



***“AVANCES EN BIOPROSPECCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS
ANTÁRTICOS EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS, UNA ALTERNATIVA PARA LA
CIENCIA.”***

UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD

PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO

INFORME FINAL

BOGOTÁ D.C., AGOSTO 2024



***“AVANCES EN BIOPROSPECCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS
ANTÁRTICOS EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS, UNA ALTERNATIVA PARA LA
CIENCIA.”***

Elaborado por:

**LAURA VALENTINA GUTIERREZ PINILLA
MARIA WUIDEE DOQUERESANA ORTEGA**

Asesora interna:

LIGIA CONSUELO SANCHEZ LEAL M.Sc.

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD**

PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO

INFORME FINAL, BOGOTÁ D.C., AGOSTO 2024

DEDICATORIA

Todo es posible, incluso cuando el trayecto parece desafiante. Siempre habrá una luz que guíe su camino y les impulse a alcanzar sus metas. A nuestros amigos en especial a Daniela, entre otros compañeros y conocidos que han brindado su apoyo constante, que han sido una fuente de ánimo y afecto a lo largo de este viaje, junto a nuestra asesora de grado, Consuelo Sánchez.

Especialmente dedicado a mi familia. A Isabel, mi madre, agradezco su presencia constante llena de amor y apoyo incondicional en mi vida. Toda tu asistencia en cada paso, tu aliento incesante y tu habilidad para motivarme a no desistir han sido vitales para continuar avanzando en mi carrera. A mis hermanos Joseph y Yuber les agradezco su paciencia y generosidad al guiarme en momentos de confusión, dándome la fuerza y el ánimo necesario para seguir adelante. Agradezco a mis queridos tíos Nancy, Misael y Carlos por su inagotable respaldo y por su constante estímulo para que pueda alcanzar la mejor versión de mí mismo, para brindar lo mejor de mí en cada etapa de este recorrido. Junto a Mia, mi leal gata, he contado con la presencia constante y reconfortante en las interminables noches de desvelo, momentos de tensión y épocas de melancolía.

Maria

Dedico especialmente este trabajo a Dios, quien ha sido mi fuente constante de guía y fortaleza durante todo este proceso. Gracias a mi familia, en particular a mi mamá Gladys, por su amor y apoyo incondicional, sin ella no hubiera podido lograr este objetivo. Su dedicación y arduo trabajo diario que me mantiene adelante no tiene precio y es mi mayor inspiración. Gracias a mi hermano Jhon por estar siempre ahí para mí, ya sea para ayudarme a entender un trabajo o simplemente estar ahí para mí. En honor a la memoria de mi padre José, llevo sus enseñanzas y amor en mi corazón todos los días para guiarme e inspirarme. Gracias a mi novio Santiago por su apoyo constante, por ayudarme a comprender mis dificultades y brindarme siempre su cariño. Para mi tío Pablo y su esposa, su presencia y apoyo significa mucho para mí. Finalmente, está Otto, cuya presencia llena de amor y alegría mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría expresar nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca por permitirnos formar parte de esta institución, estudiar la carrera que nos apasiona, y disfrutar de las experiencias y oportunidades que han enriquecido nuestro aprendizaje y desarrollo personal. Estamos muy agradecidos al semillero de investigación Neonature por brindarnos la oportunidad de unirnos a su equipo de investigación. Gracias a la confianza y respaldo que nos ha brindado, hemos podido obtener experiencias y destrezas valiosas que resultaron fundamentales para llevar a cabo este trabajo monográfico.

Queremos expresar un agradecimiento especial a la profesora Ligia Consuelo Sánchez, quien ha sido nuestra primera mentora en el enfoque ambiental. Su amor, orientación, paciencia y conocimientos han sido de suma importancia en el desarrollo de nuestra tesis, motivo por el cual estamos profundamente agradecidas.

Por último, queremos agradecer sinceramente a nuestros amigos y familiares por el continuo respaldo y comprensión que nos brindaron en este trayecto. Su apoyo total ha sido una fuente continua de ánimo y resistencia en este momento de nuestra vida.

A todos ustedes, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	10
2. OBJETIVOS.	12
3. ANTECEDENTES.	13
4. MARCO TEÓRICO.	19
4.1. Generalidades sobre bioprospección.	19
4.2. Microorganismos Antárticos.	21
4.2.1. Potencial bioquímico de los microorganismos.	22
4.3. Metabolitos microbianos de los Microorganismos Antárticos.	23
5. DISEÑO METODOLÓGICO.	27
5.1. Universo, población, muestra.	27
5.2. Tipo de investigación, variables.	27
5.3. Técnicas y procedimientos.	27

5.3.1. Revisión de la información existente.	27
5.3.2. Selección del material bibliográfico de acuerdo a la temática a tratar.	29
5.3.3. Estructuración coherente del documento.	30
6. RESULTADOS.	31
6.1. Principales estudios revisados (1994-2024).	33
7. DISCUSIÓN.	40
8. CONCLUSIONES.	46
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Preparación para el proceso de bioprospección.	20
Figura 2. Microorganismos detectados en el glaciar principal y en la microscopía de fluorescencia de bou de hielo acreción.	22
Figura 3. Especies de líquenes depositadas en fungario.	25
Figura 4. <i>Aspergillus fumigatus</i> aislado de suelo ornitogénico de la Antártida.	26
Figura 5. Pigmentos carotenoides y micosporinas en levaduras antárticas.	26
Figura 6. Clasificación de las fuentes de información utilizadas en la monografía.	28
Figura 7. Temas de mayor relevancia en la investigación.	30
Figura 8. Tipos de microorganismos más mencionados en los documentos revisados.	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones de búsquedas literarias y totalidad de resultados. 28

Tabla 2. Organización de los documentos según el tema tratado.
33



**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD**

PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO

**“AVANCES EN BIOPROSPECCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS
ANTÁRTICOS EN LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS, UNA ALTERNATIVA PARA LA
CIENCIA.”**

RESUMEN

En las últimas décadas, la bioprospección de microorganismos antárticos ha emergido como un campo de gran interés debido al potencial biotecnológico de estos organismos en condiciones extremas. La Antártida ofrece un entorno donde los microorganismos han desarrollado mecanismos de adaptación notables. Desde la entrada del Tratado Antártico en 1959, que facilita el acceso para investigaciones científicas, la región se ha convertido en un laboratorio natural ideal para explorar nuevas aplicaciones en salud humana, agricultura y biotecnología. El objetivo de este proyecto fue analizar la diversidad y evolución de las investigaciones sobre microorganismos antárticos en los últimos 30 años, con el fin de optimizar su aprovechamiento en bioprospección. Se revisaron diferentes estudios, temas como los tratados internacionales que regulan el acceso a la Antártida, el desarrollo de antimicrobianos frente a la resistencia a antibióticos y los mecanismos de adaptación de estos organismos. Los resultados indicaron que el 20.83% de las referencias se centraron en el potencial de bioprospección, seguido por la diversidad microbiana (16.66%) y la investigación sobre antimicrobianos (10.41%). Las bacterias representaron un 66.60% de los estudios, seguidas por hongos (17.64%) y microalgas (7.84%). Las bacterias de los géneros *Cellulophaga*, *Pibocella*, *Polaribacter*, *Shewanella*, *Pseudomonas* y *Arthrobacter agilis* son particularmente prometedoras, produciendo compuestos bioactivos útiles en bioremediación,

la industria farmacéutica, alimentaria y médica. Los mecanismos de supervivencia de estos microorganismos, incluyendo la producción de enzimas a bajas temperaturas y metabolitos antimicrobianos, representan un recurso valioso para diversas industrias, demostrando el gran potencial de estos organismos para futuras aplicaciones biotecnológicas.

PALABRAS CLAVE: Microorganismos antárticos, bioprospección, biotecnología, Industrias, ecosistemas antárticos, compuestos bioactivos, adaptación.

Estudiantes: Laura Valentina Gutiérrez Pinilla y María Wuidee Doqueresana Ortega

Docente: Ligia Consuelo Sánchez Leal

Institución: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

2024

1. INTRODUCCIÓN

La Antártida, con su clima extremo, ha estado cubierta por una capa de hielo durante 34 millones de años. Esta condición ha impulsado la evolución de diversas formas de vida, incluyendo cianobacterias, algas verdes y otros organismos adaptados a este entorno único (1). Con el paso del tiempo la investigación en bioprospección ha demostrado el potencial de los microorganismos antárticos para producir compuestos bioactivos con aplicaciones en medicina, agricultura y biotecnología. A pesar de las extremas condiciones de frío y viento en este continente, la diversidad de microorganismos es notablemente alta en comparación con la escasa fauna y flora. Esto indica que las bajas temperaturas y la aridez del suelo no impiden la colonización por parte de estos microorganismos (2).

Existe un notable interés en las proteínas estructurales y enzimas metabólicas que confieren las características inusuales de los microorganismos extremófilos. Estas pueden ser muy útiles en la catálisis biológica para la síntesis de agroquímicos, productos farmacéuticos, polímeros, entre otros. Los microorganismos psicrófilos y psicrótrofos de los ambientes antárticos muestran estrategias de adaptación al frío que son interesantes para su aplicación en bioprospección. Por ejemplo, se pueden utilizar en la industria alimentaria, para obtener nuevos pigmentos como aditivos alimentarios, o en la producción de fármacos y detergentes. Por todas estas razones, el potencial de las bacterias psicrófilas para aplicaciones en bioprospección está recibiendo cada vez más atención (3).

En los últimos 30 años, se han logrado importantes avances en el estudio de los microorganismos antárticos. Entre estos avances se destaca la investigación de nuevos metabolitos secundarios con interés biotecnológico, aplicables en la agronomía, la industria forestal, la industria cosmética y el ámbito de la biomedicina (4). También se han descubierto enzimas en levaduras antárticas que se han utilizado recientemente como herramientas para seleccionar enzimas capaces de catalizar reacciones en condiciones extremas (5).

Todo esto revela el vasto potencial y las múltiples aplicaciones de los microorganismos antárticos, desde la producción de compuestos bioactivos valiosos para la medicina, la agricultura y la biotecnología, hasta su papel en la biorremediación y la industria cosmética, los microorganismos antárticos se perfilan como recursos invaluable. Además, se abren nuevas oportunidades que permiten el desarrollo de nueva tecnología y que pueden funcionar en condiciones extremas haciendo uso de enzimas y metabolitos secundarios.

Diferentes investigaciones indican que los metabolitos mencionados poseen una variedad de propiedades que favorecen los ambientes polares y de alta montaña, como la protección a la radiación de rayos UV, la acción antioxidante, anticancerígena y antimicrobiana. Por esto, esta investigación se centra en adentrarse en temas como la diversidad y los cambios que se han presentado a lo largo del tiempo en las exploraciones de los microorganismos de la antártica, todo esto con el fin de mejorar la comprensión de los beneficios en bioprospección y entender la evolución de la información a lo largo de los años (6).

Actualmente, los microorganismos antárticos han demostrado, a través de diversos estudios, su importancia en diferentes tipos de industrias. Con esta investigación, se pretende agrupar y dar a conocer la información que ha avanzado con el paso de los años acerca de sus posibles usos. Uno de estos estudios resalta el potencial de los líquenes antárticos en el ámbito farmacológico para combatir enfermedades neurodegenerativas, logrando identificar varios compuestos de estos líquenes que poseen propiedades capaces de inhibir la formación de agregados tóxicos en proteínas vinculadas a dichas enfermedades (7).

Las investigaciones acerca de microorganismos antárticos han evolucionado significativamente, pasando de la mera identificación y clasificación a la exploración de las funciones metabólicas y su potencial en bioprospección. Se destacan géneros como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Arthrobacter agilis*, así como hongos y líquenes antárticos, mostrando prometedoras aplicaciones industriales. Estos microorganismos se han adaptado a

este medio con el paso de millones de años, tolerando condiciones extremas con la adaptación de su metabolismo y la producción de compuestos bioactivos, metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas, útiles en biorremediación. Sin embargo, los altos costos de expediciones, equipos especializados y la falta de protocolos para el adecuado manejo de estos microorganismos limitan las investigaciones.

2. OBJETIVOS

GENERAL

Optimizar la comprensión sobre el potencial en bioprospección de microorganismos aislados de la Antártida a través de la revisión de literatura en los últimos 30 años.

ESPECÍFICOS

- Determinar cuál ha sido el grupo de microorganismos antárticos más relevante que ha sido identificado en investigaciones realizadas en los últimos 30 años.
- Establecer las principales enzimas y compuestos bioactivos que han sido reportadas en estas investigaciones para identificar áreas potenciales de aplicación en el campo de la bioprospección.
- Analizar los factores bióticos y abióticos que pueden influir en los microorganismos antárticos para adaptarse a las condiciones ambientales en diferentes entornos al original, con el propósito de identificar su potencial utilidad en proyectos de bioprospección.

3. ANTECEDENTES

El creciente interés en la microbiota antártica no sólo se limita a la investigación científica, sino que también ha dado lugar a la actividad de bioprospección, la cual ha acercado la Antártica a todos nosotros como consumidores. A través de la bioprospección, se han descubierto y desarrollado diversos productos basados en material biológico antártico que han llegado al mercado. Estos productos han causado una verdadera revolución en industrias clave como la farmacéutica, agrícola y cosmetológica, entre otras, gracias a sus propiedades únicas y beneficios potenciales. De este modo, la antártica se ha transformado en una esperanza para el mundo, brindando nuevas posibles soluciones a todos los problemas que se enfrentan en diferentes áreas como la salud, la agricultura y la estética, mezclando investigaciones científicas con el crecimiento comercial para el provecho de la sociedad (8)(9).

“Developments with Antarctic microorganisms: culture collections, bioactivity screening, taxonomy, PUFA production and cold-adapted enzymes”. En este artículo se abordaron diferentes ramas de investigación, se estudió la diversidad de las procariotas antárticas junto a su taxonomía, también la producción de AGPI que son todos aquellos ácidos grasos poliinsaturados producidos por los microorganismos que se encuentran en esta zona. Además, exploraron las enzimas que se adaptan al frío y son producidas por estos microorganismos, esto con el fin de entender todo lo que tiene que ver con sus funciones y sus características estructurales. Enzimas como las amilasas, β -galactosidasa, fosfatasa y proteasas, tienen diversos usos en industrias de alimentos, limpieza y la parte molecular. Igualmente, inspeccionaron el potencial biotecnológico de los microorganismos de la Antártica, incluyendo la invención de tecnología provechosa para la producción de PUFA, así como aplicaciones de enzimas y productos de biotecnología (Nichols D et al. 1999) (10)

En el artículo "Bioprospecting and Biotechnology in Antarctica" resaltaron la búsqueda de productos biológicos y estudios tecnológicos en la antártida, enfocándose en su singular

biodiversidad. Ellos describen cómo las moléculas derivadas de productos naturales pueden conducir al desarrollo de nuevos fármacos y productos químicos terapéuticos a través de microorganismos antárticos. Se identificaron especies microbianas con potencial biotecnológico como la producción de PUFA, en el cual se destaca el género *Shewanella*, un ejemplo de ello serían *S. gelidimarina*, *S. benthica* *S. frigidimarina*. Menciona la importancia de evaluar taxones microbianos menos conocidos para la biotecnología y muestra la relevancia de la Antártida como fuente de descubrimientos en bioprospección y biotecnología. (David S et al., 2002) (11).

Gesheva V y Vasileva-Tonkova. (2003), con su estudio llamado “Potential for Biodegradation of Hydrocarbons by Microorganisms Isolated from Antarctic Soils”, detectaron microorganismos de suelos antárticos con alta capacidad de degradar hidrocarburos, buena actividad emulsionante y capacidad de producir glicolípidos, con la finalidad de proponer un modelo de consorcio para el tratamiento de suelos contaminados con diferentes hidrocarburos. Se reportó que la mayoría de los aislados fueron capaces de crecer en medios sólidos con diferentes hidrocarburos como única fuente de carbono, y algunos de ellos mostraron una producción de glicolípidos aniónicos (12).

O’Brien A et al. (2004), llevaron a cabo un estudio titulado "Antarctic bacteria inhibit growth of food-borne microorganisms at low temperatures.", en el que identificaron microorganismos antárticos con capacidad para producir compuestos antimicrobianos activos en frío, con potencial para ser utilizados en la conservación de alimentos refrigerados. Ellos utilizaron tanto métodos clásicos como moleculares para caracterizar e identificar un pequeño número de productores de inhibidores con potencial para su uso a bajas temperaturas. 13 cepas mostraron una inhibición positiva al realizar nuevamente la prueba. Sin embargo, las muestras de sitios de gran altitud no revelaron productores inhibidores. Además, se secuenciaron aislados seleccionados, identificando bacterias con posibles aplicaciones industriales. Este estudio resalta el potencial de los antimicrobianos activos en frío provenientes de bacterias antárticas para la conservación de alimentos refrigerados (13).

Olivera NL et al. (2007), presentaron su estudio “Diversity and enzyme properties of protease-producing bacteria isolated from sub-Antarctic sediments of Isla de Los Estados, Argentina.”, en donde analizaron la diversidad de bacterias productoras de proteasas cultivables en sedimentos marinos y describieron las características de sus proteasas extracelulares en términos de su cinética de inactivación térmica. También compararon los comportamientos de inactivación térmica, analizando los parámetros aparentes de activación termodinámica de las proteasas en estudio. Los estudios enzimáticos reportados en este artículo permitieron evaluar algunas propiedades de las proteasas extracelulares que potencialmente coexisten en dichos sedimentos subantárticos. Esto es importante, no sólo para una futura aplicación tecnológica de estas enzimas, sino también por el papel ecológico de las proteasas en la adquisición bacteriana de compuestos orgánicos ricos en nitrógeno en el medio marino.(14)

Murray AE, Grzymski JJ (2007), presentaron en su estudio de “Diversity and genomics of Antarctic marine micro-organisms.” una descripción general de la diversidad molecular y la investigación genómica del bacterioplancton marino antártico. Se abordaron aplicaciones moleculares que utilizan la diversidad de genes de ARNr SSU, hibridación fluorescente in situ (FISH) y PCR en tiempo real, así como genómica ambiental y secuenciación del genoma de microorganismos antárticos. Llegaron a la conclusión de que el estado de los conocimientos sobre los microorganismos marinos polares desde las perspectivas ecológica y genómica se encontraba en la fase inicial de crecimiento exponencial. Esta información era esencial para comprender las adaptaciones específicas de los organismos a la vida en el frío, describir la historia evolutiva de los psicrófilos y, lo que era más importante, anticipar los efectos del cambio climático, como la disminución del hielo marino y sus consecuencias. (15)

En el libro Marine Genomics (2008), se describió un estudio sobre la diversidad bacteriana de esteras bentónicas de lagos antárticos como fuente de nuevos metabolitos bioactivos, el cual se centró en explorar la diversidad bacteriana de esteras microbianas en lagos antárticos para descubrir nuevos antibióticos. Se aislaron 723 bacterias heterotróficas, muchas de las cuales

pertenecían a taxones novedosos o endémicos. Estas bacterias fueron cultivadas en diferentes condiciones y examinadas para detectar actividades antimicrobianas. Se prepararon 6348 extractos y se encontró que 122 bacterias mostraron actividad antibacteriana contra *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecium* y *Escherichia coli*, algunas de las cuales también mostraron actividad antifúngica contra *Cryptococcus neoformans*, *Aspergillus fumigatus* y *Candida albicans*. El fraccionamiento de extractos de cepas seleccionadas reveló la presencia de nuevos compuestos antibacterianos, incluidos posibles péptidos de tiazolilo cíclicos, producidos por cepas de *Arthrobacter agilis* (16).

Bratchkova A y Ivanova V (2011), describieron en su estudio metabolitos bioactivos producidos por microorganismos recolectados en la Antártida y el Ártico, con el propósito de estudiar cómo se adaptan y resisten los microorganismos antárticos y árticos a las condiciones extremas de su entorno, así como la producción de nuevos metabolitos con estructuras únicas y actividad biológica particular. Los resultados incluyen la identificación de varios metabolitos secundarios, como antibióticos, alcaloides, aminoácidos de alto carbono, compuestos nitro y dicetopiperazinas, producidos por estos microorganismos. Lo cual muestra que las regiones polares son un gran reservorio de microorganismos con potencial antimicrobiano, y que la síntesis de metabolitos secundarios juega un papel importante en la adaptación y supervivencia de estos microorganismos en los desiertos de hielo, específicamente de la Antártida (17).

Correa-Llantén DN et al. (2012), en su investigación sobre capacidad antioxidante de nuevos pigmentos de una bacteria antártica, se enfocaron en los mecanismos no enzimáticos de una bacteria pigmentada aislada de la Antártida, con el objetivo de comprender cómo sus pigmentos conferían resistencia al estrés oxidativo, especialmente a la radiación UV y a los agentes oxidativos clásicos. Basándose en los análisis realizados durante esta investigación, concluyeron que los antioxidantes de la mezcla de pigmentos protegían a esta bacteria contra el daño oxidativo. Estas propiedades convirtieron a esta mezcla de pigmentos en un antioxidante con potenciales aplicaciones biotecnológicas. Como resultado encontraron que los pigmentos desempeñaron un papel importante contra el daño oxidativo al proteger las

membranas celulares. Además de esta función protectora, estos pigmentos también podrían afectar la fluidez de la membrana, lo que permitiría sus funciones metabólicas incluso a bajas temperaturas. Debido a las propiedades antioxidantes, esta mezcla de pigmentos podría ser de gran utilidad para aplicaciones biotecnológicas y para la resistencia conferida a los liposomas, procesos de interés en la elaboración de fármacos. (18)

Ana Clara Bianchi et al. (2014), en su investigación “Antarctic Microorganisms as Source of the omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids” buscaron identificar bacterias marinas antárticas capaces de producir ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) como EPA y DHA y determinar las cepas con mayor potencial para la producción de EPA y DHA explorando nuevas fuentes de PUFAs a partir de bacterias marinas antárticas no previamente estudiadas. Se reportó 40 aislamientos bacterianos marinos antárticos capaces de producir EPA y DHA. Aislados de los géneros *Cellulophaga*, *Pibocella* y *Polaribacter* demostraron capacidad para producir EPA y DHA. La cepa *Shewanella* sp. (cepa 8-5) se destacó por su alta producción de EPA. Además, se observó que otras cepas bacterianas también mostraron potencial para la producción de PUFAs. Estos resultados sugirieron que las bacterias marinas antárticas son una fuente prometedora de PUFAs con beneficios para la salud humana (19).

Kim H, Choi J de la Universidad Nacional de Chonnam (2014), en su estudio "Effect of Temperature on Growth Rate and Protease Activity of Antarctic Microorganisms" se centraron en investigar la producción de proteasas de baja temperatura por microorganismos antárticos. Los objetivos principales incluyeron identificar microorganismos productores de proteasas en la región polar, analizar su crecimiento y actividad en diferentes temperaturas (5°C, 10°C, 15°C, 20°C), y evaluar su potencial aplicación industrial. Los resultados mostraron que los microorganismos estudiados presentaron tasas de crecimiento similares en diferentes temperaturas, con variaciones en la actividad específica de proteasas. Se observó que ciertas cepas exhibieron altas actividades enzimáticas, lo que sugiere su potencial para aplicaciones industriales, especialmente en sectores como la industria alimentaria, textil y farmacéutica. Además, se destacó la importancia de las proteasas de baja temperatura por su capacidad de

mantener altas actividades en condiciones de frío, lo que podría resultar en ahorros de costos en procesos industriales (20).

Leyton A et al. (2015), desarrollaron la investigación sobre la “Actividad inhibitoria del sobrenadante de la bacteria Antártica *Pseudomonas* sp. M19B en la formación de biopelículas de *Flavobacterium psychrophilum* 19749”. Evaluaron los efectos extracelulares que son producidos por microorganismos antárticos, los cuales influyen en la capacidad de la formación de biopelículas de *Flavobacterium psychrophilum* buscando un posible uso biotecnológico para controlar y evitar la afectación de los peces por este patógeno. Se determinó que en los aislamientos estudiados se puede destacar que un 26,9% tuvo un efecto anti-biopelículas fuerte, un 25,4% no presentó efecto alguno en las biopelículas de *F. psychrophilum*. Se encontró que las proteínas presentes en el sobrenadante de la bacteria tenían un fuerte efecto inhibitorio en la formación de biopelículas de *F. Psychrophilum* 19749 en concentraciones entre 0,5 y 1,5 mg mL⁻¹. Con la identificación molecular se encontró que el mayor efecto anti-biopelícula fue por una bacteria del género *Pseudomonas*. (21)

Santos, A et al (2015), llevaron a cabo un estudio titulado "Nanopartículas sintetizadas por bacterias antárticas y sus posibles mecanismos de síntesis". Su objetivo principal fue investigar a las bacterias psicrófilas antárticas capaces de sintetizar nanopartículas, teniendo en cuenta los mecanismos que facilitan esta síntesis la investigación destacó el potencial de las bacterias antárticas en la producción de nanopartículas, pero enfatizó la necesidad de optimización en términos de tamaño, forma y estabilidad de las partículas. Los autores también manifiestan una clara relación entre la resistencia a metales pesados y la síntesis de nanopartículas (22).

Por su parte, Bustamante Maturana, S. L. (2021), en la “Evaluación del efecto antagonista de bacterias psicrotolerantes de la antártica sobre bacterias fitopatógenas de los géneros *Pseudomonas* y *Xanthomonas*”. Estimaron el efecto de las bacterias psicrotolerantes como antagonistas bajo diversos patrones de temperatura sobre las bacterias fitopatógenas

Pseudomonas y *Xanthomonas*. Se trabajó tanto *in vitro* como *in vivo*. En la parte *in vitro*, se observó que las bacterias psicrotolerantes exhibieron actividad antagonista contra las patógenas. En la parte *in vivo*, se observó que la combinación de las bacterias psicrotolerantes con hidróxido de cobre redujo significativamente el daño causado por las bacterias patógenas en las plantas. Se encontró que las bacterias obtenidas de la rizósfera de *Deschampsia antarctica* mostraron una mayor actividad antagonista en comparación con las obtenidas de la rizósfera de *Colobanthus quitensis*. Además, se determinó que las cepas psicrotolerantes utilizadas carecían de actividad antagonista efectiva contra las bacterias fitopatógenas de los géneros *Pseudomonas* y *Xanthomonas*. Sin embargo, se observó que las cepas psicrotolerantes de *Pseudomonas* exhibieron capacidad de inhibición a diferentes temperaturas. (23)

Michal Styczynski et al. (2022). En su investigación, se probó el efecto de la bioaumentación del suelo con cepas antárticas, así como la influencia de sus metabolitos en la promoción del crecimiento de las plantas. Se identificó que las cepas analizadas eran extremófilas, capaces de crecer en una amplia gama de temperaturas y de tolerar altas concentraciones de sales, manteniendo su actividad en diferentes valores de pH. Todas las cepas mostraron características favorables para el crecimiento de las plantas y fueron eficientes productoras de sideróforos. Tanto el bioaumento con bacterias como la suplementación con sus metabolitos mejoraron las condiciones del suelo. Las cepas también exhibieron actividades proteolíticas y celulolíticas, lo que podría aumentar la biodisponibilidad del carbono orgánico (24).

Por su parte, Pavón, A., et al. (2023), realizaron “Identification of Antarctic Soil Bacteria Exhibiting Antiproliferative Activity against a Colon Cancer Cell Line”. La investigación destacó el potencial de los microorganismos extremófilos en la industria farmacéutica y médica. Se encontró que las bacterias de la rizosfera en *Deschampsia antarctica* son fuente de nuevas moléculas con actividad biológica. Este estudio fue el primero en identificar una bacteria rizosférica secretora de metabolitos inhibidores de la proliferación celular en cáncer colorrectal. (25)

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Generalidades de bioprospección

La bioprospección es un nombre relativamente nuevo para una práctica bien establecida. En los últimos años de la década de 1980, defensores del desarrollo sostenible crearon un concepto para describir el resurgimiento del interés de las industrias en emplear recursos naturales como plantas, microorganismos y saberes ancestrales en la creación de productos innovadores (26).

La bioprospección se refiere a la exploración de la biodiversidad para identificar nuevos recursos con valor social y comercial. Es realizada por diversas industrias consolidadas, como la farmacéutica, la manufacturera y la agrícola, así como una amplia gama de otras relativamente nuevas, como la acuicultura, la biorremediación, la biominería, la ingeniería biomimética y la nanotecnología (27). Sin embargo, la premisa fundamental de la bioprospección radica en la creencia de que la naturaleza alberga activos ocultos de enorme potencial, aunque aún desconocidos para la humanidad, los cuales pueden incentivar e incluso financiar la conservación de la biodiversidad. Esta información genética o bioquímica no descubierta suele considerarse en el contexto de posibles mejoras, lo que define una vasta población mundial de potenciales beneficiarios (28). En la figura 1 se presenta una demostración de preparación para iniciar el proceso de bioprospección.

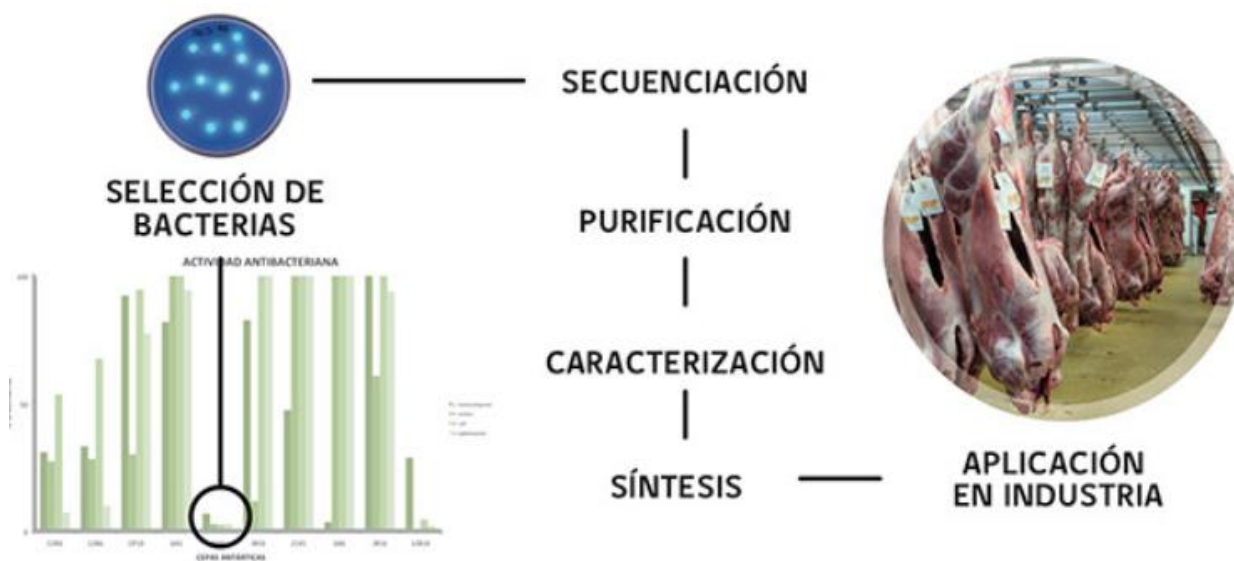


Figura 1. Preparación para el proceso de bioprospección. Incluye la selección de cepas con actividad antibacteriana, la secuenciación de su genoma, la purificación y caracterización de sus péptidos, la síntesis de estos, y la realización de ensayos de actividad. (29)

La bioprospección brinda una extensa gama de usos que favorecen la exploración, dirección y utilización de los distintos recursos, los cuales se encuentran en el medio ambiente, abarcando a los animales, plantas y microorganismos. A nivel general, el enfoque de la bioprospección se da principalmente en los metabolitos secundarios, esto debido a su importancia económica en la industria de fármacos. Sin embargo, este enfoque limitado deja en apartado la exploración de componentes biológicos primarios como alimentos, fibras y todo lo que tiene que ver con genómica, además no se puede dejar de incluir la protección de cultivos por medio de insumos biológicos y biotecnológicos. Estos aspectos también son esenciales en la bioprospección ya que buscan emplear la diversidad biológica en distintas áreas de la economía (30).

Las nuevas investigaciones han expuesto cómo la bioprospección puede ser eficiente para descubrir soluciones a complicaciones ambientales. Un ejemplo es el estudio de Lezama-Cervantes et al. (2010), el cual sugiere utilizar tapetes microbianos para el procesamiento de efluentes en la cría de *Litopenaeus vannamei*, la cual es una especie de camarones que se encuentran en México, con el objetivo de reducir el impacto ambiental que proviene de los subproductos generados por esta actividad (31).

4.2. Microorganismos antárticos

La investigación de los microorganismos antárticos ha tomado una gran relevancia en la actualidad. Los ecosistemas que se han desarrollado en condiciones extremas normalmente carecen de microbiota, pero tienen un gran dominio de microorganismos en el suelo. (32). La Antártida ha sido considerada un lugar antiguo que está en constante invasión microbiana que se pueden encontrar en el suelo, la nieve, etc. Los microorganismos que son nativos de este lugar realizan funciones importantes en este entorno. Contribuyen al ciclo de nutrientes y dirigen las redes alimentarias y la calidad del agua, suelo, aire, entre otros. Todos estos desempeñan un papel como reguladores de los procesos ecosistémicos (33).

Un ejemplo de los microorganismos encontrados en este tipo de ambiente son las cianobacterias. Según estudios documentados, estas bacterias son fundamentales para los procesos del ciclo de nutrientes. Se cree que estos son críticos proveedores de servicios ecosistémicos en la Antártida (Wynn-Williams 1996) y son fundamentales para mantener la estructura de las comunidades que pertenecen a suelos fríos (33). Ver figura 2. Otro ejemplo son los hongos antárticos que además de realizar las funciones básicas en la ecología, también forman parte de la base de las comunidades ubicadas en el sitio, por ejemplo, endófitos y tapetes microbianos. Estos hongos se encargan en gran medida de la transformación de los minerales de las rocas y ayuda a los otros microorganismos a tener disponibilidad de elementos biológicamente importantes (32).

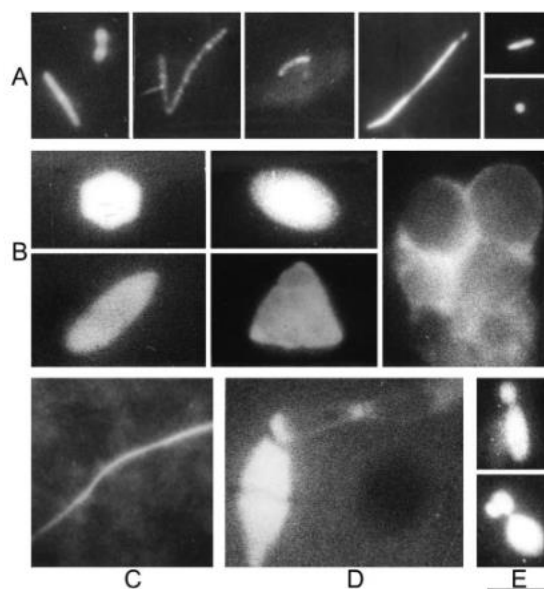


Figura 2. A-E. Microorganismos detectados en el glaciar principal y en la microscopía de fluorescencia de bou de hielo acreción. (A) la comunidad de células bacterianas se observa en la mayoría de los horizontes de hielo; (B) células de cianobacteria; (C) hilo de actinomiceto observado en el horizonte de hielo 3565 m, (D) hifa fúngica parcialmente lisada con conidio observado en el horizonte de hielo 3585 m, y (E) células de yeso observadas en el horizonte de hielo 3611 m. Barra = 5 (micras) en todas las fotos. (33)

4.2.1. Potencial bioquímico de los microorganismos

Los microorganismos adaptados a ambientes fríos con el tiempo han desarrollado diferentes estrategias para contrarrestar las adversidades a las que se enfrentan, como realizar ajustes en

la actividad enzimática, en la fluidez de la membrana celular, la estructura de los microtúbulos y la regulación de los canales iónicos, así como la capacidad de entrar en un estado latente durante ciertas estaciones. Mantener la fluidez de la membrana es esencial, ya que las bajas temperaturas tienden a reducirla, resultando en la pérdida de su funcionalidad. Además, pueden emplear proteínas específicas para mitigar el impacto del frío en su metabolismo, permitiendo tasas metabólicas más altas a pesar de un crecimiento más lento en comparación con microorganismos de climas más templados. Es el caso de las proteínas anticongelantes, las cuales interfieren con la formación de hielo para prevenir daños celulares (34).

Los microorganismos extremófilos, psicrófilos y psicrotolerantes son una fuente muy importante y valiosa para los nuevos bioproductos (35). Estos microorganismos producen metabolitos que se activan a bajas temperaturas y pueden tener un gran potencial para el área de la salud, el mantenimiento de alimentos y diferentes industrias como la estética y ambiental.

Las cianobacterias antárticas, han demostrado su gran valor ecológico gracias a tecnologías nuevas, como las multiómicas, las cuales han dado nuevos estudios sobre el papel de estas en el ecosistema. Un caso representativo, son las lipasas que son producidas por la levadura *Pseudozyma antarctica*, la cual ha sido objeto de investigación debido a sus propiedades únicas en la bioquímica. Esto llevó a los investigadores a realizar una patente y posterior a ello su producción comercial. Las enzimas tienen el potencial de hidrolizar grasas y aceites, con ello liberan el glicerol y ácidos grasos, que pueden ser usados por otros microorganismos como fuente de nutrientes, por ello se destaca su importancia en los ciclos biogeoquímicos de este medio antártico (33) Ver figura 2.

Es fundamental que en la Antártida existan microorganismos que solubilicen nutrientes, como el fosfato. Estos microorganismos poseen la habilidad de desintegrar el fosfato existente en formas insolubles, como la roca fosfórica, a través de la generación de ácidos orgánicos y enzimas esenciales. La disolución de ácidos orgánicos disminuye el pH del entorno y promueve

la liberación de fosfato de las rocas, aumentando de esta manera su accesibilidad para las plantas. Este incremento en la presencia de fosfato en el terreno antártico fomenta un crecimiento y evolución más eficiente de las plantas, lo que repercute de manera positiva en la biodiversidad y la estabilidad del ecosistema antártico. En conclusión, el potencial bioquímico de los microorganismos en la Antártida no solo es importante para entender la dinámica de este ecosistema, sino también es relevante en la investigación científica y en la exploración de soluciones sustentables para la agricultura y la preservación del medio ambiente (36).

4.3. Metabolitos de los microorganismos Antárticos

Los microorganismos de la Antártida muestran una gran diversidad de metabolitos con diferentes capacidades beneficiosas. La adaptación a las demandantes condiciones de los entornos antárticos conduce a que estos microorganismos generen tácticas para su supervivencia, tales como la creación de metabolitos secundarios que impiden el desarrollo de otros microorganismos y la fabricación de pigmentos para sobrevivir a la radiación UV.

Se ha demostrado que un pigmento producido por *Serratia mascerens* como la prodigiosina se caracteriza por inducir apoptosis y ejercer actividad sobre líneas celulares humanas relacionadas al cáncer hematopoyético, leucemias, linfomas, entre otros.

Microorganismos como actinomicetos y cianobacterias producen metabolitos secundarios, donde se destacan los policétidos, los cuales poseen actividad antitumoral y antimicrobiana. Entre estos policétidos las briostatinas tienen un papel importante en la fauna marina antártica, ya que tienen una relación con los briozoos, los cuales son animales marinos que pueden llegar a ser confundidos con corales o algas; estas se encargan de proteger a los briozoos de la depredación cuando están en etapa de crecimiento (37).

Un caso notable es el descubrimiento de que las cepas de bacterias actinobacterias antárticas

poseen la facultad de producir metabolitos bioactivos que pueden inhibir el desarrollo de diversas bacterias perjudiciales para la salud. Además, se ha detectado la presencia de otras bacterias, como *Janthinobacterium sp*, que generan metabolitos con la capacidad de frenar el desarrollo de bacterias que cuentan con β -lactamasas de amplio espectro. Estos descubrimientos han evidenciado su eficacia en entornos clínicos (4).

Por otro lado, los líquenes antárticos son capaces de producir una amplia gama de metabolitos secundarios que les confieren la capacidad de sobrevivir en entornos tan extremos como los de la Antártida, es importante ya que generan aproximadamente 700 metabolitos secundarios, una cifra significativamente mayor que la de las plantas vasculares, las cuales se han identificado hasta ahora con alrededor de 200. Estos componentes son sintetizados a través de tres rutas principales: La ruta del acetil-polimalonil, la ruta del ácido mevalónico y la ruta del ácido shikímico. Estos metabolitos presentan diversas propiedades que son utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, como la protección contra la radiación UV, la actividad antimicrobiana y la inhibición de la actividad cancerígena. Un estudio muestra su efecto antibacteriano con líquenes extraídos de la isla Rey Jorge, de las especies *Ramalina terebrata*, *Himantormia lugubris*, *Stereocaulon alpinum* y *Umbilicaria antarctica* (Ver figura 3), donde se obtuvo un extracto primario de estos metabolitos, el cual fue sometido a pruebas para evaluar su actividad antibacteriana contra aislados de *Acinetobacter baumannii* de origen hospitalario, un patógeno de gran relevancia en entornos hospitalarios a nivel global (6). El *H. lugubris* también desempeña un papel importante al desarrollar metabolitos como el Atranol, el cual no solo posee propiedades antimicrobianas con una concentración mínima inhibitoria, sino que también logra atenuar la formación de biopelículas formadas por bacterias patógenas en dispositivos médicos.



Figura 3. Especies de líquenes depositadas en el fungario de la Universidad de Concepción. a) *Usnea antarctica*; b) *Ramalina terebrata*; c) *Stereocaulon alpinum*; d) *Himantormia lugubris*. Créditos: Dr. Götz Palfner (6).

Los hongos representan otro conjunto de microorganismos que han desarrollado estrategias metabólicas para sobrevivir y reproducirse en ambientes de temperaturas bajas, lo cual es particularmente crítico en la Antártida, donde los ciclos de congelación y descongelación son habituales.

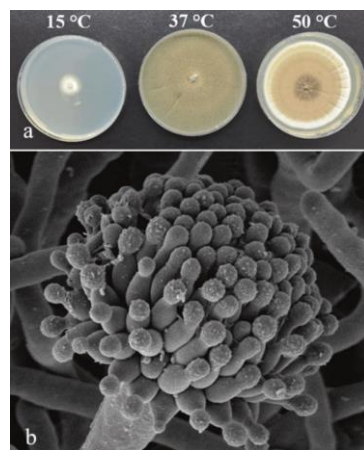


Figura 4. *Aspergillus fumigatus* aislado del suelo Antártico.

(a) Colonias a diferentes temperaturas de crecimiento y (b) detalles de las estructuras reproductivas asexuales se revelan mediante microscopía electrónica de barrido. (33).

En respuesta a estas condiciones adversas, las levaduras producen proteínas anticongelantes y ajustan la composición de sus lípidos, como los ácidos grasos y el ergosterol, para regular la membrana. Además, generan pigmentos como carotenoides y micosporinas. Estos metabolitos tienen una gran relevancia tanto en la industria, para la fabricación de productos comerciales, como en la preservación de alimentos (38).

Especie de Levadura	Tolerancia a la radiación UV	Carotenoides	Micosporinas
<i>Dioszegia sp.</i>	Alta	193.8 ± 2.8	51 ± 2
<i>Leuconeurospora sp.</i> (T27Cd2)		5.4 ± 0.3	209 ± 13
<i>Cr. gastricus</i>		24.8 ± 0.8	126 ± 6
<i>Rh. laryngis</i>		87 ± 5.3	86 ± 2
<i>Rh. mucilaginoso</i>		56.9 ± 3.2	125 ± 2
<i>W. anomalus</i>	Media	0.87 ± 0.02	66 ± 2
<i>C. sake</i>		2.8 ± 0.1	156 ± 3
<i>Mrakia sp.</i>		1.2 ± 0.1	121 ± 2
<i>Rh. glacialis</i>	Baja	4.3 ± 0.2	132 ± 2
<i>Le. creatinivora</i>		0.13 ± 0.02	242 ± 11
<i>M. robertii</i>		1.5 ± 0.1	108 ± 5

Figura 5. Pigmentos carotenoides y micosporinas en levaduras antárticas (38).

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. Universo, población, muestra

Universo: Documentos de literatura publicados en revistas científicas y literatura gris que se

relacionan con microorganismos recuperados de la Antártida.

Población: Fuentes documentales que tratan temas relacionados a la bioprospección con microorganismos recuperados de la Antártida.

Muestra: Documentos de literatura publicados en revistas científicas y literatura gris sobre Microorganismos Antárticos con Potencial de Bioprospección en los últimos 30 años.

5.2. Tipo de investigación, variables

Tipo de investigación: Enfoque Cualitativo con revisión documental

Variables: A pesar de que este es un estudio cualitativo, contempla categorías de análisis como: Enzimas obtenidas de microorganismos antárticos, compuestos bioactivos producidos por microorganismos antárticos, factores bióticos y abióticos que influyen en microorganismos antárticos, bioprospección con microorganismos antárticos, adaptación de microorganismos psicrófilos.

5.3. Técnicas y procedimientos.

5.3.1. Revisión de la información existente.

Se utilizaron 49 documentos, estos de diferentes índoles como artículos, libros, páginas web, etc. de diferentes bases de datos como Science Direct, PubMed, SciELO, Springer, y Google Académico, además de consultar los repositorios institucionales de varias universidades nacionales e internacionales y diversas páginas web.

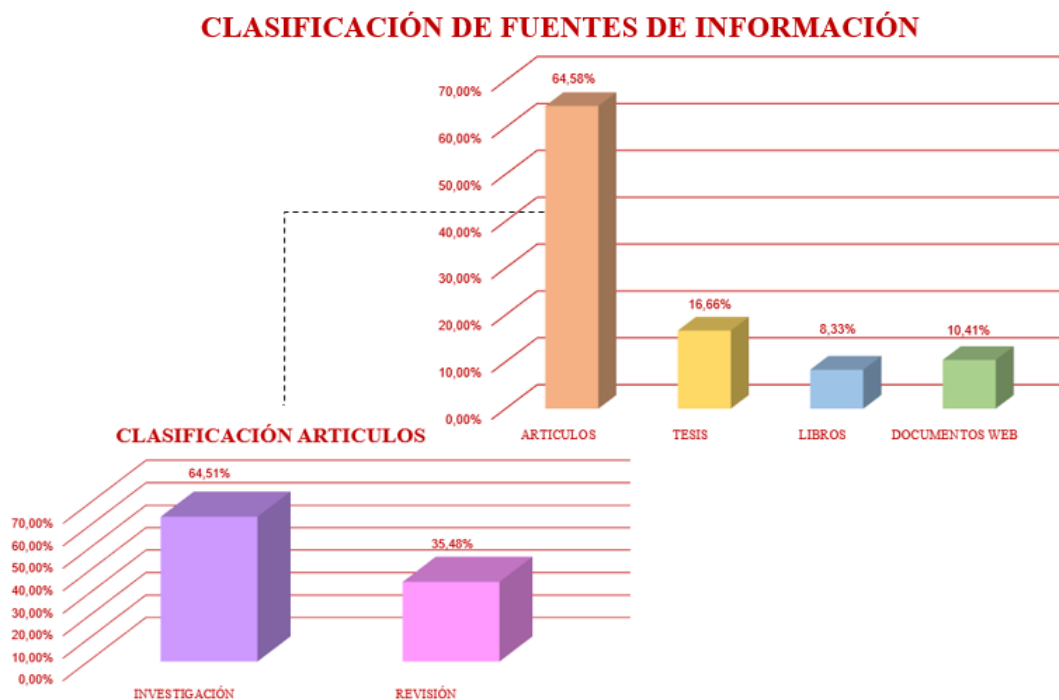


Figura 6. Clasificación de las fuentes de información utilizadas en la monografía.

Para la búsqueda de la literatura, se aplicaron filtros temporales dividiendo el análisis en tres periodos: 1994 - 2004, 2005 - 2014, 2015 - 2024. Esta segmentación por décadas permitió organizar de manera más eficiente la recopilación de información y facilitar el análisis de los avances en cada intervalo de tiempo.

Tabla 1. Ecuaciones de búsquedas literarias y totalidad de resultados.

Ecuaciones de búsquedas	Total de resultados (1994-2024)
Antartic microorganism scientific	Aproximadamente 18.900 resultados
Antarctic microorganism metabolites	Aproximadamente 17.800 resultados

Developments with Antarctic microorganisms	Aproximadamente 17.800 resultados
Microorganisms antarctic bioprospecting	Aproximadamente 5.900 resultados
Psychrophilic bacteria	Aproximadamente 21.000 resultados
Antarctic microorganisms that produce enzymes for use in bioprospecting	Aproximadamente 5.420 resultados
Adaptations of Antarctic microorganisms	Aproximadamente 18.300 resultados
Biotic and abiotic factors that influence Antarctic microorganisms	Aproximadamente 18.400 resultados
Biotechnological applications with Antarctic microorganisms	Aproximadamente 17.800 resultados
Secondary metabolites of Antarctic microorganisms	Aproximadamente 17.500 resultados

5.3.2. Selección del material bibliográfico de acuerdo a la temática a tratar.

En esta fase de la investigación, se seleccionaron principalmente documentos relacionados con estudios realizados en la Antártida sobre microorganismos con potencial de bioprospección. Se consultaron temas relevantes como los tratados internacionales que regulan el acceso a esta región, lo cual es importante para la planificación y ejecución de investigaciones científicas en la Antártida..

Además, se revisaron trabajos que destacan la importancia del desarrollo de nuevos antimicrobianos a partir de estos microorganismos, especialmente en el contexto de la creciente resistencia a los antibióticos. Se estudiaron los mecanismos de supervivencia que estos microorganismos emplean para adaptarse a las extremas condiciones ambientales de la

Antártida, proporcionando valiosos conocimientos sobre su biología y posibles aplicaciones biotecnológicas. También se investigaron nuevas cepas de microorganismos antárticos, lo cual amplía el espectro de organismos potencialmente útiles en bioprospección.

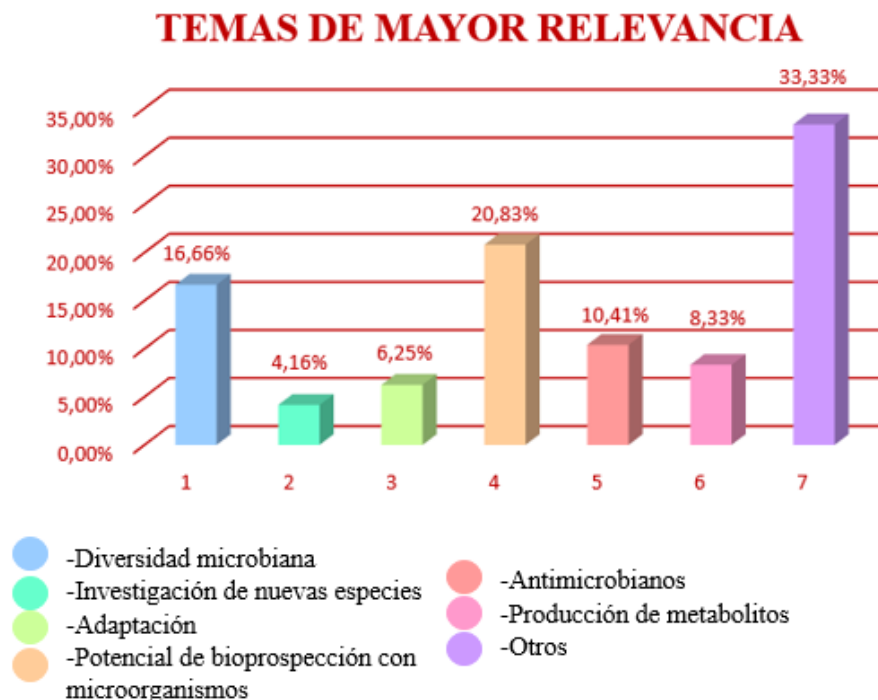


Figura 7. Temas de mayor relevancia en la investigación.

5.3.3. Estructuración coherente del documento

En este punto se organizó de manera descriptiva durante el desarrollo del documento los temas: propiedades y características de los microorganismos antárticos y su potencial de bioprospección que han sido descritos en los últimos 30 años en la literatura. A medida que se hizo la revisión de literatura, se descubrió que las investigaciones más relevantes se encontraron en la década de los 90s, viendo un aumento en el interés de explorar el tema de bioprospección y aún más en territorios como la Antártica, ya que en la década de los 80s las investigaciones en esta área no eran tan comunes. El documento también se delimitó en este lapso de tiempo para poder ver el avance en la investigación con estos microorganismos, permitiendo ver el desarrollo a través de los años y los posibles usos con estos para las

diferentes industrias. Todo esto cobró importancia a medida que se vieron las posibles consecuencias con el desarrollo del ser humano y la decadencia del planeta tierra. En la actualidad se buscan diferentes maneras de solventar el impacto de la contaminación y del calentamiento global y entre ellas están los microorganismos como una ayuda para la bioprospección en diversas áreas.

6. RESULTADOS

La información fue clasificada en los temas más relevantes para esta monografía. Dentro de estos, el posible aprovechamiento de microorganismos para la bioprospección fue el tema más destacado, abarcando el 20. 83% de las menciones. Este asunto es de gran relevancia por su importancia en la exploración de nuevos recursos biológicos con potenciales aplicaciones en las industrias y en la medicina. Además, se destacó la diversidad microbiana con un porcentaje del 16. 66%, resaltando la abundancia y diversidad de microorganismos que se encuentran en la Antártida y su potencial para descubrimientos científicos innovadores. Las investigaciones en el campo de los antimicrobianos han experimentado un notable aumento, motivadas por la necesidad de buscar nuevas soluciones ante la resistencia a los antibióticos, abarcando aproximadamente el 10. 41% de los estudios realizados. Se analizó la producción de metabolitos en un 8. 33% de los estudios, los cuales resaltan la habilidad de estos seres para crear compuestos bioactivos valiosos en la industria. La adaptación de microorganismos a ambientes hostiles es crucial para comprender los mecanismos de supervivencia y resistencia, los cuales pueden ser aplicados en biotecnología se menciona un 6.25%. Finalmente, el estudio de nuevas especies logró un 4. 16%, mostrando el interés por descubrir y clasificar la diversidad de microorganismos en la Antártida.

Desde los años 90, estos campos de estudio han jugado un papel crucial en la búsqueda de usos prácticos para los microorganismos antárticos. Las investigaciones relacionadas con microorganismos en entornos extremos no son recientes; han progresado gradualmente, explorando diversas tácticas para su uso, como la fabricación de antimicrobianos ante la creciente resistencia de los patógenos presentes. Es crucial ahondar en estos asuntos para incrementar al máximo el potencial biotecnológico de estos seres vivos.

Además, se asignó un segmento a otros asuntos relevantes que, por su diversidad, se fusionaron en una única categoría. Este conjunto abarca estudios genómicos, funciones de los microorganismos en sus ambientes, nanopartículas, variedad de enzimas, entre otros aspectos. Estos asuntos complementarios son igual de relevantes, dado que proporcionan una perspectiva más integral del efecto y las posibles aplicaciones de los microorganismos antárticos en el ámbito científico e industrial.

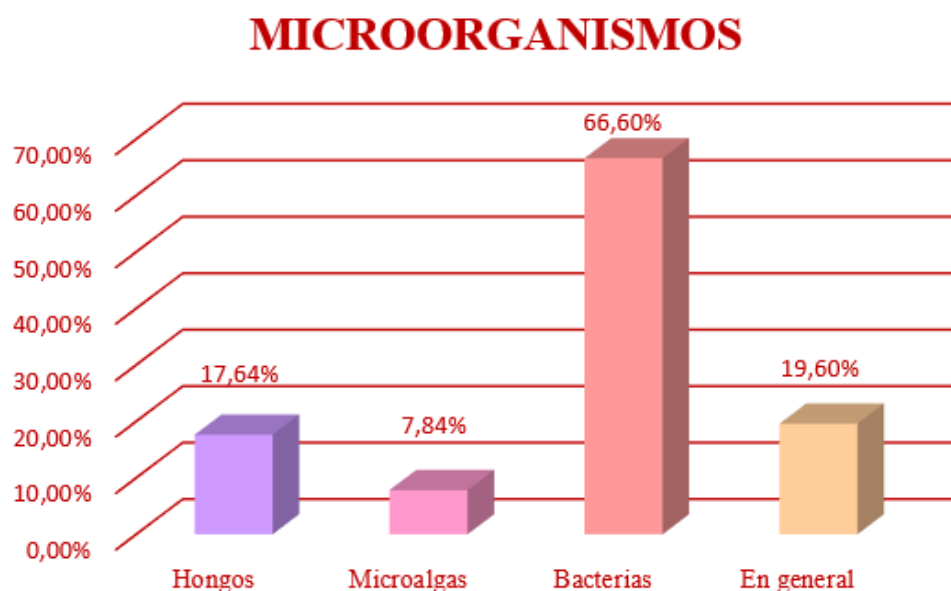


Figura 8. Tipos de microorganismos más mencionados en los documentos revisados

Asimismo, se procedió a categorizar la información de acuerdo con los distintos tipos de microorganismos que eran objeto principal de estudio en las investigaciones. Las bacterias destacaron como el enfoque principal, abarcando el 66. 60% de los estudios. A continuación, se presentan los hongos, con un 17. 64%, seguidos de las microalgas, con un 7.84%. Además un 19. 60% de las investigaciones corresponden a microorganismos en general, sin precisar una especie en específico.

Los resultados revelan un progreso importante en la comprensión de cómo se adaptan los

microorganismos antárticos a entornos extremos, un factor crucial para su potencial uso en la biotecnología. Asimismo, el estudio de nuevas variedades y la diversidad de enzimas han permitido expandir las posibles aplicaciones, como la generación de nanopartículas y la creación de innovadoras herramientas para la industria biotecnológica.

Finalmente, es importante resaltar la variedad de usos que se les está dando a los microorganismos antárticos, desde la creación de antimicrobianos innovadores hasta su aplicación en la biotecnología ambiental. Esta diversidad refleja el vasto potencial de estos organismos y la necesidad de seguir investigando para maximizar su impacto en la ciencia y la industria.

6.1 Principales estudios revisados (1994-2024)

Resume los artículos seleccionados sobre bioprospección de microorganismos antárticos entre 1994 y 2024, que sirvieron de base para el análisis de tendencias y avances científicos en este campo, lo cual facilita la comprensión del alcance temporal y temático de las investigaciones consideradas en este estudio.

Tabla 2. Organización de los documentos según el tema tratado

Potencial de bioprospección con microorganismos		
Título	Autor(es)	Año
Developments with Antarctic microorganisms: culture collections, bioactivity screening, taxonomy, PUFA production and cold-adapted enzymes	David Nichols, John Bowman, Kevin Sanderson, Carol Mancuso Nichols , Tom Lewis, Tom McMeekin, Peter D Nichols	1999
Bioprospecting and biotechnology in Antarctica	David Scott Nichols	2001

Bioprospecting: The 'Promise' and Threat of the Marke	Cori Hayden	2007
Antioxidant capacity of novel pigments from an Antarctic bacterium	Daniela N Correa-Llantén, Maximiliano J Amenábar, Jenny M Blamey	2012
Potential for Biodegradation of Hydrocarbons by Microorganisms Isolated from Antarctic Soils	Evgenia Vasileva-Tonkova, Victoria Gesheva	2014
Antarctic microorganisms as source of the omega-3 polyunsaturated fatty acids	Ana Clara Bianchi, Laura Olazábal, Alejandra Torre, Lyliam Loperena	2014
Antarctic bioprospecting: in pursuit of microorganisms producing new antimicrobials and enzymes	Danilovich, Mariana ElizabethIcon ; Sanchez, Leandro ArturoIcon ; Acosta, Federico FranciscoIcon ; Delgado, Osvaldo Daniel	2018
Bioprospección de enzimas de interés biotecnológico producidas por levaduras antárticas: producción, caracterización y aplicaciones industriales	Bezus, Brenda	2022
Microorganismos con potencial en la solubilización de fosfato tricálcico y roca fosfórica aislados de suelos de la Antártida	Baque Gutiérrez, Ashley Gabriela, Vargas Rodríguez, Melany Nicole	2023
El potencial farmacológico de los líquenes antárticos en la lucha contra las enfermedades neurodegenerativas	INACH	2024

Diversidad microbiana		
Título	Autor(es)	Año

Antarctic microbial diversity: the basis of polar ecosystem processes	Wynn-Williams, D. D	1996
Prokaryotic diversity in the Antarctic: the tip of the iceberg	B J Tindall	2004
Diversity and genomics of Antarctic marine micro-organisms	Alison E Murray, Joseph J Grzymiski	2007
Bacterial diversity from benthic mats of Antarctic lakes as a source of new bioactive metabolites	Jose Luis Rojas, Jesús Martín, José Rubén Tormo, Francisca Vicente, Mara Brunati, Ismaela Ciciliato, Daniele Losi, Stefanie Van Trappen, Joris Mergaert, Jean Swings, Flavia Marinelli, Olga Genilloud	2009
Bacterial Diversity Assessment in Antarctic Terrestrial and Aquatic Microbial Mats: A Comparison between Bidirectional Pyrosequencing and Cultivation	Bjorn Tytgat, Elie Verleyen, Dagmar Obbels, Karolien Peeters, Aaike De Wever, Sofie D'hondt, Tim De Meyer, Wim Van Criekeing, Wim Vyverman, and Anne Willems	2014
Evaluación de la diversidad bacteriana procedente de agua marina antártica utilizando microbiología convencional	Sara Gabriela Cortés Torres, Yuly Vanessa Avendaño Osorio	2019
Identificación de bacterias antárticas con actividad antimicrobiana aisladas de la rizósfera de Deschampsia antarctica Desv	Orellana P, Pavon A, Calisto Ulloa NC, Wiese G, Navarro L, Cortés Cortés	2022
Microbial community composition of terrestrial habitats in East Antarctica with a focus on microphototrophs	Ekaterina Pushkareva, Josef Elster, Sakae Kudoh, Satoshi Imura, Burkhard Becker	2024

Antimicrobianos		
Título	Autor(es)	Año
Cold-adapted microorganisms as a source of new antimicrobials Leandro A Sánchez,	Fiorella F Gómez, Osvaldo D Delgado	2008
Actividad inhibitoria del sobrenadante de la bacteria Antártica Pseudomonas sp. M19B en la formación de biopelículas de Flavobacterium psychrophilum 19749	Arely Leyton, Homero Urrutia, José Miguel Vidal, Mery de la Fuente, Manuel Alarcón, Germán Aroca, Gerardo González-Rocha y Katherine Sossa	2015
Líquenes antárticos: ¿una esperanza en la lucha contra bacterias multirresistentes?	Xabier Villanueva M., Angélica Casanova-Katny y Gerardo González-Rocha	2018
Evaluación del efecto antagonista de bacterias psicrotolerantes de la antártica sobre bacterias fitopatógenas de los géneros pseudomonas y xanthomonas	Sergio Leopoldo Bustamante Maturana	2021
Antarctic bacteria inhibit growth of food-borne microorganisms at low temperatures	Andrea O'Brien, Richard Sharp, Nicholas J. Russell, Sibel Roller	2024

Producción de metabolitos		
Título	Autor(es)	Año
Developments with Antarctic microorganisms: culture collections, bioactivity screening, taxonomy, PUFA production and cold-adapted enzymes.	Nichols D, Bowman J, Sanderson K, Nichols CM, Lewis T, McMeekin T, et al.	1999
Potential for Biodegradation	Gesheva V y Vasileva-	2003

of Hydrocarbons by Microorganisms Isolated from Antarctic Soils	Tonkova.	
Antarctic bacteria inhibit growth of food-borne microorganisms at low temperatures	O'Brien A, Sharp R, Russell NJ, Roller S.	2004
Marine Genomics. Bacterial diversity from benthic mats of Antarctic lakes as a source of new bioactive metabolites.	Di Prisco G	2008
Bioactive Metabolites Produced by Microorganisms Collected in Antarctica and the Arctic.	Bratchkova A y Ivanova V	2011
Antarctic Microorganisms as Source of the omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids.	Ana Clara Bianchi, Olazábal L, Torre A, Loperena L.	2014
Análisis de la producción en levadura antárticas de metabolitos crioprotectores y fotoprotectores con potencial aplicado	Villarreal Díaz, Pablo Alfonso.	2017
Actividad Antitumoral de pigmentos y metabolitos secundarios sintetizados por Bacterias Antárticas y Patagónicas	Cristian Ramón Tapia Herrera	2017
Antioxidant capacity of novel pigments from an Antarctic bacterium. Journal of Microbiology	Correa-Llantén DN, Amenábar MJ, Blamey JM.	2020
Application of Psychrotolerant Antarctic Bacteria and Their Metabolites as Efficient Plant Growth Promoting Agents	Michal Styczynski, Gabriel Biegniewski, Przemysław Decewicz, Bartosz Rewerski, Klaudia Debiec-Andrzejewska, Lukasz Dziewit	2022

Application of Psychrotolerant Antarctic Bacteria and Their Metabolites as Efficient Plant Growth Promoting Agents.	Styczynski M, Biegniowski G, Przemyslaw Decewicz, Bartosz Rewerski, Klaudia Debiec-Andrzejewska, Dziewit L.	2022
Identification of Antarctic Soil Bacteria Exhibiting Antiproliferative Activity against a Colon Cancer Cell Line.	Alequis Pavón, Corsini G, Orellana P, Calisto N, Navarro L, Wiese G, et al.	2023

Adaptación		
Título	Autor(es)	Año
Evolutionary origins of Antarctic microbiota: invasion, selection and endemism	Warwick F. Vincent	2004
Cold Adapted Microorganisms	Deep Chandra Suyal, Ravindra Soni, Ajar Nath Yadav, Reeta Goel	2021
El ADN revela microorganismos únicos evolucionados en los polos	Desconocido	2024

Investigación de nuevas especies		
Título	Autor(es)	Año
Caracterización de una nueva bacteria antártica, y estudio de una nueva vía de producción de dimetilsulfuro	Ornella Carrión Fonseca	2014

Descubren una nueva especie de bacteria en la Antártida	Wah Seng See-Too, Sergio Salazar, Robson Ee, Peter Convey, Kok-Gan Chan, Álvaro Peix	2017
---	--	------

Otros		
Título	Autor(es)	Año
Is bioprospecting a viable strategy for conserving tropical ecosystems	Christopher B Barrett, Travis J Lybbert	2000
Un mundo dominado por los microorganismos. Ecología microbiana de los lagos antárticos	Camacho, A., & Fernández-Valiente	2005
Diversity and enzyme properties of protease-producing bacteria isolated from sub-Antarctic sediments of Isla de Los Estados, Argentina	Nelda L Olivera, Cynthia Sequeiros, Marina L Nievas	2007
Ecology and bioprospecting	Andrew J. Beattie, Mark Hay, Bill Magnusson, Rocky de NYS, James Smeathers and Julian f. v. Vincent	2010
Antártida, la vida en el límite	Óscar García Álvarez, Julio Parapar Vegas y Ana Ramos Martos	2011
Glaciers and ice sheets as a biome	Alexandre M Anesio, Johanna Laybourn-Parry	2011
Effect of Temperature on Growth Rate and Protease Activity of Antarctic Microorganisms	Kim, Hyun-Do & Choi, Jong-Il	2014
Nanopartículas Sintetizadas por Bacterias Antárticas y sus Posibles Mecanismos de	Andrés Santos; Claudia Troncoso; Claudio Lamilla; Vicente Llanquinao; Mónica	2017

Síntesis	Pavez & Leticia Barrientos	
Bioprospecting in nicaragua: advances in search of agricultural, industrial and environmental application	L.A. Páramo-Aguilera, E.J. Fonseca-Cruz, H.D. Delgado-Silva, K.E. Cabistán-calderón, C.K. Ríos-Guevara	2018
Bioprospección	Susana Borrás Pentinat	--
The Ecological Role of Microorganisms in the Antarctic Environment	Susana Castro-Sowinski	2019
Biotecnología en Antártica une a científicos con diferentes objetivos	Lorenzo Palma	2020
La bioprospección como alternativa para la disminución de la contaminación ambiental producida por agroquímicos: aproximación del estado actual en Colombia	Claudia Patricia Cubides Guerra	2021
Identification of Antarctic Soil Bacteria Exhibiting Antiproliferative Activity Against a Colon Cancer Cell Line	Alequis Pavón, Gino Corsini, Paz Orellana, Nancy Calisto, Laura Navarro, Guillermo Wiese, Piedad Cortés-Cortés, Manuel Gidekel, Ana Gutierrez-Moraga, Lorena Salazar	2023
Ecological Characteristics of Antarctic Fungi	D A Nikitin	2023
Complete genome sequence data of an Antarctic bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. EM1 from the freshwater lake of the King George Island	Wan Shuhaida Wan Mahadi, Clemente Michael Vui Ling Wong, Kenneth Francis Rodrigues, Chui Peng Teoh, Herman Umbau Lindang, Cahyo Budiman	2024

7. DISCUSIÓN

La Antártida suele ser considerada un lugar inhóspito, ya que es un continente con condiciones climáticas extremadamente severas. Estas condiciones ambientales limitan la diversidad de seres vivos en comparación con otros entornos.

Aunque suele estar cubierto por una gruesa capa de hielo, durante la primavera y el verano austral, las severas condiciones ambientales se alivian, permitiendo el desarrollo de comunidades microbianas tanto en el plancton como en el bentos. Estas comunidades comprenden tanto bacterias autótrofas como heterótrofas, además de protistas fotosintéticos, mixótrofos y heterótrofos. Asimismo, los tapetes microbianos, constituidos en su mayoría por cianobacterias, conforman la comunidad béntica más representativa en los lagos y zonas inundadas de la Antártida. (39).

La exploración de los microorganismos antárticos ha captado la atención de diversas áreas de investigación, ya que estos organismos han demostrado notables capacidades tanto para sobrevivir en condiciones extremas como para ser utilizados en distintos campos científicos.

Las investigaciones en la Antártida han aumentado significativamente, ya que esta región es clave para la ciencia a nivel mundial. La creciente atención hacia la Antártida se debe en gran parte a la preocupación global por el calentamiento climático y sus impactos en este ecosistema único. Hay bacterias desconocidas en esta región que podrían representar un riesgo potencial para las personas, lo cual resalta la relevancia de la investigación en este campo. También, en la Antártida se presenta una ocasión especial para investigar la progresión de los microorganismos en entornos extremos, ofreciendo valiosa información científica (40).

El interés en aislar y estudiar microorganismos de entornos como fumarolas hidrotermales y ecosistemas antárticos ha experimentado un notable crecimiento. Estos microorganismos han desarrollado rutas metabólicas únicas y mecanismos de protección especializados para sobrevivir en las condiciones extremas presentes en dichos ambientes. Estos entornos, con altas presiones, temperaturas extremas y radiación intensa, han llevado a los microorganismos a desarrollar sorprendentes adaptaciones. Los microorganismos, incluidas las bacterias, que residen en estos entornos exhiben atributos bioquímicos y estructurales únicos que les posibilitan no solo subsistir, sino también desarrollarse en tales condiciones.

En estudios se muestra la importancia de las bacterias psicrófilas para estos ambientes, bacterias tales como *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Psychrobacter sp* poseen producción de sideróforos, los cuales desempeñan un papel importante en este ecosistema, ya que hay plantas que han desarrollado receptores que les permiten captar sideróforos bacterianos, los cuales les ayudan a la planta a tener una mayor captación de hierro, facilitándoles la síntesis de clorofila y otros procesos enzimáticos. Un ejemplo de ello es la Pioverdina producida por *Pseudomona*, el cual funciona como un antimicrobiano, que aumenta la competencia por el hierro entre microorganismos (24).

Las bacterias presentan una mayor dominancia en los ecosistemas antárticos debido a sus diferentes estrategias de adaptabilidad a las extremas condiciones del medio, teniendo así una mejor defensa o resistencia a los factores abióticos. Entre estas estrategias evidencian ajustes en la productividad enzimática y la fluidez en su membrana, que les permite soportar bajas temperaturas. Además, muchas bacterias pueden entrar en estado de latencia cuando las temperaturas bajan más de lo usual, tienen una gran capacidad de tolerar altos niveles de UV a través de pigmentos que ellas mismas producen, soportan elevados índices de sal, resistir variaciones de pH, y entre otras estrategias también tienen una gran resistencia a metales pesados, relacionándose con la capacidad de sintetizar nanopartículas, debido a la maquinaria metabólica que se expresa en las bacterias bajo estas condiciones de estrés, lo que les ayuda a sobrevivir con otro tipo de nutrientes (25).

Otro factor que contribuye a su predominancia son las interacciones bióticas, ya que con la producción de antimicrobianos compiten con otros microorganismos por los recursos del medio. Por ejemplo, *Arthrobacter agilis* produce péptidos de tiazolilo cíclicos que actúan como antibacterianos a bajas temperaturas (16).

Por esa razón, se cree que estos microorganismos que provienen de entornos extremos podrían ser una valiosa fuente de biopolímeros y enzimas con propiedades y funciones innovadoras. Estas biomoléculas singularmente especiales tienen el potencial de ser aprovechadas en diversos procesos biotecnológicos, desde la creación de materiales avanzados hasta su uso en medicina y bioremediación. Por ejemplo, los biopolímeros derivados de estos microorganismos podrían ser empleados para la creación de nuevos materiales capaces de resistir condiciones extremas, al mismo tiempo que las enzimas podrían utilizarse en procesos industriales que demandan

catalizadores resistentes y eficaces. Esta estabilidad resulta sumamente fascinante desde el punto de vista científico, dado que podría ofrecer valiosa información acerca de cómo las proteínas y otros elementos celulares podrían ser adaptados o alterados para soportar condiciones extremas (40).

Con el paso del tiempo, se ha logrado descubrir más acerca de la adaptabilidad de los microorganismos a estas condiciones extremas, lo que permite entender cómo y por qué desarrollan estas capacidades. Muchos de estos descubrimientos han revelado cómo, ante situaciones de estrés y de competencia, los microorganismos producen enzimas, lípidos y compuestos antimicrobianos, los cuales podrían tener aplicaciones futuras en industrias farmacéuticas, alimentarias y ambientales. Además, brinda la oportunidad de comparar estas estrategias con las de microorganismos que sobreviven en otros tipos de ambientes, lo que a su vez nos ayuda a comprender el resultado evolutivo a lo largo de millones de años. Por ejemplo, en el libro *Marine Genomics*, se realizó un estudio sobre las bacterias bentónicas de los lagos antárticos, identificando nuevos metabolitos bioactivos que contribuyen al desarrollo de antibióticos novedosos (16). Además, se han encontrado microorganismos antárticos capaces de degradar hidrocarburos, útiles para el tratamiento de suelos contaminados. Este uso se documenta en el estudio de Gesheva y Vasileva-Tonka, donde los microorganismos antárticos actúan como biorremediadores de suelos afectados por hidrocarburos (12).

La adaptación de estos microorganismos es una herramienta que podemos aprovechar de diferentes formas, por ejemplo, se descubrió una bacteria pueda producir compuesto con actividad antitumoral abre muchas posibilidades para el desarrollo de todo lo que tiene que ver con industria farmacéutica, ya sea para el tratamiento y terapias en enfermedades como el cáncer, esto de una forma más natural y evaluando la posibilidad de tener menos efectos secundarios que otros medicamentos que ya se usen para estas enfermedades, así como se habla en el artículo de Pavón, A., et al., bacterias del suelo antártico presentan actividad antiproliferativa contra una línea celular de cáncer de colon. La eficacia antiproliferativa de extractos crudos de estas bacterias contra células LoVo se analizó utilizando el ensayo de reducción metabólica MTT. De las 55 bacterias analizadas, el 3.6% secretó moléculas bioactivas que inhibieron la proliferación celular y demostraron una notable disminución en la viabilidad de células cancerosas. Este estudio representa la primera evidencia de una bacteria rizosférica de *Deschampsia antarctica*

que produce metabolitos capaces de inhibir la proliferación celular en una línea de adenocarcinoma colorrectal. Este tipo de bioprospección puede sacar medicamentos innovadores que ayuden a mejorar la calidad de vida de las personas (25).

La industria alimentaria también se ha beneficiado de estos estudios. Investigaciones realizadas por O'Brien, Sharp, Russell y Roller han demostrado que las bacterias antárticas pueden producir compuestos antimicrobianos activos en frío, lo que mejora la conservación de alimentos refrigerados (13). Además, el estudio de Bustamante Maturana evaluó los efectos antagonistas de bacterias psicrotolerantes antárticas sobre fitopatógenos de los géneros *Pseudomonas* y *Xanthomonas*, demostrando que, junto con el hidróxido de cobre, reducen significativamente el daño causado por estas bacterias patógenas (23). Estos y muchos otros estudios realizados en las últimas décadas han demostrado que los microorganismos antárticos merecen ser estudiados y considerados para avances científicos significativos.

La bioprospección de microorganismos antárticos ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, lo que ha permitido una mejor comprensión de sus usos y aplicaciones. Dentro de los avances más destacados se incluyen las avanzadas técnicas de secuenciación genómica, ya sea parcial o completa, empleadas para la clasificación taxonómica de dichos microorganismos (41). Estas técnicas involucran la extracción del material genético para su análisis, acompañado de información fisiológica y metabólica disponible. Este enfoque integrado ha permitido identificar y clasificar nuevos microorganismos con mayor precisión, lo que ha ampliado nuestra comprensión sobre la diversidad microbiana en la Antártida y sus posibles aplicaciones en biotecnología.

Han realizado diversas investigaciones con sedimentos de diferentes áreas de la Antártida para indagar en la presencia de estos microorganismos. Como se detalla en el libro "Antártida. La vida en el límite. Las expediciones Bentart" resumen dos décadas de investigación española en el bentos antártico (42). Cada investigador aborda el procesamiento de estos sedimentos de forma especializada con el objetivo de identificar características, enzimas y proteínas que contienen información valiosa para ser aplicada en el futuro. Estos estudios han revelado propiedades únicas y posibles aplicaciones prácticas de los microorganismos antárticos, ampliando nuestra comprensión y capacidad de aprovechar estos recursos naturales.

En el desafiante medio antártico, los microorganismos han evolucionado con adaptaciones bioquímicas asombrosas para garantizar su supervivencia. Una de estas adecuaciones consiste en la producción de antibióticos y toxinas para disminuir la competencia por recursos. Un ejemplo destacado sería la acumulación de pigmentos, brindando así protección ante la intensa radiación UV. En una investigación, se identificaron 723 bacterias procedentes de la Antártida, entre las cuales 122 demostraron poseer propiedades antimicrobianas frente a *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecium* y *Escherichia coli*. Al dividir estas cepas, se hallaron nuevos compuestos antibacterianos, como potenciales péptidos de tiazolilo cíclico producidos por *Arthrobacter agilis* (16).

En una investigación diferente, se estudió el patógeno *Flavobacterium psychrophilum*, una bacteria psicrófila que perjudica a los peces y provoca considerables pérdidas económicas en especies de acuicultura como el salmón y la trucha. El uso desmedido de antibióticos ha generado un incremento en la resistencia bacteriana, por lo que las investigaciones en la Antártida se han orientado hacia la búsqueda de nuevos compuestos con propiedades antimicrobianas. En este estudio, se analizaron 67 sobrenadantes de bacterias antárticas, de los cuales 18 mostraron un fuerte efecto inhibidor de biopelículas. El sobrenadante del aislamiento M19B fue el más efectivo, inhibiendo significativamente la formación de biopelículas de *F. psychrophilum*. La identificación molecular del aislamiento M19B reveló un 99% de identidad con *Pseudomonas fragi* (21).

Adicionalmente, otro estudio destacó el papel de las bacterias antárticas como promotoras del crecimiento vegetal. Las cepas *Pseudomonas sp.* ANT_H12B, *Psicobacteria sp.* ANT_H59 y *Bacillus sp.* ANT_WA51, aisladas de muestras de suelo de la Isla Rey Jorge, mostraron características extremófilas notables. Estas cepas pueden crecer en un amplio rango de temperaturas y niveles de salinidad, y demostraron ser activas en diversos rangos de pH. Además, algunas cepas fueron capaces de disolver compuestos inorgánicos de fósforo, degradar celulosa y producir hormonas vegetales como el ácido indol acético (IAA), lo que las hace potencialmente útiles para la promoción del crecimiento de las plantas (12).

Por otro lado, el papel de *Rhodovulum sulfidophilum* al catalizar la oxidación de dimetilsulfuro o *Methylophaga thiooxydans*, la cual posee ruta de oxidación para el DMS, brindan oportunidades

para la regulación del clima, lo que ayuda a desarrollar planes de mitigación al cambio climático, en la tesis de Fonseca O. Se explica que el dimetilsulfuro se oxida cuando ya se encuentra en la atmósfera, atrayendo gotas de lluvia que actúan como núcleos de condensación en las nubes disminuyendo la temperatura global del planeta, con este conocimiento se destaca la importancia del funcionamiento de las bacterias psicrófilas en estos entornos para aprovechar su potencial en esta área de bioprospección (40).

Se ha visto que hay muchos desafíos relevantes en la bioprospección de microorganismos antárticos. Entre estos desafíos tenemos la realización de excursiones en climas extremos, que requieren de permisos para el acceso, transporte especializado, equipo apropiado y una recopilación minuciosa de las muestras. Estos elementos poseen costos importantes que se deben solventar. Asimismo, adquirir y extraer microorganismos antárticos es difícil debido a que las condiciones climáticas complican el proceso (43). Por otro lado, cabe destacar que a pesar de encontrar una gran cantidad de diferentes microorganismos, no todos son cultivables en un laboratorio.

Un factor importante a tener en cuenta son las limitaciones en cuanto a la tecnología. Las técnicas que normalmente se usan para cultivar microorganismos no son apropiadas para los microorganismos extremófilos, debido a que no se puede replicar las condiciones ambientales en las que usualmente se encuentran y tampoco hay medios especiales para su crecimiento (42). Aunque hay un progreso en la genómica y la transcriptómica que han mejorado la identificación de estos microorganismos, todavía enfrentamos grandes limitaciones.

Está claro que los avances tecnológicos han ayudado al reconocimiento y estudio de los microorganismos antárticos. Sin embargo, aún hay obstáculos por superar, entre estos está la creación de medios especiales que permitan desarrollar los estudio de estos microorganismos en laboratorios y la adecuación de métodos de cultivo, ya que estos microorganismos al estar adaptados a otro medio, necesitan diferentes concentraciones de nutrientes en comparación con los microorganismos que encontramos de manera habitual. Es fundamental continuar con las investigaciones y la mejora de nuevas herramientas tecnológicas para confrontar los desafíos

y explotar al máximo el potencial biotecnológico de los microorganismos antárticos.

8. CONCLUSIONES

- Se lograron determinar qué géneros de bacterias destacaron en las investigaciones por las áreas en las cuales tienen potencial, tales como *Cellulophaga*, *Pibocella*, *Polaribacter*, *Shewanella*, *Pseudomonas* y *Arthrobacter agilis*. Así mismo, la revisión también evidenció la importancia de los líquenes antárticos y el potencial que podrían desempeñar en bioprospección, especialmente en la industria farmacéutica. Por otro lado, los hongos también tienen un papel relevante, pues se encontraron del tipo *Ascomycota*, *Basidiomycetos*, hongos filamentosos como *Aspergillus fumigatus* y levaduras como *Pseudozyma antarctica*, *Leuconeurospora sp.*, *Rh. glacialis* y *Rh. mucilaginoso*. Estos estudios demuestran que, a pesar de las condiciones extremas que nos ofrece la Antártida, numerosas especies se han ido adaptando de diferentes maneras, ofreciendo un gran valor en la bioprospección.

- Tres décadas atrás, las investigaciones en la Antártida se centraban especialmente en el reconocimiento y la taxonomía de los microorganismos que se encontraban en ambientes de altas temperaturas. Sin embargo, a medida que ha pasado el tiempo esta perspectiva ha cambiado. La identificación ha quedado en segundo lugar y las investigaciones se han enfocado en la comprensión de las actividades metabólicas de estos microorganismos y las capacidades que ofrecen sus compuestos bioactivos como tiopéptidos y sideróforos. Todos estos compuestos son favorables para la biorremediación de los suelos, industrias relacionadas a la salud, ambientales y alimentarias. Además, se descubrieron enzimas, como las β -galactosidasa, amilasas, proteasas, con un alto potencial tecnológico, generando ácidos grasos beneficiosos para la salud humana, sintetizando nanopartículas y utilizando metabolitos para mejorar las condiciones ambientales.

- Los microorganismos han desarrollado mecanismos de supervivencia inigualables debido a los factores abióticos que se evidencian en estos ecosistemas, como las bajas temperaturas, la alta radiación UV, la salinidad y la falta de nutrientes. Dentro de estos mecanismos se incluyen la

elaboración de enzimas que funcionan a bajas temperaturas, la capacidad de tolerar elevados niveles de sal y la producción de pigmentos que le sirven de protección contra la radiación UV. Por otro lado, la competencia por nutrientes y las interacciones con otros microorganismos, son un reflejo de los factores bióticos, los cuales favorecen la adaptación de estos microorganismos a través de la elaboración de metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas. Estas adaptaciones no solo se limitan a la perspectiva científica, sino que también son necesarias para la implementación en las diferentes industrias.

- Incluso con los grandes avances en estudios que tienen relación con los microorganismos antárticos y su aplicación en diferentes áreas, aún persisten importantes desafíos en la exploración de lugares como la Antártida. Es importante considerar las posibilidades en cuanto a los costos asociados con estas exploraciones, así como en los métodos de genómica y biotecnología, los cuales también necesitan de una maquinaria apropiada y un personal calificado para llevarlo a cabo. Asimismo, se debe tener en cuenta la demanda de medios y las herramientas para el adecuado manejo de estos microorganismos, ya que actualmente no hay protocolos que garanticen su conservación durante los experimentos. Estos factores son de suma importancia para fortalecer el potencial de una investigación realizada en esta región.

9. REFERENCIAS

- 1) Press E. El ADN revela microorganismos únicos evolucionados en los polos [Internet]. <https://www.cronica.com.mx/>. 2024 [cited 2024 Jul 12]. Available from: <https://www.cronica.com.mx/academia/adn-revela-microorganismos-unicos-evolucionados-polos.html>
- 2) Tindall BJ. Prokaryotic Diversity in the Antarctic: the Tip of the Iceberg. Microbial Ecology. 2004 Apr;47(3).
- 3) Torres s, Avendaño y. Evaluación de la diversidad bacteriana procedente de agua marina antártica utilizando microbiología convencional proyecto requisito para optar por el título de bacteriólogo y laboratorista clínico estudiantes: Sara Gabriela Torres Cortés Yuly Vanessa Avendaño Osorio Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca facultad de ciencias de la salud programa de bacteriología y laboratorio clínico bogotá, 2019 [Internet]. Available from: <https://repositorio.unicolmayor.edu.co/bitstream/handle/unicolmayor/3534/EVALUACION%20DE%20LA%20DIVERSIDAD%20BACTERIANA%20PROCEDENTE%20DE%20AGUA%20MARINA%20ANTARTICA%20UTILIZANDO%20MICROBIOLOG.pdf?isAllowed=y&sequence=2>
- 4) Orellana P, Pavon A, Calisto Ulloa NC, Wiese G, Navarro L, Cortés Cortés P, et al. Identificación de bacterias antárticas con actividad antimicrobiana aisladas de la rizosfera de *Deschampsia antarctica* Desv. Anales del Instituto de la Patagonia. 2022 Jul 22;
- 5) Bezus B. Bioprospección De Enzimas De Interés Biotecnológico Producidas Por Levaduras antárticas: producción, Caracterización Y Aplicaciones Industriales [Internet]. sedici.unlp.edu.ar. 2023 [cited 2024 Jul 12]. Available from: <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/148017>
- 6) INACH . Líquenes antárticos: ¿una esperanza en la lucha contra bacterias multirresistentes? [Internet]. 2018 [cited 2024 May 14]. Available from: <https://www.inach.cl/liquenes-antarticos-una-esperanza-en-la-lucha-contra-bacterias-multirresistentes/>

- 7) Instituto Antártico Chileno. INACH | El Potencial Farmacológico De Los Líquenes Antárticos En La Lucha Contra Las Enfermedades Neurodegenerativas [Internet]. INACH. 2018 [cited 2024 Jul 12]. Available from: <https://www.inach.cl/el-potencial-farmacologico-de-los-liquenes-antarticos-en-la-lucha-contra-las-enfermedades-neurodegenerativas/>
- 8) Wynn-Williams DD. Antarctic Microbial diversity: the Basis of Polar Ecosystem Processes. *Biodiversity and Conservation*. 1996 Nov;5(11):1271–93.
- 9) Vincent WF. Evolutionary Origins of Antarctic microbiota: invasion, Selection and Endemism. *Antarctic Science* [Internet]. 2000 Sep 1 [cited 2022 Jul 23];12(3):374–85. Available from: <https://www.cambridge.org/core/journals/antarctic-science/article/evolutionary-origins-of-antarctic-microbiota-invasion-selection-and-endemism/55255BB04E38BD235A517FF6D52197A8>
- 10) Nichols D, Bowman J, Sanderson K, Nichols CM, Lewis T, McMeekin T, et al. Developments with Antarctic microorganisms: culture collections, bioactivity screening, taxonomy, PUFA production and cold-adapted enzymes. *Current Opinion in Biotechnology*. 1999 Jun;10(3):240–6.
- 11) David S. Nichols, Kevin Sanderson, Alex Buia, Jodie van de Kamp, Paul Holloway, John P. Bowman, Matthew Smith, Carol Mancuso Nichols, Peter D. Nichols and Tom A. McMeekin . *Bioprospecting and Biotechnology in Antarctica* [Internet]. The Antarctic: Past, Present and Future. 2002.
- 12) Gesheva V, Vasileva-Tonkova E. Potential for Biodegradation of Hydrocarbons by Microorganisms Isolated from Antarctic Soils [Internet]. Degruyter. 2003. Available from: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/znc-2004-1-227/html>
- 13) O'Brien A, Sharp R, Russell NJ, Roller S. Antarctic bacteria inhibit growth of food-borne microorganisms at low temperatures. *FEMS Microbiology Ecology*. 2004 May;48(2):157–67.
- 14) Olivera NL, Sequeiros C, Nievas ML. Diversity and enzyme properties of protease-producing bacteria isolated from sub-Antarctic sediments of Isla de Los Estados,

Argentina. *Extremophiles*. 2007 Feb 15;11(3):517–26.

- 15) Murray AE, Grzyski JJ. Diversity and genomics of Antarctic marine microorganisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2007 May 21;362(1488):2259–71.
- 16) Di Prisco G. Marine Genomics. Bacterial diversity from benthic mats of Antarctic lakes as a source of new bioactive metabolites. Luporini P, Tutino L, Verde C, editors. Vol. 2. Naples; 2008.
- 17) Bratchkova A, Ivanova V. Bioactive Metabolites Produced by Microorganisms Collected in Antarctica and the Arctic. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* [Internet]. 2011 Jan;25(sup1):1–7. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5504/BBEQ.2011.0116>
- 18) Correa-Llantén DN, Amenábar MJ, Blamey JM. Antioxidant capacity of novel pigments from an Antarctic bacterium. *Journal of Microbiology* (Seoul, Korea) [Internet]. 2012 Jun 1 [cited 2020 Sep 23];50(3):374–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22752899/>
- 19) Ana Clara Bianchi, Olazábal L, Torre A, Loperena L. Antarctic Microorganisms as Source of the omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. 2014 Jan 29;30(6):1869–78.
- 20) Kim H, Choi J. Effect of Temperature on Growth Rate and Protease Activity of Antarctic Microorganisms. Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Republic of Korea. *Korean Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2014.
- 21) Leyton A, Urrutia H, Vidal JM, Fuente M de la, Alarcón M, Aroca G, et al. Actividad Inhibitoria Del Sobrenadante De La Bacteria Antártica *Pseudomonas* sp. M19B En La Formación De Biopelículas De *Flavobacterium Psychrophilum* 19749. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* [Internet]. 2015 Aug 2;50(2):375–81. Available from: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-19572015000300016

- 22) Santos A, Troncoso C, Lamilla C, Llanquiao V, Pavez M, Barrientos L. Nanopartículas Sintetizadas Por Bacterias Antárticas Y Sus Posibles Mecanismos De Síntesis. *International Journal of Morphology* [Internet]. 2017 Mar;35(1):26–33. Available from: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022017000100005
- 23) Bustamante Maturana sl. Evaluación del efecto antagonista de bacterias psicrotolerantes de la antártica sobre bacterias fitopatógenas de los géneros pseudomonas y xanthomonas [Internet]. 2021 [cited 2024 Mar 4] p. 36. Available from: <http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/11477/1/BUSTAMANTE%20%282021%29%20EVALUACI%c3%93N%20DEL%20EFECTO%20ANTAGONISTA%20DE%20BACTERIAS%20PSICROTOLERANTES%20DE%20LA%20ANT%20%28RTICA%20SOBRE%20BACTERIAS%20FITOPAT%20%28GENAS%20DE%20LOS%20G%20%28NEROS%20PSEUDOMONAS%20Y%20XANTHOMONAS.pdf>
- 24) Styczynski M, Bieganski G, Przemyslaw Decewicz, Bartosz Rewerski, Klaudia Debiec-Andrzejewska, Dziewit L. Application of Psychrotolerant Antarctic Bacteria and Their Metabolites as Efficient Plant Growth Promoting Agents. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022 Feb 24;10.
- 25) Alequis Pavón, Corsini G, Orellana P, Calisto N, Navarro L, Wiese G, et al. Identification of Antarctic Soil Bacteria Exhibiting Antiproliferative Activity against a Colon Cancer Cell Line. *International Journal of Morphology* [Internet]. 2023 Feb 1;41(1):286–96. Available from: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95022023000100286&lang=es
- 26) Hayden C. Bioprospecting: The “Promise” and Threat of the Market. *NACLA Report on the Americas*. 2006 Mar;39(5):26–31.
- 27) Beattie AJ, Hay M, Magnusson B, de NYS R, Smeathers J, Vincent JFV. Ecology and bioprospecting. *Austral Ecology* [Internet]. 2010 Aug 19;36(3):341–56. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3380369/>

- 28) Barrett CB, Lybbert TJ. Is bioprospecting a viable strategy for conserving tropical ecosystems? *Ecological Economics*. 2000 Sep;34(3):293–300.
- 29) Bacterias antárticas contra la resistencia a antibióticos [Internet]. INACH . 2014 [cited 2024 Aug 3]. Available from: <https://www.inach.cl/bacterias-antarticas-contra-la-resistencia-a-antibioticos/>
- 30) Aguilera P. La Bioprospección En Nicaragua: Avances En La Búsqueda De Aplicaciones agrícolas, Industriales Y ambientales. *Nexo, Revista Científica*. 2018.
- 31) Roche I. enciclopedia de bioderecho y bioética [Internet]. enciclopedia-bioderecho.com. Available from: <https://enciclopedia-bioderecho.com/voces/47>
- 32) Nikitin DA. Ecological Characteristics of Antarctic Fungi. *Doklady biological sciences: proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, Biological sciences sections* [Internet]. 2023 Feb 1 [cited 2024 Mar 9];508(1):32–54. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37186046/#:~:text=The%20dominant%20fungal%20division%20on>
- 33) Castro-Sowinski S. The Ecological Role of Micro-organisms in the Antarctic Environment [Internet]. *Springer polar sciences*. Springer Nature (Netherlands); 2019. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-02786-5>
- 34) Deep Chandra Suyal, Soni R, Ajar Nath Yadav, Goel R. Cold Adapted Microorganisms. *CRC Press eBooks*. 2021 Feb 17;(1st Edition):177–91.
- 35) Mariana Elizabeth Danilovich, Sanchez LFM, Federico Pulido Acosta, Osvaldo Daniel Delgado. Antarctic bioprospecting: in pursuit of microorganisms producing new antimicrobials and enzymes. *Springer Link*. 2018 Mar 7;41(7):1417–33.
- 36) Baque Gutiérrez AG, Vargas Rodríguez MN. Microorganismos Con Potencial En La Solubilización De Fosfato Tricálcico Y Roca Fosfórica Aislados De Suelos De La Antártida [Internet]. *dspace.ups.edu.ec*. 2023 [cited 2024 May 4]. Available from: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26260>.
- 37) Para T, Al O, De G, En M, Ramón C, Herrera T, et al. Actividad Antitumoral de

- pigmentos y metabolitos secundarios sintetizados por Bacterias Antárticas y Patagónicas [Internet]. 2017. Available from: http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/2803/3/Tesis_Actividad_antimural.pdf
- 38) Villarreal Díaz PA. Análisis De La Producción En Levadura Antárticas De Metabolitos Crioprotectores Y Fotoprotectores Con Potencial Aplicado. repositoriouchilecl [Internet]. 2017 [cited 2024 May 14]; Available from: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194168?show=full>.
- 39) Camacho A, E. Fernández-Valiente. Un mundo dominado por los microorganismos. Ecología microbiana de los lagos antárticos.: Ecosistemas [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 18];14(2). Available from: <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/155>
- 40) Fonseca O. Caracterización de una nueva bacteria antártica, y estudio de una nueva vía de producción de dimetilsulfuro [Internet]. 2014 [cited 2024 Jul 18]. Available from: https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/59323/1/OCF_TESIS.pdf
- 41) Palma L. Biotecnología en Antártica une a científicos con diferentes objetivos [Internet]. Ciencia en Chile. 2020 [cited 2024 Jul 18]. Available from: <https://www.cienciaenchile.cl/biotecnologia-en-antartica-une-a-cientificos-con-diferentes-objetivos/>
- 42) Salazar-Vallejo SI. Antártida. La vida en el límite. Las expediciones Bentart. Revista de biología marina y oceanografía. 2011 Dec 1;46(3):499–500.
- 43) Patricia C, Guerra C, De Ciencias E, Pecuarias A, Del Y, Ambiente M. La bioprospección como alternativa para la disminución de la contaminación ambiental producida por agroquímicos: aproximación del estado actual en Colombia [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 18]. Available from: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/44442/cpcubidesg.pdf?sequence=1>
- 44) Ekaterina Pushkareva, Elster J, Sakae Kudoh, Imura S, Becker B. Microbial community composition of terrestrial habitats in East Antarctica with a focus on

microphototrophs. *Frontiers in Microbiology*. 2024 Jan 5;14.

- 45) Mahadi WSW, Wong CMVL, Rodrigues KF, Teoh CP, Lindang HU, Budiman C. Complete genome sequence data of an Antarctic bacterium *Arthrobacter* sp. EM1 from the freshwater lake of the King George Island. *Data in Brief* [Internet]. 2024 Feb 1 [cited 2024 Mar 2];52:109841. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923009034?via%3Dihub>
- 46) DiCYT. Descubren una nueva especie de bacteria en la Antártida [Internet]. Agencia SINC. 2017 [cited 2024 Mar 5]. Available from: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Descubren-una-nueva-especie-de-bacteria-en-la-Antartida>
- 47) LA, Gómez FF, Delgado OD. Cold-adapted microorganisms as a source of new antimicrobials. *Extremophiles*. 2008 Nov 18;13(1):111–20.
- 48) Anesio AM, Laybourn-Parry J. Glaciers and Ice Sheets as a Biome. *Trends in Ecology & Evolution* [Internet]. 2012 Apr;27(4):219–25. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22000675/>
- 49) Bjorn, Elie Verleyen, Obbels D, Peeters K, Aaike De Wever, Sofie D'hondt, et al. Bacterial Diversity Assessment in Antarctic Terrestrial and Aquatic Microbial Mats: a Comparison between Bidirectional Pyrosequencing and Cultivation. *PLOS ONE* [Internet]. 2014 Jun 2 [cited 2023 Nov 5];9(6):e97564–4. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4041716/>