de su uso en menor proporción a diferencia de su aplicación en el sistema acuático; siendo este que presenta un promedio porcentual del 60 al 80%.

VI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos y a los estudios analizados se pudo recomendar ampliar la revisión realizada tomando a un tipo contaminante en específico para especificar la eficiencia de los biosurfactantes; así mismo, se realiza las siguientes recomendaciones puntuales:

- Se recomienda utilizar materias primas como sustratos sostenibles para la producción de biosurfactantes y así determinar su potencial como un sustrato sostenible, lo que reduce el costo de producción de biosurfactantes y genera un aumento en las ganancias comerciales.
- Así mismo se recomienda realizar esfuerzos de investigación para encontrar microbios más favorables que puedan prosperar y utilizar los desechos agroindustriales disponibles en la forma menos tratada y producir un mayor rendimiento de biosurfactantes. En este contexto, se pueden emplear microbios recombinantes para tratar el sustrato disponible y obtener el tensioactivo deseado con un mayor rendimiento.
- Por último, debido a que se utilizan amplias gamas de técnicas analíticas para aislar, purificar y clasificar diversos biosurfactantes, se recomienda llevar investigaciones para aumentar la productividad y el rendimiento de los biosurfactantes en el proceso de producción aguas; siendo clasificados las aguas abajo y aguas arriba donde, las aguas abajo son las que requieren de un mayor estudio; por ello, se debe incrementar en un estudio exhaustivo sobre la purificación aguas abajo. Estos desafíos son oportunidades para los grupos de investigación que deben ser examinados y abordados a fondo.

REFERENCIAS

1. AKBARI, Sweeta, et al. Biosurfactants a new frontier for social and environmental safety: a mini review. *Biotechnology Research and Innovation*, 2018, vol. 2, no 1, p. 81-90. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biori.2018.09.001>
2. ALMEIDA, D., et al. Application of a biosurfactant from *Candida tropicalis* UCP 0996 produced in low-cost substrates for hydrophobic contaminants removal. *Chemical Engineering Transactions*, 2018, vol. 64, p. 541-546. Disponible en: <https://doi.org/10.3303/CET1864091>
3. AMBUST, Shweta; DAS, Amar Jyoti; KUMAR, Rajesh. Bioremediation of petroleum contaminated soil through biosurfactant and *Pseudomonas* sp. SA3 amended design treatments. *Current Research in Microbial Sciences*, 2021, vol. 2, p. 100031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100031>
4. BALDWIN, Austin K., et al. Primary sources and toxicity of PAHs in Milwaukee-area streambed sediment. *Environmental toxicology and chemistry*, 2017, vol. 36, no 6, p. 1622-1635. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/etc.3694>
5. BANAT, Ibrahim M.; THAVASI, Rengathavasi (ed.). *Microbial biosurfactants and their environmental and industrial applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1201/b21950>
6. BECKER, Fabienne, et al. Engineering *Ustilago maydis* for production of tailor-made mannosylerythritol lipids. *Metabolic engineering communications*, 2021, vol. 12, p. e00165. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mec.2021.e00165>
7. BHATT, Pankaj, et al. Nanobioremediation: A sustainable approach for the removal of toxic pollutants from the environment. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, p. 128033. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128033>

8. BONELLI, Maria Grazia; FERRINI, Mauro; MANNI, Andrea. Artificial neural networks to evaluate organic and inorganic contamination in agricultural soils. *Chemosphere*, 2017, vol. 186, p. 124-131. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.116>
9. CHA, Minju; BOO, Chanhee; PARK, Chanhyuk. Simultaneous retention of organic and inorganic contaminants by a ceramic nanofiltration membrane for the treatment of semiconductor wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.032>
10. CHEBBI, Alif, et al. Potentials of winery and olive oil residues for the production of rhamnolipids and other biosurfactants: a step towards achieving a circular economy model. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, vol. 12, no 8, p. 4733-4743. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01315-8>
11. CHEN, Qingguo, et al. Removal of Pb and Hg from marine intertidal sediment by using rhamnolipid biosurfactant produced by a *Pseudomonas aeruginosa* strain. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 22, p. 101456. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101456>
12. CHONG, Huiqing; LI, Qingxin. Microbial production of rhamnolipids: opportunities, challenges and strategies. *Microbial cell factories*, 2017, vol. 16, no 1, p. 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-017-0753-2>
13. DAS, Amar Jyoti, et al. Biosurfactant assisted design treatments for remediation of petroleum contaminated soil and metabolomics based interactive study with *Brassica nigra* L. *Environmental Challenges*, 2021, vol. 4, p. 100080. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100080>
14. DAI, Chaomeng, et al. Review on the contamination and remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal soil and sediments. *Environmental Research*, 2021, p. 112423. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112423>
15. DHANJAL, Daljeet Singh; SHARMA, Deepansh. Microbial metagenomics for industrial and environmental bioprospecting: the unknown envoy. *En Microbial*

bioprospecting for sustainable development. Springer, Singapore, 2018. p. 327-352. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0053-0_18

16. DRAKONTIS, Constantina Eleni; AMIN, Samiul. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2020, vol. 48, p. 77-90. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2020.03.013>
17. EL-SHESHTAWY, H. S., et al. Production of biosurfactants by *Bacillus licheniformis* and *Candida albicans* for application in microbial enhanced oil recovery. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, vol. 25, no 3, p. 293-298. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.07.018>
18. FENIBO, Emmanuel O., et al. Microbial surfactants: The next generation multifunctional biomolecules for applications in the petroleum industry and its associated environmental remediation. *Microorganisms*, 2019, vol. 7, no 11, p. 581. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/microorganisms7110581>
19. FLOROS, Dimitrios J., et al. A metabolomics guided exploration of marine natural product chemical space. *Metabolomics*, 2016, vol. 12, no 9, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11306-016-1087-5>
20. GAO, Yanpeng, et al. An inescapable fact: Toxicity increase during photo-driven degradation of emerging contaminants in water environments. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, vol. 30, p. 100472. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100472>
21. GAUR, Vivek K., et al. Production of biosurfactants from agro-industrial waste and waste cooking oil in a circular bioeconomy: An overview. *Bioresource technology*, 2022, vol. 343, p. 126059. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126059>
22. GAUR, Vivek Kumar, et al. Ramnolípido de una cepa IITR51 de *Lysinibacillus sphaericus* y su aplicación potencial para la disolución de pesticidas hidrofóbicos. *Tecnología de biorecursos*, 2019, vol. 272, pág. 19-25. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.144>

23. HAHLADAKIS, John N., et al. Sequential application of chelating agents and innovative surfactants for the enhanced electroremediation of real sediments from toxic metals and PAHs. *Chemosphere*, 2014, vol. 105, p. 44-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.022>
24. HUANG, Liping, et al. Oil contamination drives the transformation of soil microbial communities: Co-occurrence pattern, metabolic enzymes and culturable hydrocarbon-degrading bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 225, p. 112740. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112740>
25. HUSSAIN, Karishma, et al. Monitoring and risk analysis of PAHs in the environment. *Handbook of environmental materials management*, 2018, vol. 1. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_29-2
26. ISLAM, M. Rafiqul, et al. Environmental assessment of water and soil contamination in Rajakhali Canal of Karnaphuli River (Bangladesh) impacted by anthropogenic influences: a preliminary case study. *Applied Water Science*, 2017, vol. 7, no 2, p. 997-1010. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0310-2>
27. IWEGBUE, Chukwujindu MA, et al. Occurrence, sources and exposure risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dusts from the Nigerian megacity, Lagos. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2021, vol. 42, no 1, p. 49-69. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1716027>
28. JAHAN, Ruksana, et al. Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: Physicochemical properties and applications. *Advances in colloid and interface science*, 2020, vol. 275, p. 102061. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102061>
29. JIAO, Song, et al. In situ enhancement of surfactin biosynthesis in *Bacillus subtilis* using novel artificial inducible promoters. *Biotechnology and Bioengineering*, 2017, vol. 114, no 4, p. 832-842. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bit.26197>

30. JIMOH, Abdullahi Adekilekun; LIN, Johnson. Biosurfactant: A new frontier for greener technology and environmental sustainability. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 2019, vol. 184, p. 109607. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109607>
31. JOHNSON, Phillip, et al. Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 288, p. 102340. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102340>
32. JUNG, Ju, et al. Improvement of surfactin production in *Bacillus subtilis* using synthetic wastewater by overexpression of specific extracellular signaling peptides, comX and phrC. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, vol. 109, no 9, p. 2349-2356. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bit.24524>
33. KARATAŞ, A.; KARATAŞ, E. Environmental education as a solution tool for the prevention of water pollution. *Survey in Fisheries Sciences*, 2016, vol. 3, no 1, p. 61-70. Disponible en: <https://doi.org/10.18331/SFS2016.3.1.6>
34. KARLAPUDI, Abraham Peele, et al. Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution-a review. *Petroleum*, 2018, vol. 4, no 3, p. 241-249. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.007>
35. LEE, Dong Wan, et al. Biosurfactant-assisted bioremediation of crude oil by indigenous bacteria isolated from Taean beach sediment. *Environmental pollution*, 2018, vol. 241, p. 254-264. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.070>
36. LIQUETE, Camino, et al. Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits. *Ecosystem Services*, 2016, vol. 22, p. 392-401. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.011>
37. LIU, Qinglong, et al. Vertical response of microbial community and degrading genes to petroleum hydrocarbon contamination in saline alkaline soil. *Journal*

of Environmental Sciences, 2019, vol. 81, p. 80-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.02.001>

38. LIU, Wen-Shen, et al. Water, sediment and agricultural soil contamination from an ion-adsorption rare earth mining area. *Chemosphere*, 2019, vol. 216, p. 75-83. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.109>
39. MAHMOUD, Esawy Kasem; GHONEIM, Adel Mohamed. Effect of polluted water on soil and plant contamination by heavy metals in El-Mahla El-Kobra, Egypt. *Solid Earth*, 2016, vol. 7, no 2, p. 703-711. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/se-7-703-2016>
40. MASINDI, Vhahangwele; MUEDI, Khathutshelo L. Environmental contamination by heavy metals. *Heavy metals*, 2018, vol. 10, p. 115-132. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=dnuQDwAAQBAJ&lpg=PA115&ots=UXqmXr6WhW&dq=water%20contamination%20by%20heavy%20metals&lr&hl=es&pg=PA115#v=onepage&q=water%20contamination%20by%20heavy%20metals&f=false>
41. MOHANTY, Swayansu Sabyasachi, et al. A critical review on various feedstocks as sustainable substrates for biosurfactants production: a way towards cleaner production. *Microbial cell factories*, 2021, vol. 20, no 1, p. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01613-3>
42. MORGADO, Rui G.; LOUREIRO, Susana; GONZÁLEZ-ALCARAZ, Maria N. Changes in soil ecosystem structure and functions due to soil contamination. *En Soil pollution*. Academic Press, 2018. p. 59-87. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00003-0>
43. MULLIGAN, Catherine N. Sustainable remediation of contaminated soil using biosurfactants. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, vol. 9, p. 195. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.635196>
44. OBINNA, Isiuku Beniah, et al. A review: Water pollution by heavy metal and organic pollutants: Brief review of sources, effects and progress on remediation

with aquatic plants. *Analytical Methods in Environmental Chemistry Journal*, 2019, vol. 2, no 03, p. 5-38. Disponible en: <https://doi.org/10.24200/amecj.v2.i03.66>

45. OLATUNDE, Kofoworola A. Determination of petroleum hydrocarbon contamination in soil using VNIR DRS and PLSR modeling. *Heliyon*, 2021, vol. 7, no 4, p. e06794. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06794>
46. ONWUDILI, Jude A.; WILLIAMS, Paul T. Catalytic supercritical water gasification of plastics with supported RuO₂: A potential solution to hydrocarbons–water pollution problem. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, vol. 102, p. 140-149. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.02.009>
47. OTZEN, Daniel E. Biosurfactants and surfactants interacting with membranes and proteins: same but different?. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 2017, vol. 1859, no 4, p. 639-649. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2016.09.024>
48. PEREIRA, Jorge FB, et al. Optimization and characterization of biosurfactant production by *Bacillus subtilis* isolates towards microbial enhanced oil recovery applications. *Fuel*, 2013, vol. 111, p. 259-268. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.040>
49. PHULPOTO, Irfan Ali, et al. Production and characterization of surfactin-like biosurfactant produced by novel strain *Bacillus nealsonii* S2MT and its potential for oil contaminated soil remediation. *Microbial cell factories*, 2020, vol. 19, no 1, p. 1-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01402-4>
50. RAHIM, Fazli, et al. A feasibility study for the treatment of 1, 2-dichloroethane-contaminated groundwater using reedbed system and assessment of its natural attenuation. *Science of The Total Environment*, 2022, p. 152799. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152799>

51. RATHANKUMAR, Abiram Karanam, et al. Development of efficient and sustainable added-value products from municipal biosolids through an industrially feasible process. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 266, p. 121749. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121749>
52. RIZK, Roquia, et al. Comprehensive environmental assessment of heavy metal contamination of surface water, sediments and Nile Tilapia in Lake Nasser, Egypt. *Journal of King Saud University-Science*, 2022, vol. 34, no 1, p. 101748. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101748>
53. ROELANTS, Sophie LKW, et al. Towards the industrialization of new biosurfactants: biotechnological opportunities for the lactone esterase gene from *Starmerella bombicola*. *Biotechnology and bioengineering*, 2016, vol. 113, no 3, p. 550-559. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bit.25815>
54. ROELANTS, Sophie LKW, et al. *Candida bombicola* as a platform organism for the production of tailor-made biomolecules. *Biotechnology and bioengineering*, 2013, vol. 110, no 9, p. 2494-2503. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/bit.24895>
55. SANTOS, Danyelle Khadydja F., et al. Biosurfactants: multifunctional biomolecules of the 21st century. *International journal of molecular sciences*, 2016, vol. 17, no 3, p. 401. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms17030401>
56. SINGH, Simranjeet, et al. Biosurfactant-based bioremediation. *En Bioremediation of pollutants*. Elsevier, 2020. p. 333-358. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819025-8.00016-8>
57. SINGH, Pooja; PATIL, Yogesh; RALE, Vinaykumar. Biosurfactant production: emerging trends and promising strategies. *Journal of applied microbiology*, 2019, vol. 126, no 1, p. 2-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/jam.14057>
58. SINGH, Anil Kumar; CAMEOTRA, Swaranjit Singh. Efficiency of lipopeptide biosurfactants in removal of petroleum hydrocarbons and heavy metals from contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol.

20, no 10, p. 7367-7376. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1752-4>


59. TISO, Till, et al. Integration of genetic and process engineering for optimized rhamnolipid production using *Pseudomonas putida*. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2020, p. 976. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00976>
60. TRIPATHI, Lakshmi, et al. Marine derived biosurfactants: a vast potential future resource. *Biotechnology letters*, 2018, vol. 40, no 11, p. 1441-1457. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10529-018-2602-8>
61. TRIPATHI, Varsha, et al. Characterization and properties of the biosurfactant produced by PAH-degrading bacteria isolated from contaminated oily sludge environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no 22, p. 27268-27278. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05591-3>
62. VARJANI, Sunita; PANDEY, Ashok; UPASANI, Vivek N. Petroleum sludge polluted soil remediation: Integrated approach involving novel bacterial consortium and nutrient application. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 763, p. 142934. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142934>
63. VARJANI, Sunita J.; UPASANI, Vivek N. Critical review on biosurfactant analysis, purification and characterization using rhamnolipid as a model biosurfactant. *Bioresource technology*, 2017, vol. 232, p. 389-397. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.047>
64. VARJANI, Sunita J.; UPASANI, Vivek N. Carbon spectrum utilization by an indigenous strain of *Pseudomonas aeruginosa* NCIM 5514: Production, characterization and surface active properties of biosurfactant. *Bioresource technology*, 2016, vol. 221, p. 510-516. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.080>

65. VARJANI, Sunita, et al. Bio-based rhamnolipids production and recovery from waste streams: Status and perspectives. *Bioresource technology*, 2021, vol. 319, p. 124213. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124213>
66. VARJANI, Sunita; UPASANI, Vivek N. Bioaugmentation of *Pseudomonas aeruginosa* NCIM 5514—A novel oily waste degrader for treatment of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 319, p. 124240. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124240>
67. VOLNEY, Giselle, et al. Naphthalene toxicity: methemoglobinemia and acute intravascular hemolysis. *Cureus*, 2018, vol. 10, no 8. Disponible en: <https://doi.org/10.7759/cureus.3147>
68. WHO Guidelines for drinking-water quality Incorporating the First Addendum (fourth ed.), World Health Organization, Geneva (2017). ISBN 978-92-4-155001-7
69. WISE, Stephen A.; SANDER, Lane C.; SCHANTZ, Michele M. Analytical methods for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)—a historical perspective on the 16 US EPA priority pollutant PAHs. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2016, vol. 35, no 2-4, p. 187-247. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10406638.2014.970291>
70. WU, Qun; ZHI, Yan; XU, Yan. Systematically engineering the biosynthesis of a green biosurfactant surfactin by *Bacillus subtilis* 168. *Metabolic engineering*, 2019, vol. 52, p. 87-97. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.11.004>
71. ZHANG, Fang, et al. Engineering modification of genome-reduced strain *Bacillus amyloliquefaciens* for enhancing surfactin production. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-41198/v3>
72. ZHANG, Fang, et al. Engineering of a genome-reduced strain *Bacillus amyloliquefaciens* for enhancing surfactin production. *Microbial cell factories*, 2020, vol. 19, no 1, p. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01485-z>

73. ZHANG, Pei; CHEN, Yinguang. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in surface soil of China: a review. *Science of the total Environment*, 2017, vol. 605, p. 1011-1020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.247>
74. ZHANG, Junhui, et al. Producción de biosurfactantes lipopeptídicos por *Bacillus atrophaeus* 5-2a y su uso potencial en la recuperación microbiana mejorada de petróleo. *Fábricas de células microbianas*, 2016, vol. 15, nº 1, pág. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s12934-016-0574-8>

ANEXO:

Anexo N°1: Ficha de análisis de contenido

 Universidad César Vallejo		FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
PAGINAS UTILIZADAS	AÑO DE PUBLICACION	LUGAR DE PUBLICACION	
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
TIPO DE INVESTIGACION:		AUTOR (ES):	
CÓDIGO :			
PALABRAS CLAVES :			
TIPO DE METODOLOGÍA :			
ESTRATEGIAS PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN DE BIOSURFACTANTES :			
CAMBIOS PRESENTADOS EN EL SISTEMA ACUÁTICO :			
CAMBIOS PRESENTADOS EN EL SISTEMA TERRESTRE :			
RESULTADOS :			
CONCLUSIONES :			