

Original

Distribución geográfica y potencial biotecnológico de hongos filamentosos cultivables en suelos de la Bahía de Fildes (Antártica)

Geographical Distribution and Biotechnological Potential of Cultivable Filamentous Fungi in Soils of Fildes Bay (Antarctica)

Victor Gallardo^{1,2}

¹Doctorado en Ciencias de Recursos Naturales, Universidad de La Frontera, 4811-230 Temuco, Chile

²Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 84017-220 Ponta Grossa, PR, Brasil

Marcela Sepúlveda¹

¹Doctorado en Ciencias de Recursos Naturales, Universidad de La Frontera, 4811-230 Temuco, Chile

Jéssica Costa³

³Departamento de Biologia, Instituto de Ciências Biológicas-ICB, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil

Paula Galeano⁴

⁴Facultad de Ciencias Básicas, Programa de Química, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia

Pablo Cornejo⁵

⁵Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agronómicas y de los Alimentos, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Quillota, Chile.

Cledir Santos^{2,6}

²Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 84017-220 Ponta Grossa, PR, Brasil

⁶Departamento de Ciencias Químicas y Recursos Naturales, Universidad de La Frontera, 4811-230 Temuco, Chile

Autor de correspondencia: Dr. Cledir Santos. cledir.santos@ufrontera.cl

Enviado: 10/10/2023

Aprobado: 23/11/2023

Conflictos de interés: los autores declaran NO tener conflictos de interés

DOI: 10.22370/bolmicol.2024.39.1.4438

Palabras clave: Ambientes extremos; hongos psicrófilos; suelos antárticos

Keywords: Antarctic Soils; Extreme Environments; Psychrophilic Fungi

Resumen

En el territorio Antártico, solo el 0,35% de su superficie está libre de hielo. La Bahía de Fildes es una de estas áreas destacadas, debido a su ubicación geográfica y mejores condiciones ambientales, en comparación al continente Antártico. La Bahía de Fildes es un sitio ideal para estudiar microorganismos, como los hongos filamentosos (HF). Los HF desarrollan rutas bioquímicas únicas y biomoléculas necesarias para su supervivencia. Sin embargo, para conocer su potencial biotecnológico, es obligatorio conocer la diversidad de HF presentes. El objetivo principal de este estudio fue aislar e identificar cepas de hongos filamentosos cultivables desde suelos de la Bahía de Fildes (Isla Rey Jorge, Antártica). Catorce muestras de suelos se recolectaron de diferentes sectores de la Bahía de Fildes, y se les realizaron análisis químicos. Posteriormente se suspendieron en agua y se inocularon en 3 medios de cultivos diferentes. Los HF se purificaron e identificaron de acuerdo con la taxonomía clásica. Los suelos mostraron una composición química heterogénea y capacidad para albergar HF. Los suelos de la Bahía de Fildes poseen propiedades químicas similares a los suelos minerales, aunque las variaciones en la relación C/N y nutrientes sugieren influencias externas de origen natural. En total, se aislaron 1756 HF, identificándose los géneros *Cladosporium*, *Penicillium*, *Pseudogymnoascus*, cepas de la división Mucoromycota y de otros cuatro géneros no identificados. El estudio resalta la capacidad de los HF para adaptarse a condiciones ambientales extremas, así como su potencial biotecnológico. Este trabajo representa el primer informe a gran

escala, sobre el aislamiento de hongos en la Bahía de Fildes, Antártica.

Abstract

In the Antarctic territory, only 0.35% of its surface is ice-free. Fildes Bay is one of these notable areas, due to its geographical location and better environmental conditions when compared to the Antarctic continent. Fildes Bay is an ideal site for studying microorganisms, such as filamentous fungi (FF). FF develop unique biochemical pathways and biomolecules necessary for their survival. However, it is essential to know the diversity of FF to understand their biotechnological potential. The main objective of this study was to isolate and identify cultivable strains of filamentous fungi from soils in Fildes Bay (King George Island, Antarctica). Fourteen soil samples were collected from different sectors of Fildes Bay and underwent chemical analysis. Subsequently, samples were suspended in water and inoculated in three different culture media. FF were purified and identified according to classical taxonomy. The soils showed heterogeneous chemical composition and capacity to harbour FF. The soils of Fildes Bay have chemical properties similar to mineral soils, although variations in the C/N ratio and nutrients suggest external influences of natural origin. A total of 1756 FF were isolated, identifying the genera *Cladosporium*, *Penicillium*, *Pseudogymnoascus*, strains of the Mucoromycota division, and four other unidentified genera. The study highlights the ability of FF to adapt to extreme environmental conditions, as well as their biotechnological potential. This work

represents the first large-scale report on the isolation of fungi in Fildes Bay, Antarctica.

Introducción

La Antártica es un lugar único en el mundo, con condiciones ambientales extremas que incluyen bajas temperaturas, fuertes vientos, alta radiación solar y ecosistemas con baja disponibilidad de nutrientes. Tales características han influenciado la evolución y el aislamiento del territorio durante los últimos 100 millones años (Rogers, 2007; Kim et al., 2019; Gallardo et al., 2023; 2024). Del total de la superficie que compone el territorio Antártico, sólo el 0,35% (45.000 km²) está libre de hielo, que a su vez se divide en 8 Regiones libres de hielo. La península Antártica y sus islas costeras (región 8) representan el segundo lugar con mayor superficie libre de hielo, del cual destaca la Bahía de Fildes. La Bahía de Fildes es un sector compuesto por el extremo Este de la Isla Rey Jorge y el extremo Oeste de la Isla Nelson, separadas por el estrecho de Fildes.

La Bahía de Fildes representa un sector apropiado para el estudio de la biodiversidad y evolución de microorganismos, como por ejemplo los hongos filamentosos. Tal característica es debida a su ubicación geográfica y mejores condiciones ambientales, en comparación del continente Antártico (So et al., 2023). Los hongos filamentosos, para sobrevivir en condiciones tan extremas, deben desarrollar rutas bioquímicas únicas. Además, deben tener la capacidad de generar compuestos específicos para su sobrevivencia, algunos de los cuales pueden presentar relevancia biotecnológica.

De acuerdo con Santhaseelan et al. (2022), el potencial bioactivo de los compuestos (ej.: pigmentos, proteínas, péptidos, lípidos) obtenidos de microorganismos de ambientes extremos, puede llegar a ser una alternativa a los fármacos y pesticidas sintéticos actualmente disponibles (Walters et al., 2004). Antes de acceder a su potencial biotecnológico, es indispensable conocer las especies de hongos presentes en el ambiente natural y sus condiciones de origen (Godinho et al., 2013; Krishnan et al., 2018; Gallardo et al., 2023; 2024). Dada la información recopilada, el objetivo principal de este estudio fue aislar e identificar cepas de hongos filamentosos cultivables desde suelos antárticos de la Bahía de Fildes, Antártica.

Metodología

Un total de 14 muestras de suelos se recolectaron mediante un transecto de 4x25 m a una profundidad de 0-20 cm en diferentes áreas geográficas de la Bahía de Fildes, una zona costera de la Isla Rey Jorge y la Isla Nelson, ubicada en la región 8 de las zonas libres de hielo (Figura 1). Los análisis químicos de suelos fueron realizados de acuerdo con lo descritos por Chávez et al. (2020).

Las muestras de suelo S1 a S14 (Figura 1) se suspendieron en agua destilada estéril y se realizaron diluciones sucesivas. Se prepararon suspensiones acuosas de suelo a una concentración de 1:10000 g/mL. Cada suspensión se inoculó en placas de Petri que contenían: a) Agar Papa Dextrosa suplementado con cloranfenicol (APD: 4 g/L de extracto de papa, 20 g/L de glucosa, 15 g/L de agar, 0,1 g de cloranfenicol); b) Agar Dicloran Glicerol 18% suplementado con

cloranfenicol (DG18: Glicerol 18%, 1 g/L KH_2PO_4 , 0,5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 5 g/L Peptona micológica, 0,002 g/L Diclorán, 15 g de agar, 10 g/L de glucosa, 0,1 g cloranfenicol); y c) Agar Diclorán Rosa de Bengala Cloranfenicol (DRBC: 1 g/L KH_2PO_4 , 0,5 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 5 g/L Peptona micológica, 0,002 g/L Diclorán, 15 g/L Agar, 10 g/L de glucosa, 0,025 g/L de rosa de Bengala, 0,1 g/L cloranfenicol) (Cruz et al., 2013). Las placas de Petri se incubaron a 10 °C durante 30 días en la oscuridad. Para purificar los aislados de hongos, se transfirieron fragmentos de colonias de hongos a placas de Petri que contenían medio APD y se incubaron a 10 °C durante 30 días.

La identificación morfológica de las cepas aisladas se realizó según la taxonomía macro y micro morfológica clásica, de acuerdo con las claves taxonómicas y guías disponibles para cada grupo taxonómico de hongos (Kozakiewicz, 1989; Pitt, 1991; Samson & Frisvad, 2004; Simões et al., 2013; Hoog et al., 2024). Las cepas aisladas fueron preservadas usando una solución de glicerol 15%, bajo los métodos de criopreservación a -80 °C y de Castellani (Simões et al., 2013) en el Banco de Recursos Microbiológicos, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de La Frontera (WDCM 1283).

Resultados

Propiedades químicas de los suelos de la Bahía de Fildes

Las muestras de suelos de la Bahía de Fildes presentaron valores de carbono orgánico desde niveles significativamente bajos hasta altos (1,7 – 11,9%), y pHs desde ligeramente ácido a ligeramente alcalino (6,1 – 7,5). Mediante el uso del análisis exploratorio de componentes principales (dato no presentado), se observó que los suelos no se agrupan en función a su cercanía geográfica. Entre las muestras de suelos analizadas, la muestra S5 presentó la relación C/N más baja y los valores más altos para calcio, magnesio, fósforo (457,1, 32,8, 81,2 mg/kg), y nitrógeno total de 2,3% (Tabla 1).

Considerando la cercanía del muestreo, resulta llamativo que la muestra de suelo S12 no se agrupara más cercano a los suelos S11 y S13, los cuales presentaron mayor porcentaje de carbón orgánico (11,2 y 11,4%) y basicidad (pH= 7.1 y 7.5) en comparación del suelo S12 (%C= 6.6%, pH= 6.1).

Cabe mencionar que las muestras de suelo S2, S3, S4, S5, S8, S9, fueron recolectadas desde suelos con vegetación herbácea de los géneros *Deschampsia* y *Colobantus* (Figura 1). La muestra de suelo S1 fue recolectada desde suelo con presencia de musgo. Los suelos mencionados presentaron valores de pH menores a 7,0. Por otro lado las muestras de suelo S6, S7, S10, S11, S12, S13 y S14 fueron tomadas desde suelos libres de vegetación herbácea. El segundo conjunto de suelos presentó valores de pH sobre 7,0, con excepción del suelo S12 (pH=6.1) (Tabla 1).

The map displays the Antarctic Peninsula region, including Isla Rey Jorge, Bahía de Fildes, Isla Nelson, and several peninsulas and glaciers. Key locations marked include:

- Isla Rey Jorge:** Glaciar Collins, Punta Green, Puerto Collins, Punta Roman, Estación Artigas (Uruguay), Estación Bellingshausen (Russia), Estación Presidente Frei (Chile), Estación Escudero (Chile), Estación King Sejong (Corea del Sur), Estación Carlini (Argentina).
- Bahía de Fildes:** Península Weaver, Península Barton, Península Potter, Estación Gran Muralla (China), Estación Marsh (Chile), Estación Bellingshausen (Russia), Estación Presidente Frei (Chile), Estación Escudero (Chile), Estación King Sejong (Corea del Sur), Estación Carlini (Argentina).
- Isla Nelson:** Punta Duthoit, Punta O'Carroll, Punta Martin, Punta Rip, Punta Edgell, Punta Stranger.
- Other locations:** Paso de Drake, Campo de hielo Arctowski, Campo de hielo Warszawa, Glaciar Fourcade, Glaciar, Estrecho Bransfield, Estrecho de Fildes, Valle Grande, Punta Juan Carlos, Punta Norte, Punta Winship, Punta Stranger, Isla Dufayel, Isla Arctowski, Isla Escudero, Isla Bellingshausen, Isla Presidente Frei, Isla Escudero, Isla King Sejong, Isla Carlini.

The map includes a compass rose and a grid of latitude and longitude coordinates. The 14 stations are marked with colored dots and labeled S1 through S14.

Tabla 1. Análisis químico de muestras de suelos colectados en la Bahía de Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica.

Muestra	K*	Ca*	Mg*	P*	pH	C/N	%Nt	%C
S1	149,3	476,4	476,4	71,4	6,5	43,7	0,1	3,0
S2	141,8	528,8	528,8	6,0	6,7	10,3	0,2	1,7
S3	147,8	2067,5	2067,5	125,8	6,4	20,5	0,4	7,8
S4	138,8	757,6	757,6	274,2	6,6	26,7	0,4	9,7
S5	136,8	4363,4	4363,4	370,7	6,2	1,6	2,3	3,7
S6	132,6	457,1	32,8	81,2	7,5	5,3	0,5	2,4
S7	153,5	974,4	54,9	26,1	7,2	54,3	0,2	11,9
S8	145,8	1058,3	1058,3	186,7	6,9	6,5	0,4	2,7
S9	175,5	1152,7	1152,7	62,4	6,7	6,0	1,0	5,8
S10	265,2	1886,2	155,5	3,6	7,4	25,4	0,2	5,9
S11	161,0	1354,5	71,0	31,6	7,1	15,6	0,7	11,4
S12	153,5	989,2	51,5	17,8	6,1	13,9	0,5	6,6
S13	136,4	740,7	53,6	57,8	7,5	18,8	0,6	11,2
S14	360,0	2039,2	114,8	18,6	7,2	17,2	0,3	5,9

*mg/kg

Aislamiento de hongos filamentosos

Fueron aislados un total de 1756 hongos filamentosos. Los suelos S9 (n= 232), S7 (n= 239) y S3 (n= 246) exhibieron el mayor número de aislados. Se identificaron: 1) cepas de los géneros

Cladosporium, *Penicillium*, *Pseudogymnoascus*; 2) cepas de hongos pertenecientes a la división Mucoromycota (ej.: *Mortierella*); y 3) un conjunto de cepas de otros 4 géneros no identificados (Figura 2 y 3).

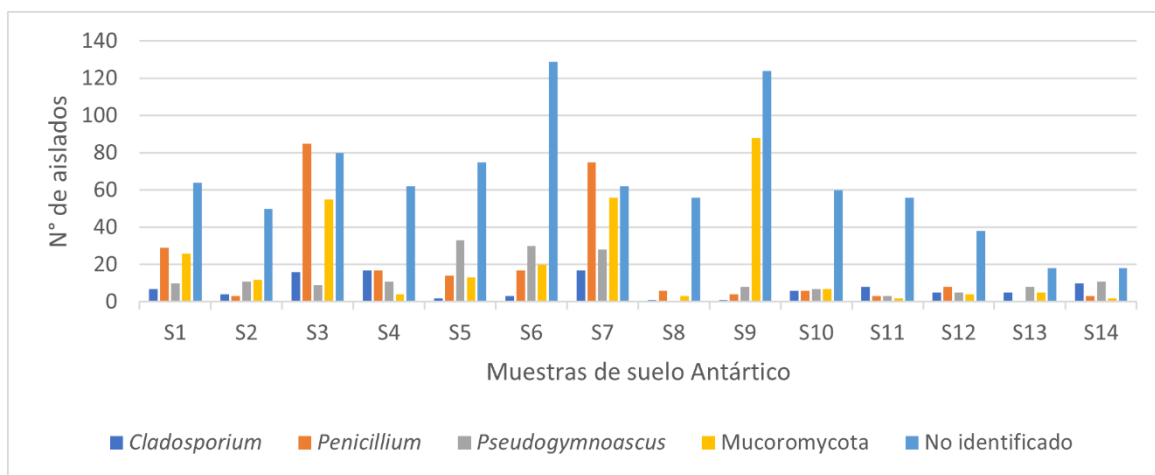


Figura 2. Gráfica del total de hongos filamentosos de acuerdo con el género aislado en cada muestra de suelo.

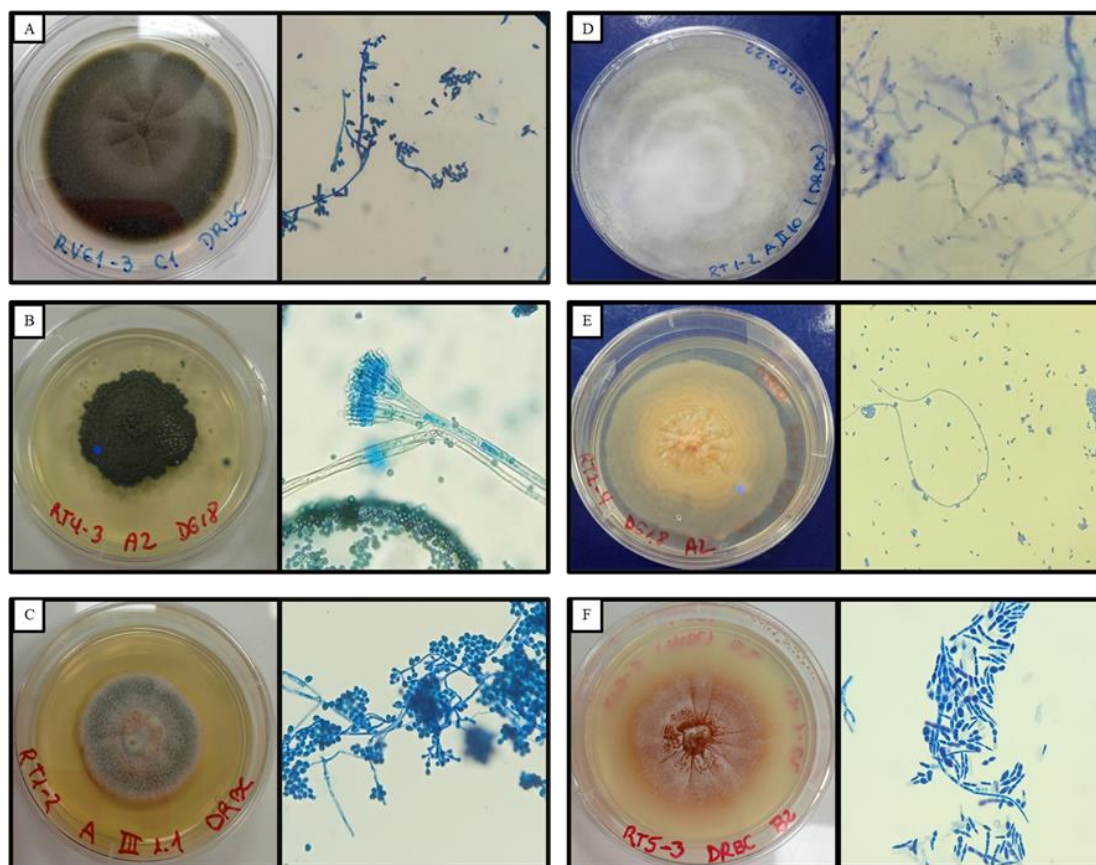


Figura 3. Fotografías macro y micro morfológicas de los géneros A) *Cladosporium*, B) *Penicillium*, C) *Pseudogymnoascus*; D) ejemplo de cepa de hongo perteneciente a la división Mucoromycota; E y F) ejemplo de cepa del conjunto de géneros no identificados. Fotografías tomadas con cámara QIMAGING (Micropublisher, 3.3 RTV) y un microscopio IS.1153 PLPHi (Euromex, Países Bajos).

Discusión

Propiedades químicas de los suelos de la Bahía de Fildes

De acuerdo con reportes previos, los suelos de la región 8 se clasifican en suelos minerales, ornitogénicos y orgánicos. A diferencia de los suelos minerales, los suelos ornitogénicos y orgánicos exhiben niveles significativamente más altos de carbono orgánico, que oscilan entre cerca del 14% hasta el 59 % (Bockheim, 2014; Rosa et al., 2019). Los mismos autores señalan que los suelos minerales antárticos suelen tener un pH de ligeramente ácido a ligeramente alcalino (pH= 6,4 – 7,6); mientras que los suelos ornitogénicos y orgánicos se caracterizan por altos niveles de acidez (pH= 3,9 – 5,1).

De acuerdo con lo descrito por Souza-Kasprzyk et al. (2022), las propiedades químicas del suelo (ej.: transferencia de carbono orgánico y nutrientes) en los ecosistemas terrestres, está principalmente asociada con el ciclo de vida de la flora y fauna presente. Un mayor contenido de nutrientes (ej.: nitrógeno) sugiere un mayor impacto de la fauna, por medio de la deposición de heces de animales, como el guano. A su vez, la presencia de flora influye en la acidificación del suelo, permitiendo la disponibilidad de los nutrientes (Bartlett et al., 2023) y la consecuente actividad biológica de sus organismos.

Además de las propiedades químicas de suelo, es importante considerar las características físicas de los suelos de tipo mineral. En general, estos suelos se caracterizan por presentar una

baja capacidad de retención de nutrientes, viéndose afectado por las condiciones medioambientales del sector (ej.: fuertes vientos, precipitaciones, cercanía con corrientes marinas, etc.) (Bockheim, 2014; Rosa et al., 2019). Tales características podrían explicar las diferencias en las relaciones C/N y nutrientes encontradas entre los suelos, y como éstas influyen en el desarrollo de la vida en los suelos antárticos.

Aislamiento de hongos filamentosos

De acuerdo con la literatura, los géneros identificados en este estudio se consideran los más cosmopolitas en muestras de suelo antártico (Rosa et al., 2019; Newsham et al., 2021). La presencia o mayor abundancia de un género en específico está determinado por el papel de factores edáficos, como el pH, P y C/N. Las características ambientales son decisivas a la hora de influir en el desarrollo, abundancia y presencia de grupos de hongos filamentosos (Alekseev et al., 2020). La variabilidad en los parámetros químicos del suelo podría promover la dominancia de un género específico de hongos filamentosos en los suelos antárticos de Bahía de Fildes (ej.: *Pseudogymnoascus*) (Rosa et al., 2019; Newsham et al., 2021).

Es crucial enfatizar que los estudios sobre la abundancia, diversidad y origen de los hongos filamentosos antárticos no solo son valiosos para la microbiología sino también para predecir la disponibilidad de nuevos metabolitos con propiedades bioactivas (Ordóñez-Enireb et al., 2022; de Andrade et al., 2023). Entre los géneros reportados aquí, el género *Pseudogymnoascus* y hongos

filamentosos pertenecientes a la división Mucoromycota, son prospectos para el desarrollo de nuevas biotecnologías.

El género *Pseudogymnoascus* es posiblemente uno de los géneros menos estudiados. Uno de los representantes más conocidos es *Pseudogymnoascus destructans*, hongo filamentoso psicrófilo que causa el síndrome de la nariz blanca (WNS, por sus siglas en inglés) en muchas especies de murciélagos. A pesar de lo anterior, de acuerdo con lo descrito por Rosa et al. (2019), diferentes especies del género *Pseudogymnoascus* pueden representar una de las mejores opciones para la obtención de nuevas moléculas (ej.: pigmentos, proteínas, lípidos, etc.), debido a su mejor adaptabilidad y presencia en el territorio Antártico.

Hongos de la división Mucoromycota han sido ampliamente estudiados para la producción de lípidos con diversos fines industriales (ej.: biodiesel, cosméticos, transportadores de drogas, etc.). La división Mucoromycota ha resultado ser un foco de estudio debido a su rendimiento lipídico por encima del 20% de su peso celular seco (Zhao et al., 2020). De acuerdo con la literatura, los mejores representantes hasta el momento son *Mortierella alpina*, *M. elongate*, *M. isabellina* y *Mucor circinelloides*, con rendimientos que oscilan entre el 50 y el 71 % (p/p) (Gao et al., 2014; Passoth et al., 2017). A pesar del amplio estudio de la división Mucoromycota, existe un limitado conjunto de investigaciones que se han centrado en evaluar cepas antárticas como fuentes de nuevos metabolitos (Melo et al., 2014; Zucconi et al., 2020).

Conclusiones

En este estudio se analizaron muestras de suelos de la Bahía de Fildes (Zona libre de hielo, Región 8, Antártica). Las muestras obtenidas fueron una representación heterogénea de suelos, en cuanto a su composición química y capacidad de albergar vida. Los suelos de la Bahía de Fildes poseen propiedades químicas similares con los suelos de tipo mineral. Sin embargo, las variaciones en la relación C/N y nutrientes, sugieren una influencia externa por parte de las condiciones climáticas y vida silvestre del sector. La presencia de vegetación herbácea fue un indicio de los efectos de la flora sobre el pH del suelo antártico. La abundancia y diversidad de hongos filamentosos, como *Cladosporium*, *Penicillium*, *Pseudogymnoascus*, y géneros pertenecientes a la división Mucoromycota resalta la capacidad de estos organismos para adaptarse y sobrevivir en condiciones ambientales extremas. Este estudio resalta el potencial biotecnológico de los hongos filamentosos antárticos, especialmente del género *Pseudogymnoascus* y la división Mucoromycota. Ambos grupos de hongos filamentosos son una fuente prometedora de nuevos metabolitos con propiedades bioactivos. Considerando lo anterior, es importante destacar que se necesitan investigaciones adicionales para comprender el potencial biotecnológico de los microorganismos antárticos. Los resultados presentados en este estudio resaltan la importancia del continuo estudio del territorio Antártico, con enfoque en la conservación y la exploración sostenible de los ecosistemas antárticos. Este trabajo constituye el primer informe de aislamiento de hongos a

escala de paisaje en la Bahía de Fildes, Antártida.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Instituto Antártico Chileno a través del proyecto Regular INACH RT_16_20, y parcialmente financiado por la Universidad de La Frontera (Chile).

Referencias

1. Rogers AD. Evolution and biodiversity of Antarctic organisms: a molecular perspective. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* [Internet]. 2007;362(1488):2191–214. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2006.1948>
2. Kim B-M, Amores A, Kang S, Ahn D-H, Kim J-H, Kim I-C, et al. Antarctic blackfin icefish genome reveals adaptations to extreme environments. *Nat Ecol Evol* [Internet]. 2019;3(3):469–78. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41559-019-0812-7>
3. Gallardo V, Sepúlveda M, Cayún Y, Barria E, Mella M, Costa J, Dias N, Lima N, Cornejo P, Santos C. Filamentous fungi isolated and identified from Antarctic soil (Fildes Bay, Antarctica). En: Abstract book of the ICC15-15 International Conference on Culture Collection 2023, 170, p. 92. ISBN: 978-972-97916-6-6.
4. Gallardo V, Sepúlveda M, Cayún Y, Abanto M, Dias N, Costa J, Cornejo P, Vicente V, Bittencourt J, Santos C. Antarctic filamentous fungi: A living and diverse kingdom of medical biotechnology relevance, hidden in the soils of Fildes Bay (Antarctica). En: 6th Meeting on Medicinal Biotechnology 2024.
5. So JE, Halda JP, Hong SG, Hur J-S, Kim JH. The revision of lichen flora around Maxwell Bay, King George Island, maritime Antarctic. *J Microbiol* [Internet]. 2023;61(2):159–73. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s12275-023-00015>
6. Santhaseelan H, Dinakaran VT, Dahms H-U, Ahamed JM, Murugaiah SG, Krishnan M, et al. Recent antimicrobial responses of halophilic microbes in clinical pathogens. *Microorganisms* [Internet]. 2022;10(2):417. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms1002041>
7. Walters D, Raynor L, Mitchell A, Walker R, Walker R. Antifungal activities of four fatty acids against plant pathogenic fungi. *Mycopathologia* [Internet]. 2004;157(1):87–90. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1023/b:myco.0000012222.68156.2c>
8. Godinho VM, Furbino LE, Santiago IF, Pellizzari FM, Yokoya NS, Pupo D, et al. Diversity and bioprospecting of fungal communities associated with endemic and cold-adapted macroalgae in Antarctica. *ISME J* [Internet]. 2013;7(7):1434–51. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2013.77>
9. Krishnan A, Convey P, Gonzalez M, Smykla J, Alias SA. Effects of temperature on extracellular hydrolase enzymes from soil microfungi. *Polar Biol* [Internet].

- 2018;41(3):537–51. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00300-017-2215-z>
10. Chávez D, Machuca Á, Fuentes-Ramírez A, Fernández N, Cornejo P. Shifts in soil traits and arbuscular mycorrhizal symbiosis represent the conservation status of *Araucaria araucana* forests and the effects after fire events. For Ecol Manage [Internet]. 2020;458(117806):117806. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117806>
11. Kozakiewicz Z. Ornamentation types of conidia and conidiogenous structures in fasciculate *Penicillium* species using scanning electron microscopy. Bot J Linn Soc [Internet]. 1989;99(3):273–93. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8339.1989.tb00404.x>
12. Pitt JI. A laboratory guide to common *Penicillium* species. Mycologia [Internet]. 1987;79(3):491. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2307/3807483>
13. Samson RA, Frisvad JC. *Penicillium* subgenus *Penicillium*: new taxonomic schemes and mycotoxins and other extrolites. Studies in Mycology. 2004;49:257.
14. Simões MF, Pereira L, Santos C, Lima N. Polyphasic identification and preservation of fungal diversity: Concepts and applications. In: Management of Microbial Resources in the Environment. Dordrecht: Springer Netherlands; 2013. p. 91–117.
15. Rosa LH, editor. Fungi of Antarctica: Diversity, ecology and biotechnological applications. Cham: Springer International Publishing; 2019.
16. Hoog G.S., Guarro J., Gené J., Ahmed S.A., Al Hatmi A.M.S., Figueras M.J., Vitale R.G. Atlas of Clinical Fungi, 4th edition. Atlasclinicalfungi.org. [citado el 3 de junio de 2024]. Disponible en: <http://atlasclinicalfungi.org>
17. Bockheim JG. Antarctic soil properties and soilscapes. En: Antarctic Terrestrial Microbiology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014. p. 293–315.
18. Souza-Kasprzyk J, Paiva T de C, Convey P, da Cunha LST, Soares TA, Zawierucha K, et al. Influence of marine vertebrates on organic matter, phosphorus and other chemical element levels in Antarctic soils. Polar Biol [Internet]. 2022;45(10):1571–80. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00300-022-03091-8>
19. Bartlett JC, Convey P, Newsham KK, Hayward SAL. Ecological consequences of a single introduced species to the Antarctic: terrestrial impacts of the invasive midge *Eretmoptera murphyi* on Signy Island. Soil Biol Biochem [Internet]. 2023;180(108965):108965. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108965>
20. Newsham KK, Davey ML, Hopkins DW, Dennis PG. Regional diversity of maritime Antarctic soil fungi and predicted responses of guilds and growth forms to climate change. Front Microbiol [Internet]. 2021;11. Disponible en:

- <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2020.615659>
21. Alekseev I, Zverev A, Abakumov E. Microbial communities in permafrost soils of Larsemann Hills, Eastern Antarctica: Environmental controls and effect of human impact. *Microorganisms* [Internet]. 2020;8(8):1202. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/microorgani sms8081202>
22. Ordóñez-Enireb E, Cucalón RV, Cárdenas D, Ordóñez N, Coello S, Elizalde P, et al. Antarctic fungi with antibiotic potential isolated from Fort William Point, Antarctica. *Sci Rep* [Internet]. 2022;12(1). Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-25911-x>
23. de Andrade G, de Vargas MVM, Goulart SNB, Bernardes BM, Bezerra JDP, Lemos RPM, et al. Screening of endophytic fungi from Antarctic mosses: Potential production for L-asparaginase free of glutaminase and urease activity. *J Biotechnol* [Internet]. 2023;377:1–12. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.10.001>
24. Gao D, Zeng J, Yu X, Dong T, Chen S. Improved lipid accumulation by morphology engineering of oleaginous fungus *Mortierella isabellina*. *Biotechnol Bioeng* [Internet]. 2014;111(9):1758–66. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1002/bit.25242>
25. Passoth V. Lipids of yeasts and filamentous fungi and their importance for biotechnology. En: *Biotechnology of Yeasts and Filamentous Fungi*. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 149–204.
26. Zhao H, Lv M, Liu Z, Zhang M, Wang Y, Ju X, et al. High-yield oleaginous fungi and high-value microbial lipid resources from Mucoromycota. *Bioenergy Res* [Internet]. 2021;14(4):1196–206. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-020-10219-3>
27. Melo IS, Santos SN, Rosa LH, Parma MM, Silva LJ, Queiroz SCN, et al. Isolation and biological activities of an endophytic *Mortierella alpina* strain from the Antarctic moss *Schistidium antarctici*. *Extremophiles* [Internet]. 2014;18(1):15–23. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00792-013-0588-7>
28. Zucconi L, Canini F, Temporiti ME, Tosi S. Extracellular enzymes and bioactive compounds from Antarctic terrestrial fungi for bioprospecting. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2020;17(18):6459. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17186459>