



***LA MÚSICA COMO FACTOR ESTIMULANTE EN LA PRODUCCIÓN DE
BIOMASA MICROBIANA***

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
MONOGRAFÍA
BOGOTÁ, 2023**



**LA MÚSICA COMO FACTOR ESTIMULANTE EN LA PRODUCCIÓN DE
BIOMASA MICROBIANA**

ANGIE PAOLA SANABRIA GALINDO

ASESORA INTERNA

LIGIA CONSUELO SANCHEZ LEAL M.Sc.

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
MONOGRAFÍA
BOGOTÁ, 2023**



**LA MÚSICA COMO FACTOR ESTIMULANTE EN LA PRODUCCIÓN DE
BIOMASA MICROBIANA**

Aprobada: _____ x _____

Jurados: _____

Asesores: _____

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
MONOGRAFÍA
BOGOTÁ, NOVIEMBRE DE 2023**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios por permitirme llegar hasta este punto, quiero expresar mi gratitud a la docente Ligia Consuelo Sánchez, ya que sin ella no habría sido posible el desarrollo de este trabajo, en especial por su confianza en mí y darme su apoyo cuando más lo necesitaba de la mejor manera, no solo para construir un trabajo de investigación, sino para forjar una estudiante que pronto se convertirá en una profesional íntegra. En segundo lugar, a mis hijos quienes han sido mi inspiración y motivación diaria. Por último, y no menos importante, a mi madre porque siempre ha creído en mí y me han enseñado a luchar por mis sueños, y a dar lo mejor de mí en cada una de las cosas que hago, a mis hermanos por estar incondicionalmente y a mi esposo por ser mi compañero a lo largo de mi formación y sostenerme en los momentos más difíciles.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado especialmente a mis hijos David y Noah sin ellos no hubiera llegado a este punto, a mi madre por ser mi ejemplo, a mi esposo Jonathan por su esfuerzo, han sido y serán siempre mi mayor motivación para ser una mejor persona y una mejor profesional. Dedico mi esfuerzo en estos 5 años a cada mujer que es madre y quiere superarse cada día a pesar de las adversidades.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	7
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	11
1. ANTECEDENTES.....	12
2. MARCO REFERENCIAL.....	17
2.1 Biomasa microbiana.....	17
2.2 Comunicación microbiana.....	17
2.3 Definición de sonido	19
2.3.1 Clasificación del sonido.....	19
2.4 El Ultrasonido.....	19
2.4.1 Efectos moleculares del ultrasonido en las células.....	20
2.4.2 Efecto del ultrasonido en levaduras y microalgas.....	21
2.5 Producción de biomasa por estimulación sonora audible.....	22
2.6 Música para las células	23
2.7 Música inspirada en la ecología microbiana.....	24
2.8 Sonido audible y su relación con las bacterias	24
2.9 Canales mecanosensibles.....	25
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	26
3.1 Tipo de investigación.....	26
3.2 Universo, población y muestra.....	26
3.3 Procedimiento.....	26
3.3.1 Búsqueda y revisión de información existente.....	26
3.3.2 Clasificación de la información.....	27

	Pág.
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1 Información obtenida	28
4.2 Música y producción de biomasa en bacterias.....	29
4.3 Música y producción de biomasa en microalgas.....	32
4.4 Música y producción de biomasa en levaduras.....	33
4.5 La música y su efecto sobre moléculas biológicas.....	34
5. CONCLUSIONES.....	40
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1. Comunicación célula-célula a través de ondas sonoras.....	18
Figura 2. Efectos moleculares del ultrasonido.....	20
Figura 3. Esquema del efecto del sonido en bacterias y mamíferos según estudios.....	23
Figura 4. Resultados obtenidos en la IA Research Rabbit relacionados con el tema de investigación.....	27
Figura 5. Diagrama de flujo descriptivo de las etapas de revisión bibliográfica para la obtención de información.....	28
Figura 6. Cantidad de publicaciones usadas en la presente revisión discriminadas por año.....	29
Figura 7. Efecto de la pieza musical Highfast en la motilidad de <i>E.coli</i>	30
Figura 8. Estimulación de <i>H. pluvialis</i> con "Blues for Elle" y "Far and Wide" Música creada para estimular la fotosíntesis.....	32
Figura 9. Estimulación sonora en <i>S. cerevisiae</i> para la obtención de compuestos Volátiles.....	34

Índice de tablas

	Pág.
Tabla 1. Efecto del sonido audible y la música en diferentes microorganismos.....	35



UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO

***LA MÚSICA COMO FACTOR ESTIMULANTE EN LA PRODUCCIÓN DE
BIOMASA MICROBIANA***

RESUMEN

El sonido es un factor físico en el cual los seres vivos nos encontramos inmersos, es por esto que comprender la capacidad de las diferentes frecuencias sonoras para generar mecanismos estimulantes brinda una oportunidad innovadora para los diversos procesos industriales en los que se ven implicados microorganismos. El ultrasonido ha sido por varios años usado en diversas áreas con fines variados siendo tema de múltiples investigaciones evidenciando un efecto positivo en la estimulación de levaduras y microalgas, sin embargo, la música ubicada dentro de la frecuencia sonora audible representa una herramienta prometedora para optimizar bioprocesos con fines de producción de biomasa. La búsqueda de procesos alternativos a los tradicionales en cuanto a la fermentación, biorremediación, estimulación de crecimiento y producción de metabolitos que respondan a las necesidades y a la situación actual es necesario. De esta manera, el objetivo de la presente monografía es hacer un recorrido bibliográfico para llegar a establecer la relación de la música como factor estimulante en la producción de biomasa frente a microorganismos como bacterias, algas y levaduras.

PALABRAS CLAVE: Producción de biomasa, música, sonido audible, onda sonora, biomasa microbiana.

Estudiante: Angie Paola Sanabria Galindo

Asesor: Ligia Consuelo Sánchez Leal M.Sc.

Institución: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Fecha: Noviembre 2023

INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica es considerada la tercera fuente de contaminación en el mundo moderno, es de conocimiento que la exposición a sonidos puede desencadenar en el ser humano alteraciones en su estado de salud, así como el impacto en el mundo de la ecología ¹⁴. El sonido es uno de los factores ambientales más ampliamente distribuidos, uno u otro tipo de sonido se puede encontrar en casi todos los rincones de la naturaleza. Se ha estudiado bien el efecto de una variedad de factores ambientales como la temperatura, la luz, el pH, la concentración de oxígeno, entre otros sobre los microorganismos. Sin embargo, a pesar de que el sonido es un factor universalmente presente, su efecto sobre las formas de vida microbiana no ha recibido suficiente atención ¹⁹.

Las diferentes frecuencias de sonido inducen respuestas metabólicas y fisiológicas en las células de levaduras, bacterias y microalgas. Esto abre nuevas perspectivas para la investigación científica que interconecta la acústica, la biofísica, la bioquímica, y la microbiología proporcionando herramientas poderosas para manipular el metabolismo celular y el control del crecimiento, por ejemplo, en los biorreactores ⁷.

El ultrasonido se ha empleado en una amplia gama de procesos relacionados con la biotecnología, la fermentación y el procesamiento de alimentos. En este sentido, el uso de ultrasonido representa una tecnología emergente capaz de minimizar el procesamiento e impactar positivamente tanto en la seguridad microbiana como en la calidad de los diferentes productos ²⁶. Este tipo de sonido ubicado en una frecuencia >20.000 Hz ha sido aplicado a microalgas, levaduras y bacterias para monitorear el crecimiento y la producción de biomasa con resultados satisfactorios.

El uso desmedido de combustibles fósiles y su impacto en el medio ambiente ha sido una de las causas para explorar el mundo de las microalgas quienes tienen una gran capacidad de producción de biodiesel teniendo condiciones óptimas en cultivos a gran escala con una alta producción de biomasa, por otro lado, están las bacterias capaces de aumentar su producción de metabolitos y las levaduras fundamentales en procesos fermentativos para la obtención de productos con una mayor rentabilidad,

eficiencia en bioprocesos e innovación, todo esto debido a estímulos físicos de carácter sonoro como lo es la música, la cual ha demostrado no solo tener implicación en seres con capacidad auditiva sino también en microorganismos expuestos a la perturbación de ondas sonoras.

En ese mismo contexto, se encuentra el sonido audible el cual representa una herramienta novedosa para comprender si ese rango de frecuencia genera alteraciones que conduzcan al mejoramiento de bioprocesos como se ha evidenciado en las plantas donde las respuestas pueden incluir cambios en la expresión génica, aumento o disminución de los niveles de fitohormonas y, finalmente, ajustes fisiomorfológicos ³¹.

La investigación sobre los efectos del sonido y la música en las células es un campo en expansión, la música tiene la capacidad de generar efectos en las personas en sus emociones y estados de ánimo siendo un tema de estudio en áreas neurológicas y en su efecto sensorial mucho más que con relación al impacto metabólico ⁴. La ciencia multidisciplinar que estudia el comportamiento de las células, tejidos y órganos bajo los efectos de la bioquímica, biología celular y estímulos externos, como por ejemplo las vibraciones acústicas reproducidas a través de altavoces, se denomina mecanobiología ⁴².

Comprender que diferentes exposiciones al sonido musical inducen variaciones entre especies en el crecimiento, la biomasa y la síntesis de moléculas intracelulares podría tener implicaciones importantes para muchos procesos ecológicos. Si bien, no se comprende aun completamente los mecanismos por los cuales el sonido estimula el crecimiento microbiano, diversos autores sugieren que el estrés generado y la alteración de canales mecanosensible en la membrana pueden suponer una explicación para este suceso ³³. Esta revisión considera analizar la relación entre la música como factor estimulante y la producción de biomasa microbiana.

Pregunta de Investigación.

¿Puede un factor físico como lo es la música estimular la producción de biomasa microbiana?

OBJETIVOS

Objetivo general

- Analizar la relación entre la música como factor estimulante y la producción de biomasa microbiana.

Objetivos específicos

- Describir la influencia del sonido audible en la producción de biomasa y el crecimiento de microorganismos de interés.
- Determinar la influencia de la música en los procesos metabólicos de diversos microorganismos.
- Identificar el mecanismo mediante el cual la música influye en la producción de biomasa.

1. ANTECEDENTES

En cuanto a los antecedentes relacionados con la influencia de la música en la producción de biomasa microbiana diversos autores en sus investigaciones han denotado que el sonido constituye un papel a destacar en este tema.

A lo largo de los años el ultrasonido ha sido una herramienta biotecnológica como lo hace notar Rokhina et al.² siendo este utilizado en la medicina y procesos industriales con el objetivo de generar alteración en las células para la liberación de enzimas y orgánulos intracelulares, en cuanto a sus aplicaciones industriales puede mejorar procesos de fermentación y producción de biocombustibles demostrando también que la irradiación de ultrasonidos de baja frecuencia es una herramienta muy útil para emulsionar líquidos inmiscibles.

En cuanto al estudio piloto realizado por Shaobin et al.³, este plantea el uso de sonido audible aplicado al crecimiento de *E. coli* en condiciones normales y bajo estrés osmótico inducido por azúcar obteniendo un crecimiento favorable aplicando una onda de sonido de 90 dB con una frecuencia de 1, 5 y 10 kHz por separado, la eficiencia relativa de formación de colonias superó el 100% en relación al control.

El uso de microorganismos aerobios encargados de la recuperación de aguas residuales y su capacidad de producción de biomasa asociado a la música ha sido expuesto en estudios investigativos donde se ha demostrado que el estímulo sonoro por 5 piezas musicales Holy Wars and punishment due de Megadeth, "Farewell" de Apocalyptica, "Oh La Nor my love de Tchaikovsky, "Ruk" de Sek Loso y "Four Seasons" de Vivaldi, tienen un efecto significativo en la utilización de sustratos incrementado en términos de porcentaje de carbón orgánico total y demanda química de oxígeno⁵.

Incluso se ha documentado que *Bacillus carboniphilus* emite un sonido de muy baja intensidad que influye en el crecimiento de colonias cercanas, aumentando significativamente su eficiencia frente a la formación de colonias en condiciones de estrés⁶. No obstante, la aplicación de estimulación sónica (5 kHz a 90 dB) en la

germinación de endosporas de *Bacillus* promovió la velocidad de germinación en *B. atrophaeus* por la afectación en la permeabilidad de la membrana lo que aumenta las actividades enzimáticas; acelerando así el proceso de germinación. Por otro lado, no se observó efecto acústico en las endosporas de *B. subtilis*. Esto puede atribuirse a la diferente relación de aspecto de las esporas ¹⁶.

Aggio et al.⁷ describe en su estudio metabolómico cómo el sonido afecta a *Saccharomyces cerevisiae* sometiendo un cultivo líquido de esta levadura a estímulos sonoros de alta y baja frecuencia, música y silencio obteniendo una estimulación e inhibición de diferentes vías metabólicas evidenciando que el sonido de frecuencia audible influye en el crecimiento de las levaduras en comparación a las que se encontraban en silencio. Agregado a lo anterior el ultrasonido es una herramienta prometedora para cepas de *S. cerevisiae* mostrando un aumento en el crecimiento a 37°C y 2% de salinidad, frente a patrones como la capacidad de autoagregación y la tolerancia a condiciones gastrointestinales simuladas ²⁸.

Teniendo en cuenta a Adadi et al.³⁵ la variación de condiciones como la intensidad y frecuencia del sonido en el crecimiento de cepas de levaduras de *S. cerevisiae* influye en la producción de compuestos orgánicos volátiles en la cerveza y la gravedad del mosto. Harris et al.³⁶ ratifica el incremento en la tasa de crecimiento de un 28,9 % identificando la variación de compuestos volátiles que se producen en función a las diferentes frecuencias sonoras.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Gu et al.¹¹ la estimulación con sonido audible en *E. coli* genera un crecimiento el cual puede no ser lineal dependiendo de la intensidad y frecuencia, asimismo se evidenció una mejora en la síntesis de proteínas, la actividad de enzimas como la superóxido dismutasa y catalasa, el efecto más significativo sobre la promoción del crecimiento se observó cuando la onda sonora se mantuvo a 100 dB y 5000 Hz. En ese mismo contexto se agrega como la estimulación sonora puede inducir el cambio de la morfología celular, el metabolismo y la división celular de *E. coli* K-12 expuesta a un nivel de intensidad de sonido de 100 dB aumentando más del 27,26 % en comparación con el grupo de control ¹⁴.

Por otro lado, Banerjee et al.²⁴ indaga acerca del efecto de tres tipos de frecuencias de sonido situadas dentro del rango audible en parámetros como el crecimiento bacteriano y la susceptibilidad a los antibióticos en *E. coli* registrando resultados satisfactorios en una frecuencia por debajo de 1 KHz (432 Hz). Es así como en el estudio de Ku et al.³⁷ utilizó una cepa de *E. coli* MG1655, junto a tres piezas de música clásica evidenciando un aumento en la motilidad asociada a la música Midfast y Highfast respectivamente.

Dentro de los microorganismos investigados frente al efecto musical y su relación con la producción de biomasa también se encuentran *C. violaceum*, *S. marcescens*, *S. aureus*, *S. pyogenes*, *S. cerevisiae*, *C. albicans* los cuales fueron sometidos a música clásica de la india (Raag Kirwani, 38–689 Hz), constatando un mejor crecimiento bajo la influencia musical excepto *S. marcescens*, observando la afectación en la producción de violaceína y prodigiosina así como una susceptibilidad mayor a antibióticos expresada en todos los microorganismos¹³. En relación a *C. violaceum* expuesto a estimulación sónica (300 Hz-70 a 89,5 dB) el crecimiento se vio afectado a una intensidad sonora baja contrario a la producción de pigmentos la cual se afectó con una intensidad alta²².

Chandra et al.²⁵ agrega como la música india “tollywood” con una frecuencia de 600-1000 Hz, actúa en el crecimiento y producción de pigmentos de *Brevibacterium Sp*, obteniendo una producción de biomasa mayor (2.8-3.5) respecto a la muestra no tratada.

La optimización industrial de bioprocesos que incluyen a microorganismos ha utilizado al ultrasonido en casos como la liberación de β -glucosidasa por *Lactobacillus acidophilus* BCRC 10695 durante la fermentación de la leche de soja demostrado por Liu et al.²⁶, elaborando un producto funcional con un alto contenido de isoflavonas aumentando la transferencia de masa, así como las velocidades de reacción en sistemas multinivel y operaciones de fermentación homogéneas.

Por otra parte, la formación de biopelículas depende de varios factores que han sido estudiados a lo largo del tiempo como el pH y la temperatura, surgiendo microorganismos evolucionados para prosperar en entornos difíciles, después de

exponer *P. aeruginosa* a vibraciones a 100, 800 y 1600 Hz durante 48 se evidenció un crecimiento significativo. Todo esto sugiere que la vibración acústica se puede utilizar para controlar la formación de biopelículas y, por lo tanto, presenta un medio novedoso y potencialmente rentable para manipular el desarrollo y el rendimiento en una variedad de importantes procesos industriales y médicos ¹⁷.

El efecto de la música también influye sobre moléculas biológicas como lo describe Algeri et al.²³, donde se analiza el efecto de dos piezas musicales Reminiscence y Pioggia durante la oxidación de L-tirosina en L-DOPA un medicamento usado en el tratamiento de Parkinson, los resultados arrojaron un efecto positivo de Reminiscence el cual aumentó la actividad específica alrededor del 30%.

No obstante, el uso de microalgas como una alternativa ecológica sostenible y rentable es cada vez más una alternativa llamativa que busca la optimización de sus procesos recurriendo a herramientas físicas del entorno como el sonido o la luz que influyan en una mayor producción de biomasa. Con base en la investigación de Jiang et al, *Chlorella pyrenoidosa* una microalga con múltiples usos como lo son el monitoreo ambiental, la producción de alimentos a base de microalgas entre otros después de estar expuesta a un estímulo sonoro de 80 dB a diferentes frecuencias 200, 400, 700, 1000, 2000 y 6000 Hz se obtuvo que la exposición al sonido aumentó un 30% el crecimiento con un rango sonoro óptimo entre 400 y 1000 Hz ^{10,33}.

Las microalgas comprenden una amplia clasificación teniendo un potencial enorme a nivel investigativo Cai et al. ¹⁸ relaciona una cepa nativa de Oklahoma, *Picochlorum oklahomensis* respecto al efecto de las ondas sonoras con una frecuencia de 1100 Hz, 2200 Hz y 3300 Hz en la producción de biomasa donde demostró que el tratamiento con sonido audible de los cultivos de algas a 2200 Hz fue el más efectivo en términos de producción de biomasa y rendimiento volumétrico de aceite.

Teniendo en cuenta a Santoso et al.^{29,30} el efecto de la música en la densidad celular de *Synechococcus* HS-9 una cianobacteria aislada de aguas termales en Indonesia en un sistema de fotobiorreactores simples expuestos a dos canciones tituladas "Blues for Elle" y "Far and Wide" evidenció cómo durante 3 horas de música por 14 días el sonido audible influyó en la densidad celular en un 64,4% y 58,3 respectivamente apoyando otro estudio de los mismos autores donde además de la

densidad se logró un aumento en la producción de lípidos indicando que la exposición a ondas sonoras podría utilizarse como estrategia para mejorar el sistema fotobiorreactores en condiciones de poca luz.

Asimismo, Keramati et al.³⁴ llevó a cabo un estudio piloto para observar la respuesta de *Dunaliella salina* a frecuencias sonoras audibles (100, 200, 500, 1000 Hz) investigando el crecimiento y la concentración de betacaroteno como metabolito secundario donde se encontró que la frecuencia de sonido de 200 Hz promueve la concentración de biomasa y la división celular hasta en un 50 % en comparación con el control. En ese mismo contexto, *Haematococcus pluvialis* una microalga ampliamente usada en la industria por su producción de astaxantina expuesta a estimulación ultrasónica logró un aumento en este metabolito actuando como un estímulo oxidativo⁴⁴, resaltando cómo los diferentes tipos de sonido influyen en los microorganismos tratándose de un área de investigación emergente.

Los estudios relacionados con este tema cada vez van tomando más relevancia ampliando el campo de investigación a diferentes escenarios como es el caso del suelo y los microorganismo solubilizadores de fosfatos los cuales relacionan la capacidad para disolver fosfato en relación al sonido murrotal Al-Qur'an durante 2 horas al día durante 7 días donde se aumentó la población total un 23,08 % más que sin aplicar este sonido³², lo expuesto anteriormente da a conocer que los diferentes microorganismos se ven afectados por estímulos físicos como lo es la música la cual influye de diferentes formas teniendo en cuenta variables y condiciones específicas para cada uno.

2. MARCO REFERENCIAL.

2.1 Biomasa microbiana.

La biomasa microbiana se refiere a la cantidad de materia orgánica presente en una población de microorganismos en un entorno determinado. Esta biomasa está compuesta por los diferentes componentes celulares de los microorganismos, como las células vivas, los restos celulares y los productos metabólicos acumulados. Es

usada en diversos estudios como la evaluación de la actividad microbiana o como herramienta de monitoreo en procesos de carácter ambiental y biotecnológico.

Esta puede variar en función de condiciones como disponibilidad de nutrientes, temperatura, estímulos físicos y químicos; la producción de biomasa contribuye a la sostenibilidad de los ecosistemas ³², así como desempeña un papel importante en la producción de alimentos, productos farmacéuticos y biocombustibles.

2.2 Comunicación microbiana.

La comunicación es definida como el proceso de intercambio de información (señales) entre un emisor y un receptor a través de un medio común. La detección de quórum permite que los microorganismos se comuniquen químicamente respondiendo de forma coordinada a la acumulación de señales químicas extracelulares (autoinductores) y reprogramando la expresión génica en función de la densidad celular. También hay evidencia experimental disponible que indica que los microorganismos pueden generar y responder a señales físicas tales como ondas de sonido, radiación electromagnética y corrientes eléctricas ⁶.

Es conocida la comunicación celular a nivel química como es el caso del *Quorum Sensing* el cual por medio de moléculas denominadas autoinductores contribuyen al monitoreo del número de células controlando procesos relevantes como la producción de biopelículas, secreción de factores de virulencia entre otros ⁸. Los diferentes cambios producidos en procesos celulares como las reacciones enzimáticas la transcripción o la síntesis de proteínas entre otros aportan a la actividad en el interior de la célula generando un efecto vibratorio a nanoescala llegando a ser tan fuertes que se logren propagar a través de la pared celular ⁶.

Un aspecto relevante es que cada célula emite una vibración única que la caracteriza que se puede comparar con las tonalidades de voz en los seres humanos lo que puede sugerir que el estímulo es mayor en aquellas que presentan similitudes proporcionando un mecanismo de identificación único.

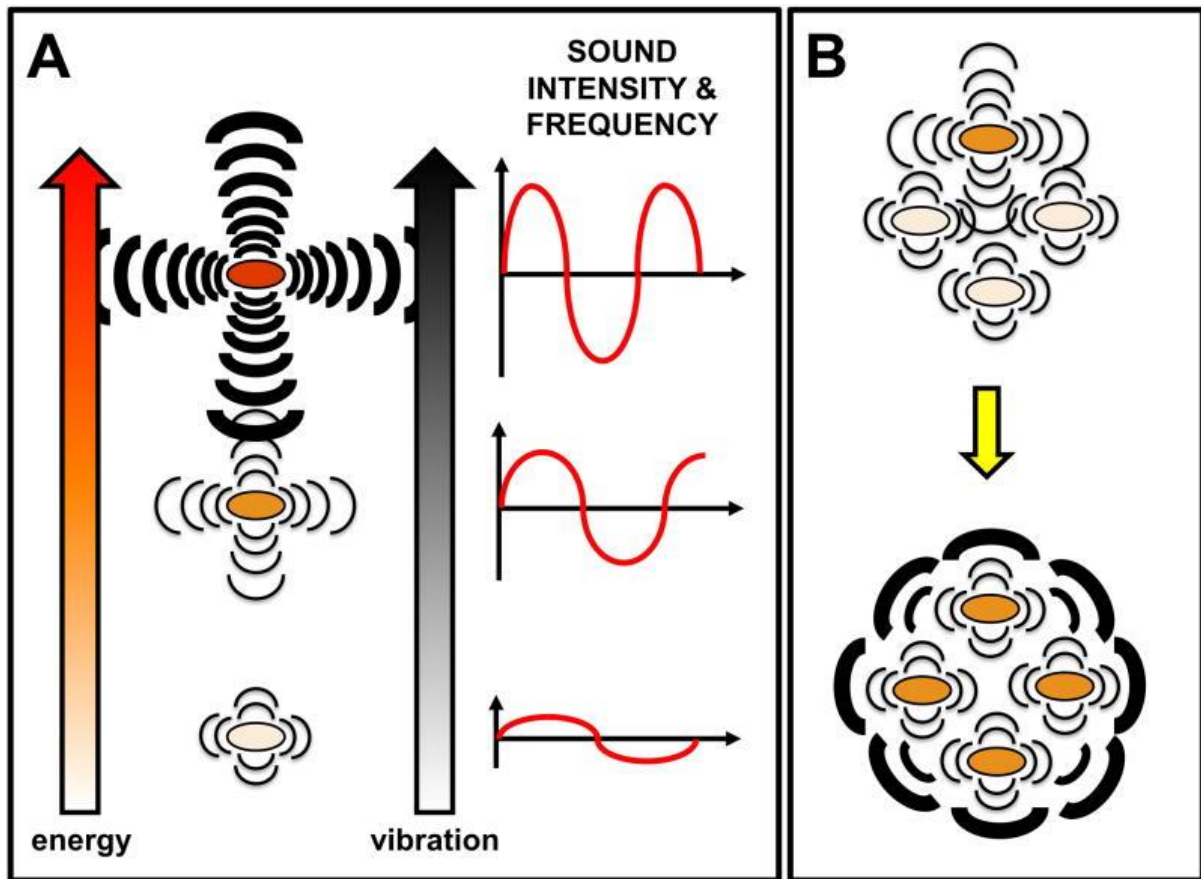


Figura 1. Comunicación célula-célula a través de ondas sonoras. Tomado de: Reguera G. When microbial conversations get physical, 2011.

La generación de movimientos en procesos a nivel intracelular como se observa en la fig. 1 pueden emitir vibraciones con una frecuencia e intensidad siendo esto decisivo en cuanto a la inducción de una respuesta biológica como lo es la estimulación del crecimiento si las células se encuentran en estado sintonizado amplían su capacidad de amplificación de señal.

2.3 Definición de Sonido.

El sonido es la propagación de ondas mecánicas provocadas por la vibración de un cuerpo a través de un medio líquido o sólido, involucrando el transporte de energía sin transporte de materia, ocurriendo mediante un medio, ya sea líquido, sólido o gaseoso. La percepción de las ondas sonoras en los seres vivos depende de la frecuencia de estas vibraciones.³⁸

2.3.1 Clasificación del sonido.

Según su frecuencia, el sonido se puede clasificar en tres categorías: infrasonido (hasta 20 Hz), sonido audible (20-20.000 Hz) y ultrasonido (>20 000 Hz). En el mundo natural, casi todas las formas de vida están rodeadas de diferentes tipos de sonidos y también interactúan con estos sonidos. Sin embargo, no se han hecho suficientes esfuerzos para investigar la interacción entre los sistemas biológicos y sonoros ²¹.

2.4 El Ultrasonido.

Cuando se habla de ultrasonido se hace referencia a un sonido con un tono superior al captado por el oído humano, el cual es utilizado en diversas áreas con propósito eficientes ya que es considerado una tecnología verde ya que cuenta con características como tiempos de proceso reducidos, alto rendimiento y eficiencia, así como la poca necesidad de instrumentos adicionales. A su vez este puede dividirse en:

- Ultrasonido de alta frecuencia y baja potencia el cual oscila en un rango de 2 a 10 MHz, también conocido como de rango extendido o de diagnóstico, el cual es útil es el área de imágenes médicas y análisis químicos.
- Ultrasonido de baja frecuencia y alta potencia ubicado entre los 20–100 kHz hace referencia al ultrasonido convencional usado en secciones de limpieza y sonoquímica ²

2.4.1 Efectos moleculares del ultrasonido en las células

Al fenómeno de cavitación acústica causada por el ultrasonido se le atribuye la capacidad de generar las intensidades requeridas para inducir cambios químicos o físicos en un sistema, durante este proceso se forman radicales libres gracias a la disociación de los vapores atrapados en las cavidades permitiendo su uso en reacciones químicas en condición de temperatura ambiente que anteriormente requerían condiciones más estrictas ².

Dentro de los cambios físicos que se pueden encontrar a nivel molecular Fig. 2, asociados a temperatura están los térmicos como la pirólisis y combustión, así como cambios no térmicos relacionados con cavitación y cizallamiento. En cuanto a los cambios químicos se pueden generar radicales inducidos por cavitación como lo es la liberación de compuestos como ácido nítrico, ácido nítrico y peróxido de hidrógeno debido a la interacción de los radicales formados con la célula. Por otro lado, los cambios inducidos por estrés y generados por una transmisión acústica afectan el Transporte de masa dentro y fuera de la célula ².

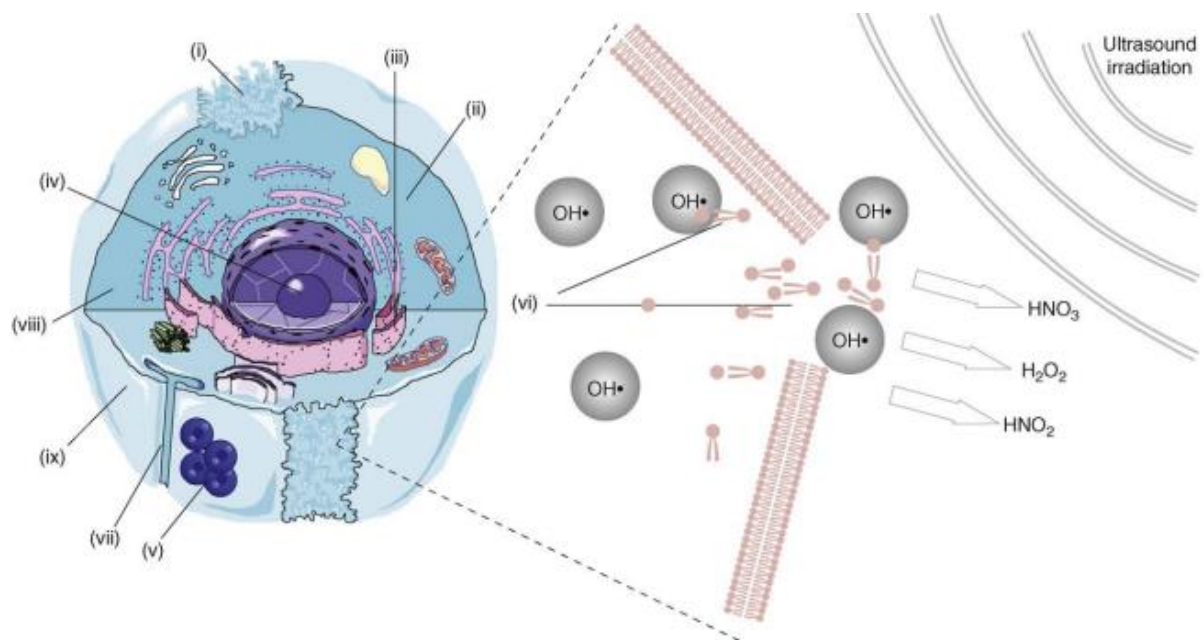


Figura 2. Efectos moleculares del ultrasonido. lisis parcial o total (i) alteraciones en las ultraestructuras dentro de las células (ii), estabilidad enzimática alterada (iii), efectos celulares causados por propiedades de crecimiento alteradas, ruptura del núcleo y liberación de ADN (iv), alteración de sustancias poliméricas extracelulares (v) liberación de compuestos (vi), Disminución de la estabilidad celular (vii), alteración de la permeabilidad de la membrana (viii), alteración de la carga de la superficie celular (ix). Tomado de: Rokhina et al. Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art, 2009.

2.4.2 Efecto del ultrasonido en levaduras y microalgas.

El ultrasonido ha sido empleado en procesos biotecnológicos, fermentativos y alimentarios. En este sentido, su uso representa una tecnología emergente capaz de reducir el procesamiento e impactar positivamente tanto en la seguridad microbiana como en la calidad de los productos alimenticios. Este actúa en la proliferación de células microbianas, inactivación de microorganismos y actividades enzimáticas. En

la industria láctea se ha documentado que puede reducir el tamaño de los glóbulos de grasa mejorando así la homogeneización y la emulsificación además de aumentar la coagulación de proteínas de suero de leche y estimular las bacterias probióticas ²⁷. Por otro lado, se evidenció que algunas cepas de *S. cerevisiae* tuvieron un índice de crecimiento superior al 120% por la influencia del ultrasonido ²⁸.

Haematococcus sp. es una de las microalgas unicelulares más prometedoras que presenta hiperacumulación de astaxantina la cual exhibe diversas propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antidiabéticas y anticancerígenas; la ultrasonicación a una frecuencia de 40 kHz es una forma eficaz de acortar el período de tratamiento y mejorar el crecimiento de *H. lacustris* incrementando la densidad celular y el contenido de clorofila en un 50,00 % y un 39,01 %, respectivamente. La ultrasonicación causó pequeñas grietas en la pared celular, seguida de un mejor transporte de nutrientes ³⁹.

Asimismo, *Haematococcus pluvialis* dio como resultado un aumento en los genes relacionados con la biosíntesis de astaxantina y los niveles celulares de especies reactivas de oxígeno, por lo tanto, este tipo de sonido actúa como un estímulo oxidativo ⁴⁴.

2.5 Producción de biomasa por estimulación sonora audible.

La biomasa de microalgas es utilizada como materia prima para la producción de biocombustibles gracias a su alto contenido de lípidos siendo útil en productos para humanos y animales sin embargo, factores como pH, salinidad, temperatura, fotoperiodo, intensidad de la luz, nitrógeno, fosfato, sustrato, sonido pueden alterar o mejorar el crecimiento y la producción de ácidos grasos de diversas microalgas ⁴². Algunas cepas de microalgas pueden acumular compuestos bioactivos funcionales como polifenoles con propiedades antioxidantes que pueden reducir las enfermedades crónicas causadas por el daño oxidativo a las células o moléculas celulares dentro de muchos más beneficios a nivel industrial, alimentario, biorremediación y ecológico. ¹⁸

H. pluvialis tiene un pigmento valioso que puede usarse como antioxidante, llamado astaxantina utilizado para la salud ocular, el sistema nervioso central, el sistema inmunológico, el antienviejamiento y la fertilidad.²⁰ Por otro lado, los carotenoides son pigmentos naturales con aplicaciones farmacéuticas y nutracéuticas la microalga *Dunaliella salina* acumula una gran cantidad de β -caroteno cuando se expone a diferente estrés ambiental como lo son las ondas sonoras incrementando la producción de biomasa y metabolitos secundarios³⁴.

La amplia demanda de combustibles fósiles como principal fuente de energía ha provocado la disminución de estas reservas además de la contaminación ambiental que genera todo el proceso de obtención. Las microalgas exhiben un gran potencial para ser utilizadas como materia prima para biorremediación y biocombustibles.

La cianobacteria *Synechococcus sp.* ha sido estudiada por ser capaz de producir varios productos de bioetanol y lípidos que podrían sintetizarse como biocombustible, los fotobiorreactores son usados para maximizar el crecimiento siendo las ondas sonoras un factor con capacidad promotora de crecimiento. La exposición a sonido aumenta la densidad celular y la producción de lípidos por lo cual es útil como estrategia para mejorar el sistema en condiciones de poca luz.³⁰

2.6 Música para las células.

Si bien inducir un efecto fisiológico en los seres biológicos a través del uso de sonido musical puede sonar como una idea novedosa se han sumado esfuerzos para comprender la relación que guarda el sonido y el cuerpo humano, pero en lo que respecta al mundo microscópico los estudios han ido emergiendo en los últimos años, lo que pone en evidencia una herramienta llamativa que requiere más investigación.

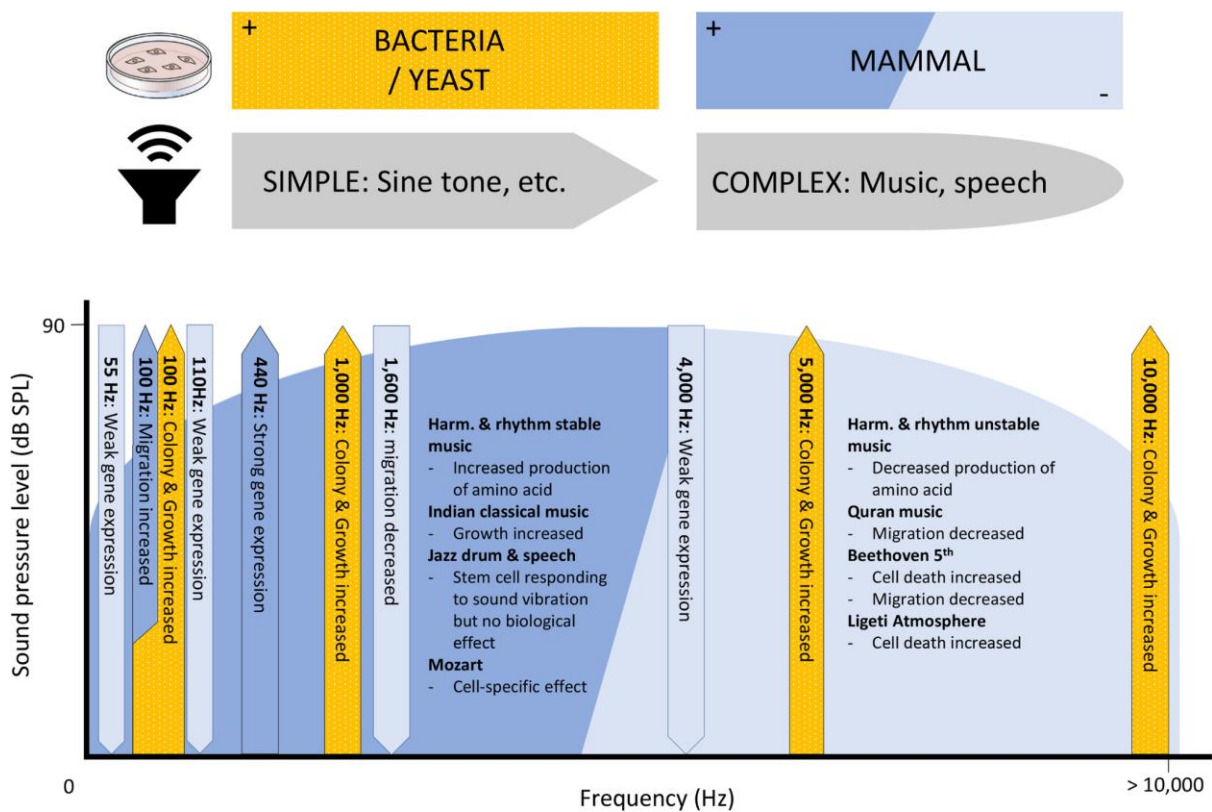


Figura 3. Esquema del efecto del sonido en bacterias y mamíferos según estudios. Tomado de: Kwak et al. Music for cells? A systematic review of studies investigating the effects of audible sound played through speaker-based systems on cell cultures, 2022.

La Fig. 3 brinda una vista a nivel general de la amplia gama de frecuencias de sonido (aproximadamente entre 20 y 10 000 Hz) con un nivel de sonido de alrededor de 90 dB evidenciando que bacterias y levaduras presentan diversos efectos a lo largo de frecuencias como 100, 300, 1000, 5000 y 10 000 Hz como aumento de la tasa de crecimiento y formación de colonias en contraste con las células de mamíferos las cuales se presentan más selectivas y dependientes de las frecuencias.⁴⁰

2.7 Música inspirada en la ecología microbiana.

Microbial Bebop es un método mediante el cual los datos ambientales microbianos se transforman en música generadas algorítmicamente dando como resultado piezas musicales como *Blues for Elle* una melodía compuesta ocho notas, cada una asignada a un parámetro físico ambiental como la temperatura, concentraciones de fosfato reactivo soluble, nitrato, nitrito, solución salina, silicato y clorofila A. Por otro lado, *Far and Wide* derivada de taxones como Cyanobacteria, Vibrionales, Opitutales, Pseudomonadales, Rhizobiales, Bacillales, Oceanospirallales, y Sphingomonadales.

Por último, Fifty Degrees North, Four Degrees West inspirada en especies microbianas del Orden *Rickettsiales*. Estas piezas musicales se han aplicado con resultados favorables en la producción de biomasa en microalgas como *H. pluvialis*²⁰ y cianobacterias *Synechococcus* HS-9²⁹.

2.8 Sonido audible y su relación con las bacterias

La respuesta al estrés ambiental es un mecanismo fisiológico importante que protege a las células y los organismos de los cambios estresantes en su entorno como el cambio de pH, temperatura, radiación, concentración de nutrientes y osmolaridad. En cuanto a la interacción entre el sonido audible y las células biológicas, este puede generar una tensión mecánica posiblemente causada por las alteraciones en la membrana y el movimiento del fluido interno celular viéndose afectada bajo la estimulación del sonido. Además, la estimulación del sonido produce cambios significativos en la estructura de la proteína de membrana siendo útiles para procesos relacionados con la actividad metabólica y modulación del tráfico de membranas³.

Por lo tanto, en condiciones de estrés osmótico el sonido audible desempeñaría un rol positivo aumentando la salida de agua mejorando el efecto inhibitor del estrés osmótico y el estrés salino como sucede con *E.coli*³.

2.9 Canales mecanosensibles.

Con respecto al mecanismo de cómo el sonido audible afecta el crecimiento y metabolismo microbiano, no se puede deducir con certeza. Sin embargo, se puede postular que las ondas de sonido mientras viajan a través del medio de crecimiento líquido dan lugar a vibraciones sónicas, que pueden ser detectadas por la población microbiana a través de sus receptores mecanosensoriales como lo postula Sarvaiya & Kothari¹³.

Después de esto, la población celular puede modular su comportamiento de acuerdo con la magnitud y duración de la vibración sónica. Los canales iónicos mecanosensibles pueden detectar el estrés, y su activación puede regularse mediante fuerza mecánica. Al detectar el estrés creado por las ondas sonoras, estos canales

mecanosensibles pueden indicar al organismo que genere una respuesta fisiológica adecuada. La apertura de tales canales puede ser promovida por la presencia de tensión en la membrana que a su vez puede afectar el movimiento de ciertos iones clave a través de la membrana celular, lo que en última instancia da como resultado un patrón alterado de crecimiento y metabolismo ¹².

En las bacterias, las proteínas de los canales mecanosensibles actúan como válvulas de seguridad contra el choque osmótico, y en los organismos superiores participan en la detección del tacto y las ondas sonoras ¹². Bajo condiciones fisiológicas en las células, los aumentos en la tensión de la membrana surgen de la entrada rápida de agua, que está asociada con la transición de la célula bacteriana de un ambiente de alta osmolaridad a un ambiente de baja osmolaridad, una condición conocida como shock hipoosmótico.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación.

Descriptivo no experimental de corte transversal, con alcances exploratorios y correlacionales, ya que comprende un tema que hasta la fecha es poco estudiado, abriendo campo a la investigación desde los ambientes académicos, proponiendo bases consolidadas para nuevos proyectos orientados hacia el tema de la influencia de la música en la producción de biomasa y cómo éste impacta de manera favorable bioprocesos industriales, alimentarios y ecológicos.

3.2 Universo, población y muestra

La presente investigación plantea como población al conjunto de artículos científicos consultados en diferentes bases de datos reconocidas, los cuales aparecen tras la

búsqueda inicial del concepto central de la investigación; dentro de la muestra se incluyen artículos científicos, nacionales e internacionales, indexados, que cumplan con los respectivos criterios de validez e inclusión, comprendidos entre los años 2007 y 2023.

3.3 Procedimiento

3.3.1 Búsqueda y revisión de información existente

Se realiza una búsqueda inicial de información general, ordenada de manera lógica y secuencial, que permite descomponer el tema central desde lo más básico y conceptual como son las generalidades del sonido hasta su relación con la producción de biomasa microbiana.

Para esto, fue necesario consultar bases de datos como Springerlink, PlosOne, Science Direct, Pubmed, ProQuest y Google académico, las cuales se encuentran disponibles en Internet, y tienen libre acceso gracias al convenio con la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. De manera adicional, y con el fin de ejecutar una búsqueda más integral, se utilizan las palabras clave como producción de biomasa, música, sonido audible, onda sonora, biomasa microbiana en las bases de datos anteriormente mencionadas, así como la inteligencia artificial científica Research Rabbit como se observa en la fig. 4 para una búsqueda más exhaustiva.

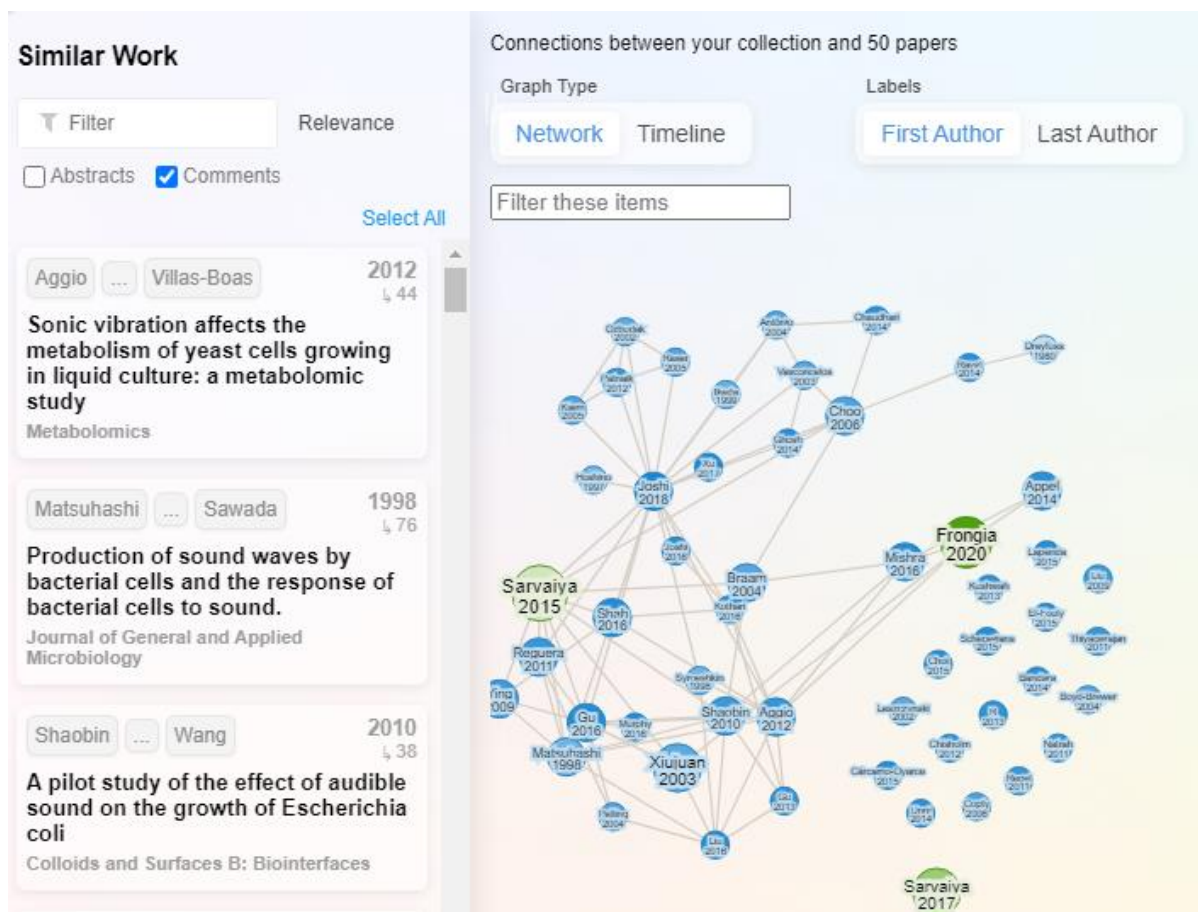


Figura 4. Resultados obtenidos en la IA Research Rabbit relacionados con el tema de investigación. Tomado de: Research Rabbit. IA: Inteligencia artificial

3.3.2 Clasificación de la información

Se seleccionaron referencias bibliográficas acordes al tema de investigación de manera ordenada como se puede observar en la fig. 5, realizando una discriminación por años con el fin de evidenciar la dinámica de estas publicaciones fig.6 teniendo en cuenta artículos preferiblemente en inglés con acceso a texto completo.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Información obtenida.

Una vez seleccionado el total de 44 referencias bibliográficas, siguiendo el diagrama de flujo descriptivo mostrado en la fig. 5, distribuidas en el rango de fechas de 2007 hasta 2023 como se observa en la fig. 6, se procedió a clasificar esta información

según el orden de presentación de los antecedentes y el marco referencial, así como los resultados, la discusión y las conclusiones. Se procede a establecer si la información encontrada en los artículos es pertinente y relevante para la investigación, teniendo en cuenta que responda a los objetivos planteados y que cumpla con los criterios de inclusión mencionados. De esta manera, los artículos permiten dar un completo desarrollo y orden a la presente revisión.

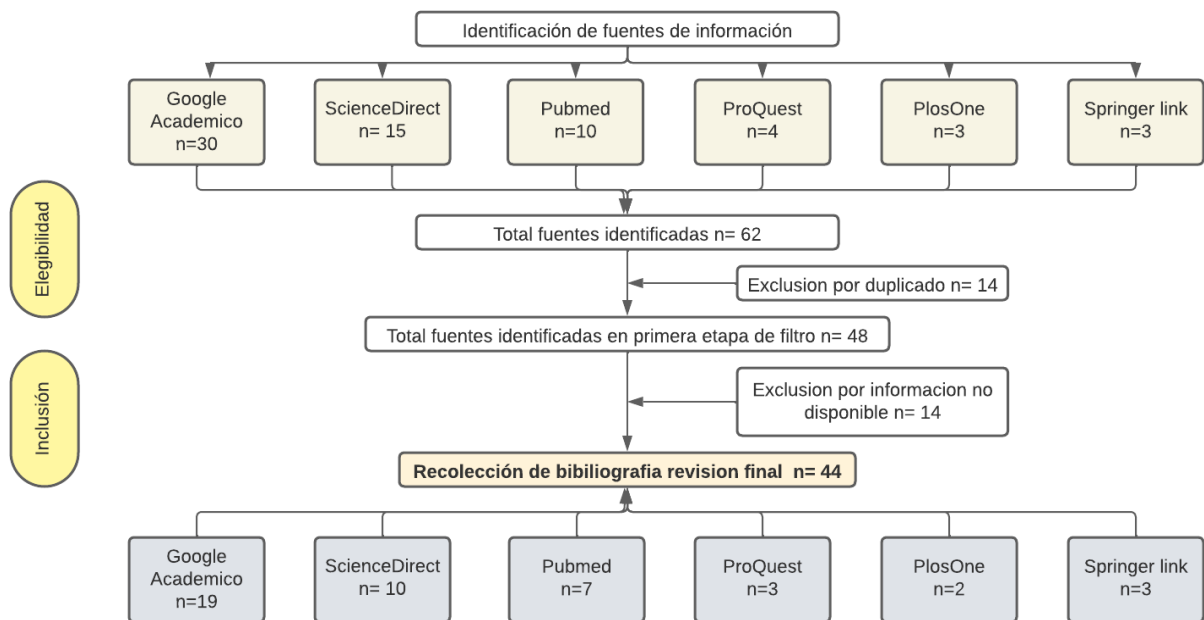


Figura 4. Diagrama de flujo descriptivo de las etapas de revisión bibliográfica para la obtención de información. Fuente: elaboración propia

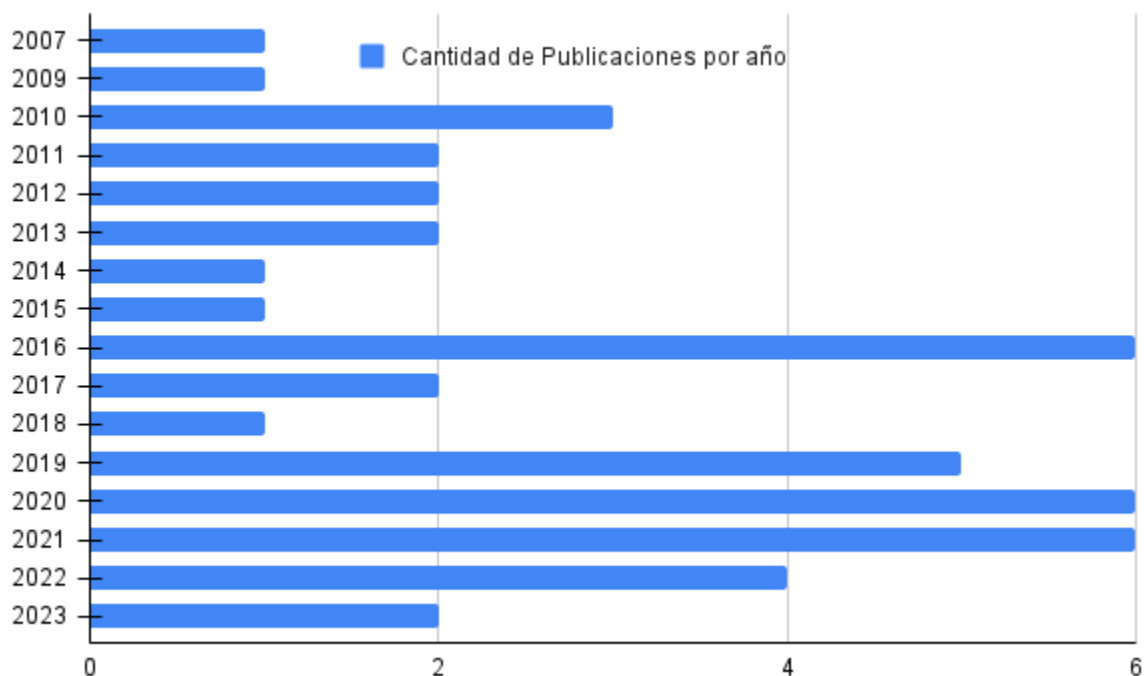


Figura 5. Cantidad de publicaciones usadas en la presente revisión discriminadas por año. Fuente: elaboración propia.

4.2 Música y producción de biomasa en bacterias.

Las bacterias como *E coli* sometidas a diferentes modelos de estimulación sonora evidencian de manera notable un aumento en la actividad enzimática ¹¹, en el caso de *E. coli k-12* se concluyó que la exposición al sonido puede promover la síntesis de la proteína intracelular total y el ARN, lo que favorece la división celular y la promoción del crecimiento ¹⁴.

Las bacterias son capaces de sentir la aceleración vibratoria y responder a ella. Se demostró que la aceleración vibratoria induce cambios en el crecimiento en respuesta al estímulo musical debido a factores como la alteración de la utilización del sustrato, alteración de la permeabilidad y selectividad de la membrana, mejora de la capacidad metabólica de la célula mediante la promoción de actividades enzimáticas, cambio en la capacidad de las células para sintetizar ARN y proteínas ²¹.

Tanto las bacterias Gram positivas como Gram negativas se ven influenciadas de manera significativa por el sonido audible aplicado en forma de música. La música

podría influir en el crecimiento microbiano, la producción de metabolitos importantes como la prodigiosina y violaceína y la susceptibilidad a los antibióticos. Diferentes organismos pueden responder al mismo sonido (con idéntica frecuencia e intensidad) de manera diferente. Para cada organismo, las frecuencias óptimas a las que produciría una respuesta de gran magnitud o una respuesta rápida pueden ser diferente, dependiendo del tipo y tamaño del organismo ¹³.

Música con una frecuencia más alta y una velocidad más rápida ha demostrado mejorar la motilidad de *E. coli* MG1655 como se observa en la fig 7., los datos mostraron que, entre 3 grupos de música, Highfast (329,68–4186 Hz) mejoró la motilidad en un $24 \pm 5\%$ y 139,6%. El impacto de la música en la formación de biofilm está relacionado con la motilidad de los microorganismos siendo ésta importante para lograr una mayor adherencia a la superficie en consecuencia la vibración musical podría interferir en el movimiento sobre estas. Sin embargo, este mecanismo requiere más investigación teniendo en cuenta factores claves de la vibración acústica que podrían potencialmente modular la motilidad de los microorganismos ³⁷.

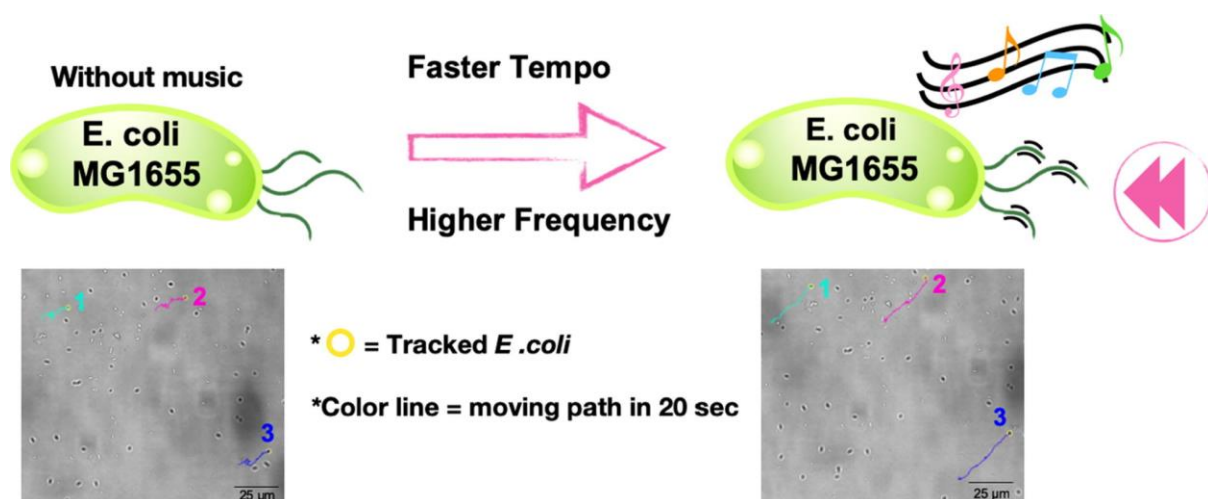


Figura 7. Efecto de la pieza musical Highfast en la motilidad de *E. coli*. Tomado de: Ku et al. In-situ monitoring the effect of acoustic vibration in the form of music on the motility of *Escherichia coli*, 2021. El proceso de tratamiento de aguas residuales por medio de bacterias aeróbicas estimuladas con piezas musicales ha evidenciado el aumento en la utilización de sustratos medidos en porcentaje de carbono orgánico total y demanda química de oxígeno lo que sugiere que la música podría ser utilizada como una herramienta para mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales ⁵.

Agregando a lo anterior, investigaciones relacionadas con otras bacterias como *C. violaceum* y *S.aureus* entre otras han demostrado que la música estimula producción de biomasa, pigmentos, crecimiento y susceptibilidad a cierto antibióticos a excepción de *S. marcescens* la cual sufrió una disminución en el crecimiento y la producción de pigmento (prodigiosina) debido al tratamiento con música, mientras que *C. violaceum* aumentó su producción de violaceina¹³. De la misma manera, se ha postulado la influencia de la energía acústica en las endosporas de *Bacillus* las cuales sufren cambios en la permeabilidad de la membrana aumentando actividades enzimáticas acelerando así el proceso de germinación siendo evidente en *B.atrophaeus* en comparación con *B. subtilis* posiblemente por la diferencia en relación al aspecto de sus esporas ¹⁶.

Bacterias con capacidad de patogenicidad como *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus* tienen la capacidad de formar biopelículas durante procesos infecciosos, heridas, catéteres o prótesis lo que les permite una mayor protección frente a antibióticos y modulan su virulencia. Se ha aplicado sonido con el fin de prevenir o detener la formación de biopelículas, es posible que la fuerza generada por la estimulación acústica active canales mecanosensibles dentro de las células bacterianas, lo que contribuye al aumento formación de biopelículas.¹⁷

Con relación al mecanismo de cómo el sonido audible afecta el metabolismo microbiano y el crecimiento, se puede postular que las ondas de sonido mientras viajan a través del medio de crecimiento dan lugar a vibraciones sónicas, que pueden ser detectadas por la población microbiana de prueba a través de sus receptores mecanosensoriales. Después de esto, la población celular puede modular su comportamiento de acuerdo con la magnitud y duración de la vibración sónica.¹⁵

Sumado a lo anterior, el uso de microorganismos solubilizadores de fosfatos (PSM) en suelos con una alta retención, promueve el crecimiento vegetal facilitando la disponibilidad de fósforo, la capacidad de cada microorganismo depende de diversos factores ambientales como lo es el sonido, el cual fue aplicado a PSM mediante piezas sonoras como Murottal Al-Qur'an teniendo como resultado un aumento de 23,08 % en la población total de microorganismos y una concentración de P disponible de 11.07% ³².

4.3 Música y producción de biomasa en microalgas.

El sonido audible tiene un efecto alto sobre la productividad de la microalga *H. pluvialis* siendo la pieza musical "Blues for Elle" como se observa en las fig 8 la causante de cambios en fluorescencia de la clorofila, así como el contenido de clorofila y la tasa fotosintética neta debido a esto las células de esta microalga se dividen rápidamente y mejoran la productividad de la biomasa ²⁰.

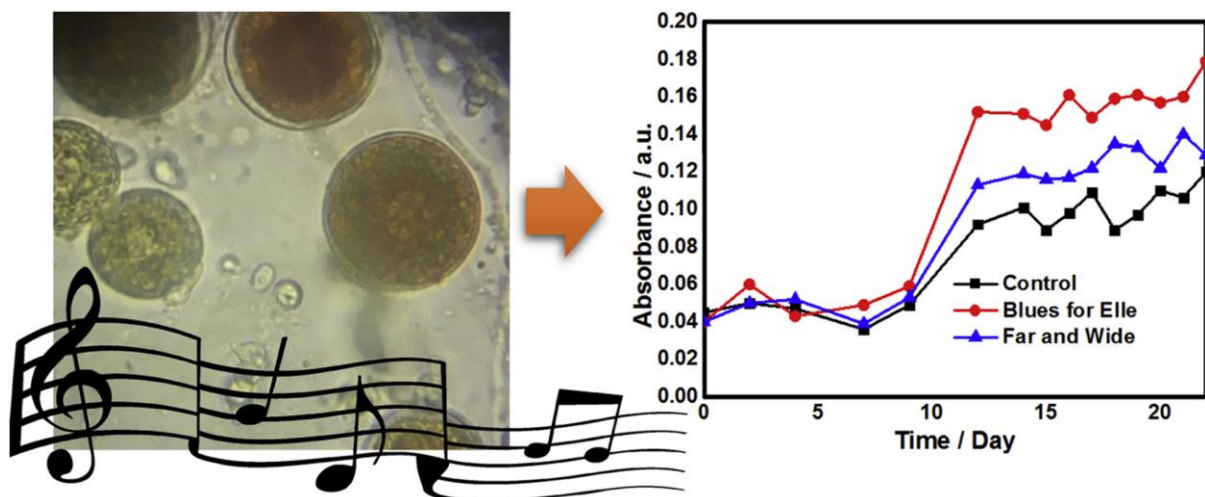


Figura 8. Estimulación de *H. pluvialis* con "Blues for Elle" y "Far and Wide" música creada para estimular la fotosíntesis. Tomado de: Christwardana & Hadiyanto. The effects of audible sound for enhancing the growth rate of microalgae *Haematococcus pluvialis* in vegetative stage, 2017.

El sonido audible en forma de música aumenta la densidad celular de *Synechococcus HS-9* la cual es necesaria para la producción de biocombustible, una alternativa de producir biomasa de algas en poco tiempo es mediante el uso de fotobiorreactor el cual proporciona condiciones óptimas, la combinación entre los medios de crecimiento y el factor abiótico optimiza el crecimiento de la biomasa de microalgas, mientras que el factor de estrés potencializa la acumulación de lípidos dentro de las células de las microalgas ²⁹.

Las piezas musicales "Blues for Elle" y "Far and Wide" aumentaron la densidad celular de *Synechococcus HS-9* en un 64,4% y 58,3% respectivamente. Cuando la célula de microalgas se expone con ondas de sonido, estimula la membrana mecanosensible aumentando la tensión lo que conduce al aumento de la tasa de transporte de iones

y moléculas entre las membranas celulares generando una regulación celular más rápida, lo que podría aumentar la tasa de replicación de la célula y conduce al aumento de la densidad celular de las microalgas ²⁹.

4.4 Música y producción de biomasa en levaduras.

En múltiples estudios se ha demostrado que exponer la levadura *S. cerevisiae* a sonido audible afecta el rendimiento incrementando la tasa de crecimiento durante la fase exponencial de fermentación lo que conlleva a la producción de ciertos compuestos orgánicos volátiles (COV) directamente relacionados con el sabor y aroma. La demanda de cerveza con sabores distintivos y un perfil sensorial novedoso incluye COV como alcoholes superiores, ésteres 'afrutados', dicetonas vecinales y compuestos de azufre. Como la producción de COV se encuentra relacionada con el crecimiento y el estado fisiológico de la levadura, los factores que afectan el metabolismo y la fisiología de la levadura pueden afectar las características sensoriales como se observa en la figura 9. ³⁵⁻³⁶.

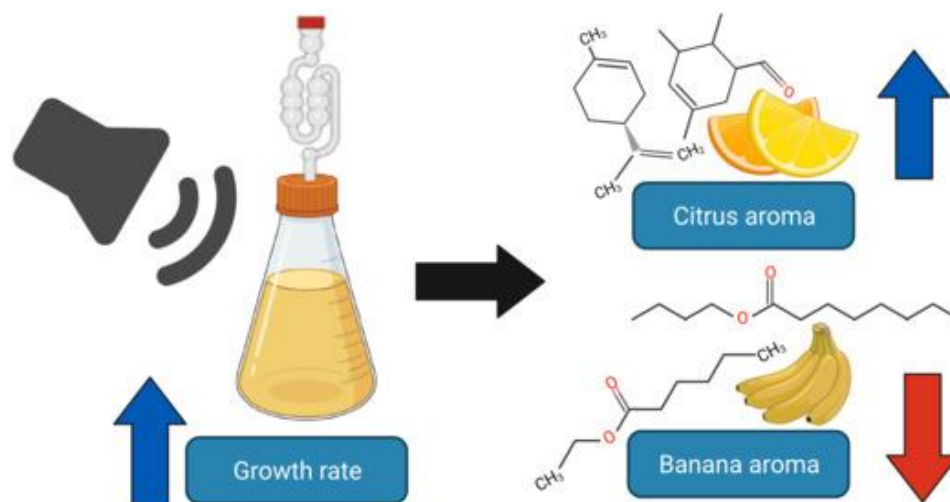


Figura 9. Estimulación sonora en *S. cerevisiae* para la obtención de compuestos volátiles. Tomado de: Harris et al. Sound stimulation can affect *Saccharomyces cerevisiae* growth and production of volatile metabolites in liquid medium, 2021.

4.5 La música y su efecto sobre moléculas biológicas.

La L-DOPA es el fármaco de mayor preferencia usado en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, mediante dos piezas musicales denominadas

“Reminiscenza” y “Pioggia” se evaluó la actividad de la tirosinasa obteniendo como resultado un aumento de la actividad específica alrededor de un 30%, las frecuencias sonoras proporcionan energía a la enzima y determinan un cambio conformacional en su estructura. Este fenómeno hace que los sitios activos de la enzima sean más accesibles para el sustrato. La compleja totalidad de las piezas influyó de manera significativa en la actividad enzimática, las frecuencias del sonido estimulan el sistema biológico en el tiempo ejerciendo una acción positiva o negativa dependiendo del ritmo y la frecuencia²³.

El mundo se encuentra inmerso en un sin fin de sonidos siendo este un factor físico medioambiental el cual sin duda genera un estímulo en los seres vivos en procesos como el crecimiento y el metabolismo. Sin embargo, son muy pocos los estudios que se han dedicado a explicar la relación de las ondas sonoras audibles y los microorganismos, aunque muchos fenómenos apoyan la premisa de que los microorganismos reconocen y responden al sonido audible y la música como se puede evidenciar en la tabla 1.

Tabla 1. Efecto del sonido audible y la música en diferentes microorganismos.

Frecuencia Hz / Pieza musical	Microorganismo	Resultado	Autores
tono sinusoidal 1000,5000, 1000Hz	<i>Escherichia coli</i>	En condiciones normales, la formación de colonias aumentó. Mayor eficiencia de formación de colonias con NaCl al 3%.	Shaobin et al., 2010
"Holy Wars and punishment due de Megadeth, "Farewell" de Apocalyptica, "Oh La Nor my love." de Tchaikovsky, "Ruk" de Sek	Microorganismos aerobios	Efecto significativo en la utilización de sustratos microbianos % carbono orgánico total y demanda química de oxígeno	Suppajee & Monthon, 2010

Loso y "Four Seasons" de Vivaldi			
7- 10.000 Hz tono sinusoidal	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Impacto en el metabolismo celular y las respuestas fisiológicas. Aumento del 12% en la tasa de crecimiento.	Aggio et al., 2012
400 Hz	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Aumento del 12-30% en la tasa de crecimiento.	Jiang et al., 2012
5000 Hz	<i>Escherichia coli</i>	Promoción del crecimiento, cambios en las actividades de la superóxido dismutasa y la catalasa	Gu et al., 2013
Indian classical music (Raag Kirwani) 38–689 Hz	<i>Chromobacterium violaceum</i>	Aumento considerable del crecimiento y la producción de pigmentos (violaceína) aumento en la susceptibilidad a antibióticos (estreptomocina) 9,32%	Sarvaiya & Kothari, 2015
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Aumento de crecimiento 3.15% y producción de alcohol mayor a 15%, aumento en la susceptibilidad a antibióticos (anfotericina B) de un 3.81%	
	<i>Staphylococcus aureus</i>	Mayor crecimiento y aumento en la susceptibilidad a antibióticos (estreptomocina) 15,21 %	
	<i>Streptococcus pyogenes</i>	Mayor crecimiento y aumento en la susceptibilidad a antibióticos (estreptomocina) 18,69%	
2200 Hz	<i>Picochlorum oklahomensis</i>	Aumento de la producción de biomasa algal y rendimiento volumétrico de aceite.	Cai et al., 2016

Ahir Bhairav (172-581 Hz) y Pilloo (86-839 Hz)	<i>Lactobacillus plantarum</i>	Aumento del crecimiento del 3-6%.	Shah et al., 2016
	<i>Xanthomonas campestris</i>	7 -9% de aumento en el crecimiento. 28 -32 aumento en la producción de polisacárido extracelular.	
	<i>Chromobacterium violaceum</i>	Disminución del 24% en el crecimiento. Disminución del 40% en la producción de violaceína	
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Aumento del crecimiento del 4-9%. Aumento del 10-12% en la producción de alcohol.	
2000-8000 Hz	<i>E.coli k-12</i>	Aumento del crecimiento y producción de biomasa	Gu et al.,2016
5000 Hz	<i>B. atrophaeus</i>	Promovió la velocidad de germinación en un 43,7% ± 11,3% y el nivel de germinación final en un 61,7% ± 11,9%	Liu et al.,2016
1600 Hz	<i>Staphylococcus aureus</i>	Mayor formación de biopelículas	Murphy et al.,2016
800 Hz	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>		
500-600 Hz	<i>S. marcescens</i>	Aumentar la producción de prodigiosina en un 18,93% y un 7,19%, respectivamente	Kothari et al.,2016
"Blues for Elle" 280 Hz	<i>H. pluvialis</i>	Mayor producción de biomasa	Christwardan a & Hadiyanto, 2017
	<i>Chromobacterium violaceum</i>	Aumento del 9% en el crecimiento. Aumento del 90% en la producción de violaceína.	
	<i>Staphylococcus aureus</i>	Aumento del crecimiento	

Música clásica india (Raag Malhar), 41 a 645 Hz	<i>Streptococcus pyogenes</i>	15% de aumento en el crecimiento.	Kothari et al., 2017
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Aumento del 4% en el crecimiento. Aumento de la tolerancia al alcohol.	
	<i>Candida albicans</i>	13% de aumento en el crecimiento.	
	<i>Xanthomonas campestris</i>	Aumento del 9% en el crecimiento. Aumento del 40% en la producción de polisacárido extracelular.	
300 Hz	<i>Chromobacterium violaceum</i>	Crecimiento celular en un 15,02% la producción de pigmentos regulados por QS aumentó un 59,63%	Kothari et al.,2018
Composición musical original (Reminiscenza)	Moléculas biológicas (tirosinasa)	Aumento de la producción en un 30%	Algieri et al., 2018
Música indostaní 600-1000Hz	<i>Brevibacterium sp.</i>	La biomasa aumentó tres veces, mayor crecimiento y producción de pigmentos	Chandra et al.,2018
200 Hz	<i>Dunaliella salina</i>	Aumentar efectivamente la concentración de biomasa y la división celular tanto en condiciones óptimas como en deficiencia de nitrato	Keramati et al.,2021
Musica Clasica (Midslow, Midfast, Highfast)	<i>E. coli MG1655</i>	Highfast (329,68–4186 Hz) mejoró más la motilidad, 24 ± 5% y 139,6%	Ku et al.,2021

Hz: hercios, frecuencia del sonido. Sonido audible 20 - 20000 Hz. Fuente: elaboración propia.

Para comprender cómo el sonido afecta a los microorganismos es necesario comprender las vías, los cambios celulares y otros mecanismos subyacentes que impulsan una respuesta microbiana. Sin embargo, debido a la complejidad del sonido,

estos mecanismos podrían ser extremadamente diversos y, como tal, se requiere un organismo modelo bien caracterizado ³⁶.

La comunidad científica ha prestado poca atención al impacto intrínseco de los sonidos audibles en el metabolismo celular. Si bien las interacciones biológicas de las vibraciones sónicas y ultrasónicas parecen haberse explorado desde 1900, desde la década de 1920 el trabajo se ha centrado casi exclusivamente en los ultrasonidos ⁷ dejando de lado sonidos como la música que ha generado efectos moduladores en seres humanos, animales, plantas y como lo hemos resaltado en esta revisión también, en microorganismos sin órganos específicos dedicados a la audición como bacterias, algas y levaduras, las cuales por medio de canales mecanosensoriales traducen estas señales físicas en estimulación para la producción de biomasa, metabolitos, biodiesel, aumento del crecimiento y en algunos casos susceptibilidad a antibióticos.

El sonido se presenta como una herramienta novedosa para potencializar procesos en áreas industriales, de alimentos, biorremediación, fermentación y servicios relacionados con la salud; comprender cómo la estimulación sónica hace que el cultivo bacteriano alcance una densidad celular mayor o menor puede enriquecer el conocimiento sobre el comportamiento de respuesta al estrés de las poblaciones bacterianas. Si se logra llegar a una etapa donde se conozca como una especie microbiana responde a una estimulación sónica dentro de su huésped esto supondría a largo plazo el uso de ondas sónicas en implicaciones terapéuticas ¹⁹.

La comprensión de la base molecular de las respuestas metabólicas y fisiológicas de las células microbianas estimuladas por sonido puede permitir una manipulación eficaz del metabolismo celular y la proliferación en los fermentadores ¹³. En el mundo de la industria cervecera la innovación es fundamental, por lo cual la búsqueda de alternativas de procesamiento que generen un producto diferente hace parte de la labor de múltiples investigaciones, se ha logrado concluir que el sonido ubicado dentro de la frecuencia audible genera en *S. cerevisiae* un efecto muy interesante ya que estimula la tasa de crecimiento y la producción de compuestos volátiles que le confieren a la cerveza aromas y sabores auténticos, siendo este estímulo físico una opción rentable para el mejoramiento del producto. Sin embargo, es necesario

estandarizar los sistemas de aplicación de sonido audible para determinar el impacto en los cultivos y obtener una comprensión integral ⁴³.

4. CONCLUSIONES

€ El sonido puede interactuar con las células biológicas siendo una señal física con potencial para la comunicación entre estas, las células perciben y responden al sonido dependiendo la frecuencia, amplitud e intensidades de carácter variable, siendo un escenario innovador. Aunque se ha iniciado la investigación en este campo y han aparecido informes que describen el efecto del sonido audible, queda mucho por investigar. En gran medida, el estudio sobre el sonido audible ha girado en torno a cómo se produce, absorbe, refleja y transmite, sin embargo, no se ha prestado mucha atención a los efectos biológicos inducidos y los mecanismos subyacentes. Comprender que diferentes exposiciones al sonido inducen variaciones entre especies en el crecimiento, la biomasa y la síntesis de moléculas intracelulares podría tener implicaciones importantes para muchos procesos ecológicos, industriales y de biorremediación. Con base en lo mencionado anteriormente comprender las interacciones entre el sonido y los microorganismos brinda conocimiento acerca de cómo cada ser vivo adapta sus mecanismos frente a la percepción de estímulos externos y cómo estos influyen en procesos internos.

∄ Para concluir se logró relacionar el estímulo musical con la producción de biomasa en microorganismos como las bacterias que expusieron un mayor crecimiento y producción de metabolitos como pigmentos, además de ampliar su capacidad de susceptibilidad a antibióticos siendo muy importante en aspectos industriales y farmacéuticos, en adición a lo anterior las bacterias también actuaron en procesos de biorremediación de aguas residuales y producción de biofilm, en relación con las levaduras estos organismos presentaron un índice alto de estimulación evidenciando en cada investigación un aumento en la productividad, lo que representa una oportunidad para el mejoramiento y rendimiento de productos como la cerveza, así como otros que involucren procesos fermentativos, para finalizar las microalgas desempeñan un papel fundamental en la producción de biodiesel y compuestos con características alimenticias y farmacéuticas atribuyéndoles grandes beneficios para el ser humano y el medio ambiente, de todos los microorganismos estos fueron los que expresaron una mayor estimulación en producción de biomasa de manera directa en asociación a otros factores físicos, en fotobiorreactores potencializando procesos de obtención a gran escala de biomasa algal. Esta revisión brinda un panorama prometedor para el estudio interdisciplinario de la acústica y la microbiología con el fin de innovar y generar procesos que involucren alternativas que se adapten a las problemáticas actuales y respondan a las necesidades de las diferentes áreas de aplicación de estos microorganismos.

- El mecanismo mediante el cual la música influye en la producción de biomasa se relaciona con los canales iónicos mecanosensibles, cuando una célula experimenta estrés estos canales le indican al microorganismo una respuesta fisiológica, siendo posible que el estrés mecánico creado por el sonido pueda desencadenar la expresión de genes de respuesta. En la literatura se ha documentado la capacidad para producir, sentir y responder al sonido, es decir puede actuar como una estructura microscópica capaz de transmitir y responder a las vibraciones creadas por este, también pueden utilizar el sonido

como señal física para la comunicación entre células, este tipo de comunicación acústica ofrece ventajas al ser más rápida, incluso entre células que no están en proximidad física directa, actuando como señal reguladora del crecimiento. Los microorganismos estimulados por el sonido pueden cambiar a modos vibratorios colectivos que podrían integrar la actividad enzimática y la expresión génica.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Booth IR, Edwards MD, Black S, Schumann U, Miller S. Mechanosensitive channels in bacteria: signs of closure? *Nat Rev Microbiol* [Internet]. 2007 [cited 22 Jul 2023];5(6):431–40. Available in: <http://www.columbia.edu/cu/biology/dept/seminarPDFfiles/NRMicro%20Final%20Pdf-Booth.pdf>
2. Rokhina EV, Lens P, Virkutyte J. Low-frequency ultrasound in biotechnology: state of the art. *Trends Biotechnol* [Internet]. 2009 [cited 15 Jun 2023];27(5):298–306. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779909000493>
3. Shaobin G, Wu Y, Li K, Li S, Ma S, Wang Q, et al. A pilot study of the effect of audible sound on the growth of *Escherichia coli*. *Colloids Surf B Biointerfaces* [Internet]. 2010 [cited 16 Jun 2023];78(2):367–71. Available in: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776510001165>

4. Koelsch S, Offermanns K, Franzke P. Music in the treatment of affective disorders: An exploratory investigation of a new method for music-therapeutic research. *Music Percept* [Internet]. 2010 [cited 22 Jul 2023];27(4):307–16. Available in: <http://dx.doi.org/10.1525/mp.2010.27.4.307>
5. Suppajee P, Monthon T. Effects of Music on Microbial Substrate Utilization of Aerobic Bacteria from Municipal Wastewater Treatment Plant PART II: Comparative effects of Musical Characteristics. *Journal of Research in Engineering and Technology (Thailand)* [Internet]. 2010 [cited 23 Jul 2023];7(2):41–8. Available in: https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/BKN/search_detail/result/198410
6. Reguera G. When microbial conversations get physical. *Trends Microbiol* [Internet]. 2011 [cited 18 Jun 2023];19(3):105–13. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tim.2010.12.007>
7. Aggio RBM, Obolonkin V, Villas-Bôas SG. Sonic vibration affects the metabolism of yeast cells growing in liquid culture: a metabolomic study. *Metabolomics* [Internet]. 2012 [cited 18 Jun 2023];8(4):670–8. Available in: <http://dx.doi.org/10.1007/s11306-011-0360-x>
8. Rutherford ST, Bassler BL. Bacterial quorum sensing: Its role in virulence and possibilities for its control. *Cold Spring Harb Perspect Med* [Internet]. 2012 [cited 20 Jun 2023];2(11): a012427–a012427. Available in: <http://dx.doi.org/10.1101/cshperspect.a012427>
9. Larsen P, Gilbert J. Microbial bebop: creating music from complex dynamics in microbial ecology. *PLoS One* [Internet]. 2013 [cited 28 Jul 2023];8(3):e58119. Available in: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0058119>
10. Jiang S, Rao H, Chen Z, Liang M, Li L. Effects of Sonic Waves at Different Frequencies on Propagation of *Chlorella pyrenoidosa*. *Agricultural Science & Technology* [Internet]. 2012 [cited 20 Jun 2023];13(10):2197-2201. Available in: <https://www.proquest.com/docview/1357067123/30E5E377D1554A42PQ/1?accountid=50438#>

- 11.** Gu S-B, Yang B, Wu Y, Li S-C, Liu W, Duan X-F, et al. Growth and physiological characteristics of *E. coli* in response to the exposure of sound field. Pak J Biol Sci [Internet]. 2013 [cited 17 Jun 2023];16(18):969–75. Available in: <http://dx.doi.org/10.3923/pjbs.2013.969.975>
- 12.** Ward R, Pliotas C, Branigan E, Hacker C, Rasmussen A, Hagelueken G, et al. Probing the structure of the mechanosensitive channel of small conductance in lipid bilayers with pulsed electron-electron double resonance. Biophys J [Internet]. 2014 [cited 28 Jul 2023];106(4):834–42. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2014.01.008>
- 13.** Sarvaiya N, Kothari V. Effect of audible sound in form of music on microbial growth and production of certain important metabolites. Microbiology [Internet]. 2015 [cited 18 Jun 2023];84(2):227–35. Available in: <http://dx.doi.org/10.1134/s0026261715020125>
- 14.** Gu S, Zhang Y, Wu Y. Effects of sound exposure on the growth and intracellular macromolecular synthesis of *E. coli* k-12. PeerJ [Internet]. 2016 [cited 18 Jun 2023];4(e1920): e1920. Available in: <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.1920>
- 15.** Shah A, Raval A, Kothari V. Sound stimulation can influence microbial growth and production of certain key metabolites. J Microbiol Biotechnol Food Sci [Internet]. 2016 [cited 6 Jun 2023];5(4):330–4. Available in: <http://dx.doi.org/10.15414/jmbfs.2016.5.4.330-334>
- 16.** Liu SL, Wu WJ, Yung PT. Effect of sonic stimulation on Bacillus endospore germination. FEMS Microbiol Lett [Internet]. 2016 [cited 20 Jun 2023];363(1): fnv217. Available in: <http://dx.doi.org/10.1093/femsle/fnv217>
- 17.** Murphy MF, Edwards T, Hobbs G, Shepherd J, Bezombes F. Acoustic vibration can enhance bacterial biofilm formation. J Biosci Bioeng [Internet]. 2016 [cited 16 Jul 2023];122(6):765–70. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiosc.2016.05.010>

- 18.** Cai W, Dunford NT, Wang N, Zhu S, He H. Audible sound treatment of the microalgae *Picochlorum oklahomensis* for enhancing biomass productivity. *Bioresour Technol* [Internet]. 2016 [cited 21 Jun 2023]; 202:226–30. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.019>
- 19.** Kothari V, Patel P, Joshi C, Mishra B, Dubey S, Mehta M. Quorum sensing modulatory effect of sound stimulation on *Serratia marcescens* and *Pseudomonas aeruginosa* [Internet]. bioRxiv. 2016 [cited 20 Jul 2023]. Available in: <http://dx.doi.org/10.1101/072850>
- 20.** Christwardana M, Hadiyanto H. The effects of audible sound for enhancing the growth rate of microalgae *Haematococcus pluvialis* in vegetative stage. *Hayati* [Internet]. 2017 [cited 18 Jun 2023];24(3):149–55. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hjb.2017.08.009>
- 21.** Kothari V. Audible sound in form of music can influence microbial growth, metabolism and antibiotic susceptibility. *J Appl Biotechnol Bioeng* [Internet]. 2017 [cited 18 Jun 2023];2(6). Available in: <http://dx.doi.org/10.15406/jabb.2017.02.00048>
- 22.** Kothari V, Joshi C, Patel P, Mehta M, Dubey S, Mishra B, et al. Influence of a Mono-Frequency Sound on Bacteria can be a Function of the Sound-Level. *Indian J Sci Technol* [Internet]. 2018 [cited 20 Jun 2023];11(4):1–9. Available in: <http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i4/111366>
- 23.** Algieri C, Guarnaccia C, Barone V, Gullo MR, Donato L. Effects of music playing on biological molecules. *MATEC Web Conf* [Internet]. 2018 [cited 16 Jun 2023]; 210:05006. Available in: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/69/mateconf_csc2018_05006/matecconf_csc2018_05006.html
- 24.** Banerjee S, Goswami A, Datta A, Pyne A, Nikhat A, Ghosh B. Effect of different sound frequencies on the growth and antibiotic susceptibility of *Escherichia*

coli. Int J Curr Microbiol Appl Sci [Internet]. 2018 [cited 20 Jun 2023];7(03):1931–9. Available in: <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2018.703.229>

25. Chandra TS, Lekha VS, Krishna TM. Effect of music on growth and pigment production of *Brevibacterium sp.* Int. J. Pharm. Chem. Biol. Sci. 2018 [cited 20 Jun 2023]; 8:157–160. Available in: https://www.researchgate.net/profile/Sharath-Chandra-4/publication/332413421_EFFECT_OF_MUSIC_ON_GROWTH_AND_PIGMENT_PRODUCTION_OF_BREVIBACTERIUM_SPECIES/links/5cb3ff9e299bf12097665962/EFFECT-OF-MUSIC-ON-GROWTH-AND-PIGMENT-PRODUCTION-OF-BREVIBACTERIUM-SPECIES.pdf

26. Liu W-S, Yang C-Y, Fang TJ. Strategic ultrasound-induced stress response of lactic acid bacteria on enhancement of β -glucosidase activity for bioconversion of isoflavones in soymilk. J Microbiol Methods [Internet]. 2018 [cited 28 Jul 2023];148:145–50. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mimet.2018.04.006>

27. Pagnossa JP, Rocchetti G, Ribeiro AC, Piccoli RH, Lucini L. Ultrasound: beneficial biotechnological aspects on microorganisms-mediated processes. Curr Opin Food Sci [Internet]. 2020 [cited 20 Jun 2023]; 31:24–30. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cofs.2019.10.006>

28. Speranza B, Campaniello D, Altieri C, Sinigaglia M, Bevilacqua A, Corbo MR. Ultrasonic modulation of the technological and functional properties of yeast strains. Microorganisms [Internet]. 2020 [cited 25 Jul 2023];8(9):1399. Available in: <http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms8091399>

29. Santoso, Y. A., Tambunan, R. M. N., Soekirno, S., Nasruddin, N., & Prihantini, N. B. Cultivation of *synechococcus HS-9* (cyanobacteria) isolated from Rawa Danau Banten hot spring using audible sound (music) as a strategy for improving photobioreactor [Internet]. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2255, No. 1). AIP Publishing. 2020 [cited 16 Jun 2023]. Available in: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2255/1/030013/1026516/Cultivation-of-Synechococcus-HS-9-cyanobacteria>

- 30.** Santoso YA, Tambunan RMN, Soekirno S, Nasruddin N, Prihantini NB. Sound wave exposure as a strategy for improving the tubular photobioreactor for cultivating *Synechococcus HS-9* as biofuel feedstock under different photoperiods. *IJTech* [Internet]. 2020 [cited 16 Jun 2023];11(7):1406. Available in: <https://ijtech.eng.ui.ac.id/article/view/4459>
- 31.** Frongia F, Forti L, Arru L. Sound perception and its effects in plants and algae. *Plant Signal Behav* [Internet]. 2020 [cited 21 Jun 2023];15(12):1828674. Available in: <http://dx.doi.org/10.1080/15592324.2020.1828674>
- 32.** Munar A, Sembiring M, Tantawi AR, Sabrina T. Effect of sound treatment on phosphate solubilizing microbial activity. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* [Internet]. 2020 [cited 4 Jul 2023];454(1):012145. Available in: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/454/1/012145>
- 33.** Robinson JM, Cameron R, Parker B. The effects of anthropogenic sound and artificial light exposure on microbiomes: Ecological and public health implications. *Front Ecol Evol* [Internet]. 2021 [cited 27 Jul 2023];9. Available in: <http://dx.doi.org/10.3389/fevo.2021.662588>
- 34.** Keramati A, Pajoum Shariati F, Tavakoli O, Akbari Z, Rezaei M. The effect of audible sound frequency on the growth and beta-carotene production of *Dunaliella salina*. *S Afr J Bot* [Internet]. 2021 [cited 28 Jul 2023]; 141:373–82. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.026>
- 35.** Adadi P, Harris A, Bremer P, Silcock P, Ganley ARD, Jeffs AG, et al. The effect of sound frequency and intensity on yeast growth, fermentation performance and volatile composition of beer. *Molecules* [Internet]. 2021 [cited 17 Jun 2023];26(23):7239. Available in: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26237239>
- 36.** Harris A, Lindsay MA, Ganley ARD, Jeffs A, Villas-Boas SG. Sound stimulation can affect *Saccharomyces cerevisiae* growth and production of volatile metabolites

in liquid medium. *Metabolites* [Internet]. 2021 [cited 17 de Jun 2023];11(9):605. Available in: <http://dx.doi.org/10.3390/metabo11090605>

37. Ku H-N, Lin W-F, Peng H-L, Yew T-R. In-situ monitoring the effect of acoustic vibration in the form of music on the motility of *Escherichia coli*. *Appl Acoust* [Internet]. 2021 [cited 18 Jun 2023];172(107620):107620. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107620>

38. Jun Vergara S. ¿Qué es el Sonido?, sus cualidades - Artículos Marcatto [Internet]. The House Records. 2021 [citado 23 de Julio 2023]. Disponible en: <https://thehousethehouse.com/que-es-el-sonido-sus-cualidades/>

39. Han S-I, Jeon MS, Ahn J-W, Choi Y-E. Establishment of ultrasonic stimulation to enhance growth of *Haematococcus lacustris*. *Bioresour Technol* [Internet]. 2022 [cited 18 Jun 2023];360(127525):127525. Available in: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127525>

40. Kwak D, Combriat T, Wang C, Scholz H, Danielsen A, Jensenius AR. Music for cells? A systematic review of studies investigating the effects of audible sound played through speaker-based systems on cell cultures. *Music Sci* [Internet]. 2022 [cited 16 Jun 2023]; 5:205920432210809. Available in: <http://dx.doi.org/10.1177/20592043221080965>

41. Dinesh Kumar S, Nanthini Devi K, Krishnaveni N, Santhanam P, Perumal P, Aravinth A. Stimulator matters: an overview on stimulants used in microalgal culture for the growth and fatty acid enhancement. *Biomass Convers Biorefin* [Internet]. 2022 [cited 18 Jun 2023]; Available in: <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-022-03033-8>

42. Jauset JA. Jordi A. Jauset, divulgador científico [Internet]. jordijauset.es. [citado 21 de Julio de 2023]. Disponible en: <https://www.jordijauset.es/las-vibraciones-acusticas-afectan-a-los-cultivos-celulares/>

43. Benitez R, Harris A, Mansfield E, Silcock P, Eyres G, Villas-Bôas SG, et al. Direct liquid transmission of sound has little impact on fermentation performance in

Saccharomyces cerevisiae. PLoS One [Internet]. 2023 [cited 4 Jul 2023];18(2): e0281762. Available in: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0281762>

44. Park YH, Park J, Choi JS, Kim HS, Choi JS, Choi Y-E. Ultrasonic Treatment Enhanced Astaxanthin Production of *Haematococcus pluvialis*. J Microbiol [Internet]. 2023 [cited 28 Jul 2023];61(6):633–9. Available in: <http://dx.doi.org/10.1007/s12275-023-00053-5>