

Microbichos



Un mundo invisible en nuestros monumentos: los hongos microcoloniales, desafíos y oportunidades

An invisible world in our monuments: Microcolonial fungi, challenges and opportunities

Isys Nayeli Alvarez Lazaro¹
Susana De la Rosa García¹
Sergio Gómez Cornelio^{2,3}

¹División Académica de Ciencias Biológicas,
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco,
México.

²División Académica de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco,
México.

³Ingeniería en Biotecnología, Universidad Politécnica
del Centro, Tabasco, México.

*Autor para la correspondencia:
sagomezcornelio@gmail.com

Resumen

Cuando admiramos un monumento histórico, pocas veces pensamos en los diminutos enemigos que lo amenazan. Entre ellos, los hongos microcoloniales destacan por su increíble capacidad de adaptación. Estos organismos colonizan las piedras generando manchas oscuras y debilitan la estructura desde el interior penetrando los poros y grietas, donde secretan ácidos que disuelven minerales. Aunque existen tratamientos biocidas para combatirlos, su resistencia sigue siendo un reto. Aquí, te invitamos a descubrir el mundo de estos microorganismos y cómo su persistencia representa un desafío para la conservación de nuestro patrimonio cultural.

Palabras clave: Hongos microcoloniales, biodeterioro, patrimonio cultural.

Summary

When we admire a historic monument, we rarely think about the tiny enemies that threaten it. Among them, microcolonial fungi stand out for their incredible adaptability. These organisms colonize stone surfaces, forming dark stains and weakening the structure from within by penetrating pores and cracks, where they secrete acids that dissolve minerals. Although biocide treatments exist to combat them, their resistance remains a challenge. Here, we invite you to explore the world of these microorganisms and how their persistence poses a challenge to the conservation of our cultural heritage.

Keywords: Microcolonial fungi, biodeterioration, cultural heritage.

Introducción

Cuando admiramos las edificaciones o pinturas murales que forman parte de las herencias culturales, evocamos las historias que resguardan y el esplendor del pasado. Sin embargo, detrás de su grandeza y aparente permanencia a través del tiempo, existen amenazas invisibles que comprometen tanto su belleza como la estabilidad de sus materiales. Entre ellas, los microorganismos destacan como uno de los principales retos para la conservación, y dentro de este vasto grupo, los hongos microcoloniales (HMC) sobresalen como agentes clave en el deterioro biológico de materiales pétreos de las superficies históricas.

El deterioro provocado por los HMC va más allá de la presencia de manchas oscuras que generalmente son visibles en las superfi-

cies de los monumentos históricos. Estos microorganismos, debido a sus hábitos de crecimiento, pueden afectar la integridad estructural de los materiales rocosos. Sus estrategias de supervivencia y actividad metabólica los convierten en un desafío para su control, ya que proliferan en ambientes extremadamente hostiles, donde la vida parecería inviable. Esto plantea una pregunta crucial: ¿Qué hace a estos hongos tan resistentes y cómo logran adaptarse a condiciones tan adversas?

Hongos únicos con adaptaciones sorprendentes

Cuando escuchamos hablar de hongos, nos vienen a la mente imágenes de aquellas setas en forma de sombrillas que crecen en el bosque o del moho verde o naranja que se observa en alimentos olvidados; sin embargo, los HMC son más complejos que estos ejemplos de la vida cotidiana. Este grupo está compuesto por organismos diminutos altamente especializados que han evolucionado para adaptarse a condiciones ambientales estresantes, convirtiéndose en una rareza dentro del reino Fungi.

Los HMC son conocidos por habitar entornos hostiles, desde desiertos y regiones polares hasta áreas altamente contaminadas. Incluso se han encontrado, junto con otros hongos melanizados -organismos que poseen melanina, un compuesto en sus paredes celulares que les proporciona protección a agentes químicos, radiación y condiciones ambientales adversas-, en lugares tan extremos como las paredes del reactor nuclear de Chernóbil y sus aguas residuales [1]. Allí, no solo lograron sobrevivir a la radiación, desarrollaron adaptaciones metabólicas que les permitieron prosperar en uno de los ambientes más inhóspitos conocidos. Esta capacidad de sobrevivir en entornos inhabitables para casi cualquier otra forma de vida ha despertado el interés de la comunidad científica.

¿Qué los hace tan resistentes? La razón radica en que combinan las características propias de las levaduras, como su crecimiento

unicelular, y de los hongos filamentosos como estructuras más complejas y rígidas, así como la producción de pigmentos y enzimas extracelulares, lo que los posiciona como verdaderos campeones de la supervivencia. Estos microorganismos crecen lentamente y de forma meristemática, un tipo de crecimiento regulado que ocurre principalmente en una zona específica de la colonia, donde las células se dividen activamente para formar nuevas células genéticamente idénticas. Esta organización les permite formar colonias compactas, conservar energía y adaptarse mejor a ambientes con escasos nutrientes. Además, sus paredes celulares engrosadas y melanizadas (Fig. 1), les confieren una barrera física y química altamente efectiva frente a condiciones extremas, como la radiación solar, los ciclos de humectación y desecación (superficies húmedas durante la noche y secas durante el día), las temperaturas severas y la exposición a agentes químicos [2]. Los HMC pertenecen al filo Ascomycota, pero no se agrupan en una sola categoría dentro de él. Se distribuyen en dos clases: Dothideomycetes -que incluye órdenes como *Dothideales*, *Capnodiales* y *Pleosporales*-, y Eurotiomycetes, representados principalmente por el orden *Chaetothyriales* [3]. Por esta diversidad, no existe una clasificación biológica única que los agrupe en su totalidad. En lugar de compartir un origen evolutivo común, estos hongos presentan características similares que han desarrollado de manera independiente, lo que se conoce como convergencia adaptativa. Por eso, se les considera un grupo “parafilético”, es decir, un conjunto de organismos que se parecen en su comportamiento o estructura, pero que no provienen necesariamente del mismo linaje. Estas cualidades no solo les permiten colonizar desiertos, regiones polares y ambientes contaminados, sino también el material pétreo de los monumentos históricos, lo que representa un desafío considerable para la conservación del patrimonio cultural.

El efecto de los HMC en los sillares -bloques de piedra labrada que constituyen la estructura del monumento-, o de las argamasas o mezclas utilizadas para procesos de restau-

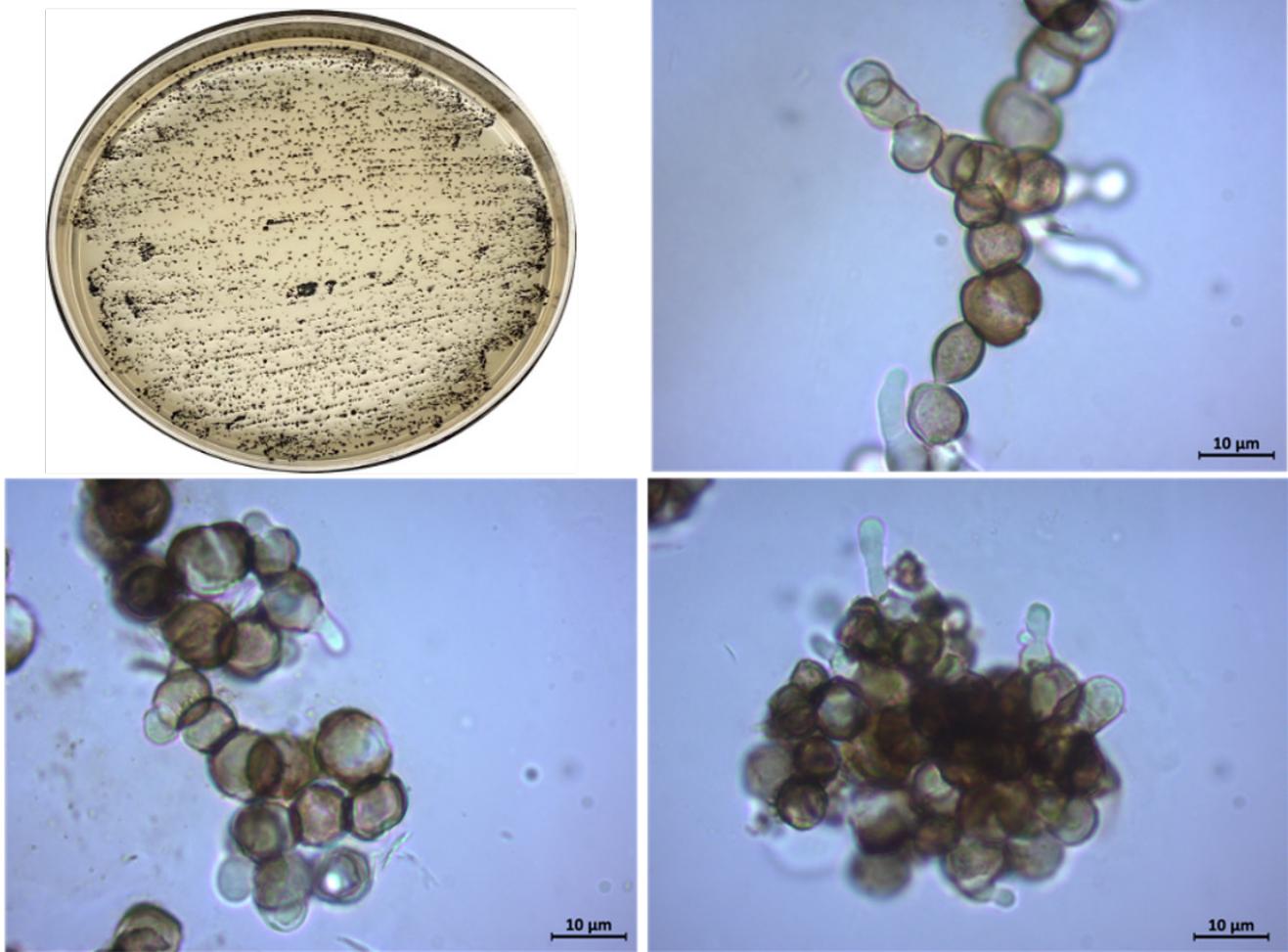


Figura 1. Morfología y crecimiento de hongos microcoloniales sobre medio de cultivo. En la parte superior izquierda se observa el crecimiento de microcolonias en caja de Petri. Las imágenes microscópicas muestran células meristemáticas globosas organizadas en cadenas cortas o agrupaciones densas, características de los HMC.

ración, y en los acabados superficiales de los monumentos históricos, produce alteraciones superficiales de gran impacto. Aunque la coloración oscura por la melanina de sus células en las superficies pétreas son los signos más evidentes de su presencia, el verdadero daño son los cambios estructurales que provocan. Estos hongos, al colonizar fisuras y poros (Fig. 2), generan un microambiente que facilita la retención de humedad, lo que no solo promueve el crecimiento de otros grupos de hongos, sino que también acelera reacciones químicas y físicas en los materiales pétreos, como la disolución de sus minerales constitutivos y la disgregación de sus volúmenes debido a la adquisición y cristalización de sales en su interior, afectando directamente la estabilidad del material [2].

El impacto del biodeterioro: de lo microscópico a lo monumental

Si alguna vez has recorrido un sitio arqueológico, probablemente has notado zonas oscuras en las superficies de sus monumentos. Estas marcas no son simples manchas; son evidencia del desarrollo de complejas comunidades microbianas conocidas como biopelículas epilíticas [4], integradas principalmente por cianobacterias (como *Gloeocapsa*, *Scytonema* o *Phormidium*), microalgas verdes (como *Chlorella*), hongos filamentosos y microcoloniales, y en algunos casos, Arqueas y líquenes (Fig. 3). Estas biopelículas pueden provocar biodeterioro, un proceso que incluye alteraciones físicas, químicas o estéticas sobre los materiales culturales. En las zonas arqueológicas mayas de Yucatán, México, estas comunidades han sido

ampliamente documentadas, y su control sigue siendo un desafío constante. Métodos como la limpieza mecánica y la aplicación de biocidas han intentado frenar su crecimiento, pero con resultados muy limitados [5].

Desde una perspectiva ecológica, los HMC son maestros excepcionales de la adaptación, ya que pueden buscar refugio en microhábitats protegidos, como los poros y grietas de las rocas. Sin embargo, se ha demostrado que su actividad metabólica provoca biodeterioro, es decir, su presencia altera las propiedades de las superficies pétreas donde colonizan. Este deterioro afecta tanto la estética de los monumentos como su estructura, amenazando

su conservación a largo plazo. Los materiales comunes utilizados en la construcción de monumentos históricos, como el mármol, la piedra caliza y sus derivados, son especialmente susceptibles a la acción de estos organismos.

El biodeterioro causado por los HMC se manifiesta de tres formas principales en los materiales pétreos. Primero, provocan daño físico al invadir grietas y poros, donde forman colonias que ejercen presión interna. Con el tiempo, esta presión aumenta el tamaño de las fisuras y puede causar el desprendimiento de capas superficiales, un proceso conocido como exfoliación. Segundo, causan daño químico al secretar ácidos orgánicos que disuelven minera-

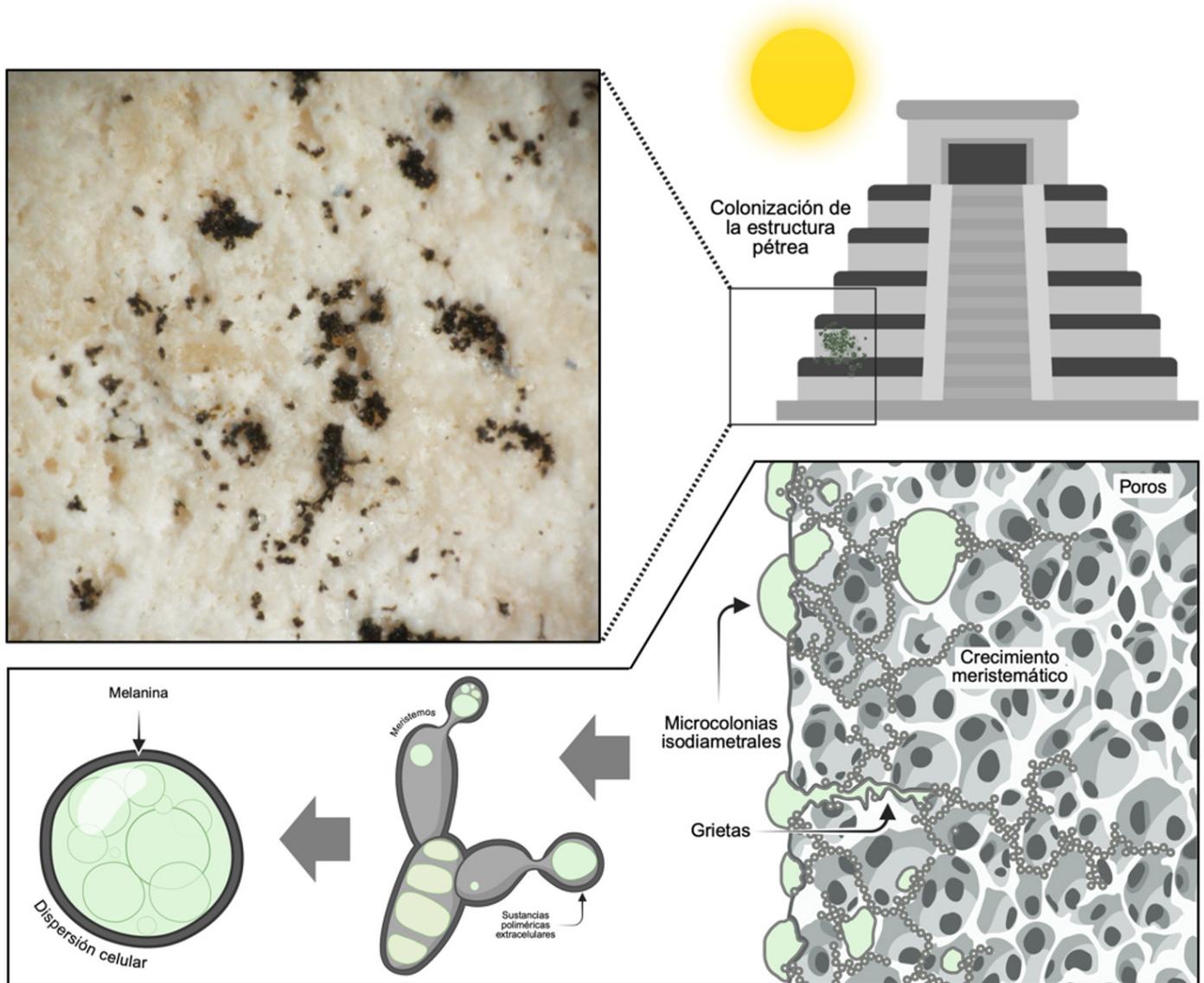


Figura 2. Crecimiento de los hongos microcoloniales y colonización de poros y grietas sobre la superficie de monumentos pétreos.



Figura 3. Biopelículas epilíticas negras en el Templo de los Guerreros en Chichén Itzá, México.

les como el carbonato de calcio, debilitando la matriz mineral de las piedras, dando lugar a depresiones conocidas como biopicaduras [6]. Finalmente, su impacto incluye alteraciones estéticas y afectaciones en la visibilidad de las imágenes y relieves representadas sobre la piedra, ya que las colonias producen manchas oscuras y decoloraciones que afectan significativamente la apariencia de las superficies, especialmente en representaciones en relieve o imágenes pintadas; su presencia inhibe su correcta visualización, afectando la percepción de estos testimonios del pasado.

Un ejemplo del efecto de los HMC, se evidencia con el análisis petrográfico de tablillas de arenisca del antiguo Templo de Salomón en Jerusalén que reveló que los HMC penetraron las ranuras de inscripciones antiguas, demostrando su capacidad para colonizar incluso materiales considerados estructuralmente estables [7]. Además de monumentos pétreos, los HMC pueden habitar en microhábitats como

papel, textiles y madera, dañando las obras de arte y estructuras históricas que fueron legados por nuestros antepasados [8].

Enfrentando el reto: Proteger los monumentos históricos de los hongos microcoloniales

La resistencia de los HMC a tratamientos biocidas constituye un desafío relevante en la conservación del patrimonio histórico. Su capacidad de resistir a tanto biocidas tradicionales como innovadores radica en gran medida en la melanina y pared celular gruesa. Esto se demostró en un estudio realizado en Chichén Itzá, donde, a pesar de la aplicación de nanopartículas de ZnO y $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, para contrarrestar las manchas microbianas negras (biopelículas epilíticas), y eliminar la comunidad fúngica filamentosa, los HMC sobrevivieron y/o recolonizaron la superficie tras cuatro años de la intervención [9], evidenciando la necesidad de comprender sus capacidades ecológicas para proponer estrategias de control más efec-

tivas. Entre los principales géneros de HMC identificados en superficies de roca calcárea, destacan *Capnobotriella*, *Cryomyces*, *Devriesia*, *Incertomyces*, *Meristomyces* y *Petrophila*, todos ellos reconocidos en diversos estudios por su resistencia y capacidad de colonización en ambientes extremos,

Para emprender este desafío se requiere de nuevos enfoques que integren la investigación e innovación científica y tecnológica con los procesos de restauración, no solo para proponer compuestos eficaces para su control sino también para seleccionar las áreas que lo requieren. Una de las estrategias que han demostrado efectividad contra los HMC, es la aplicación de biocidas naturales, como los metabolitos secundarios producidos por líquenes, los cuales tienen la ventaja de no alterar las superficies de los monumentos históricos [10].

Por otro lado, la innovación nanotecnológica podría revolucionar las estrategias de conservación, ya que es posible diseñar nanopartículas altamente específicas contra un grupo de organismos, como los HMC, y menos agresivas a la superficie de los monumentos históricos y al medio ambiente, manteniendo su valor arqueológico y sostenible para la conservación del patrimonio cultural.

Actualmente, herramientas moleculares, como la metagenómica, permiten analizar las comunidades microbianas para optimizar las intervenciones de restauración sobre monumentos históricos, ya que no solo identifican a los microorganismos responsables del biodeterioro, sino que también es posible comprender las complejas interacciones microbianas y su adaptación bajo diferentes condiciones ambientales.

La conservación preventiva constituye un reto en la lucha contra los HMC, ya que estrategias como la aplicación de compuestos antimicrobianos eficientes y que protejan la superficie pétreo, así como el monitoreo constante de las condiciones ambientales pueden reducir la proliferación de HMC en monumentos expuestos a la intemperie. Además, desde la ciencia

básica, ahora es posible combinar los métodos tradicionales con tecnologías moleculares que proporcionen evidencias de las comunidades microbianas y su desarrollo para mejorar la planificación y ejecución de las acciones de restauración y conservación.

Más allá del deterioro: un recurso para el futuro

Aunque los HMC representan una amenaza para la conservación del patrimonio histórico edificado, también pueden ofrecer beneficios en otros sectores. Por ejemplo, las adaptaciones innatas para los ambientes extremos los postulan como una fuente prometedora de biomoléculas con aplicaciones biotecnológicas, tales como la producción de materiales sostenibles y en la remediación de ambientes contaminados, donde su resistencia y estabilidad ofrecen ventajas significativas. Además, el análisis de sus mecanismos metabólicos puede proporcionar compuestos que solucionen problemas en sectores como la biomedicina y la industria alimentaria.

Conclusión: entre el desafío y la oportunidad

La preservación del patrimonio cultural requiere no solo de protección física, sino también de la conservación de su composición original, sus inscripciones elaboradas por nuestros antepasados y el entorno que le da significado. Frente al desafío que representan los HMC, es fundamental adoptar un enfoque interdisciplinario que transforme esta amenaza en una oportunidad, uniendo la investigación, tecnología y conservación de monumentos.

Paradójicamente, estos microorganismos, aunque representan una amenaza concreta para los materiales pétreos, también ofrecen oportunidades inesperadas. Su extraordinaria capacidad de adaptación y sobrevivencia a condiciones extremas exige el desarrollo de estrategias de conservación eficientes, pero al mismo tiempo abre la puerta a investigaciones y aplicaciones innovadoras en áreas como la remediación ambiental o la biomedicina. El verdadero desafío no es únicamente mitigar el im-

pacto de los HMC sobre el patrimonio cultural, sino comprender sus mecanismos de adaptación para desarrollar soluciones eficaces. De este modo, será posible aplicar estrategias fundamentadas que contribuyan a conservar los monumentos históricos y su valor cultural para las generaciones futuras. **iBIO**

Declaración

El presente texto es un manuscrito original, donde una inteligencia artificial fue utilizada solo como corrector de estilo en ciertos párrafos del texto

Referencias

- [1] Dadachova, E., Casadevall, A. (2008). Ionizing radiation: how fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin. *Current Opinion in Microbiology* 11(6), 525-531. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2008.09.013>
- [2] Gorbushina, A. A. (2007). Life on the rocks. *Environmental Microbiology* 9(7), 1613-1631. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2007.01301.x>
- [3] Kurbessoian, T., Ahmed, SA., Quan, Y., de Hoog, S., Stajich, JE. (2024) Description of new micro-colonial fungi species *Neophaeococcomyces tesnikishii* cultured from biological soil crusts. *bioRxiv*, <https://doi.org/10.1101/2024.06.12.598762>.
- [4] Ortega-Morales, O., Montero-Muñoz, J. L., Neto, J. A. B., Beech, I. B., Sunner, J., Gaylarde, C. (2019). Deterioration and microbial colonization of cultural heritage stone buildings in polluted and unpolluted tropical and subtropical climates: A meta-analysis. *International Biodeterioration & Biodegradation* 143, 104734. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.104734>
- [5] Isola, DI., Bartoli, F., Meloni, P., Caneva, G., Zucconi, L. (2022). Black fungi and stone heritage conservation: ecological and metabolic assays for evaluating colonization potential and responses to traditional biocides. *Applied Sciences* 12(4), 2038. <https://doi.org/10.3390/app12042038>
- [6] Sterflinger, K., Krumbein, W. (1997). Dematiaceous fungi as the main agent of biopitting on Mediterranean marbles and limestones. *Geomicrobiology Journal* 14, 219-231. <https://doi.org/10.1080/01490459709378045>
- [7] Ilani, S., Rosenfeld, A., Feldman, H. R., Krumbein, W. E., Kronfeld, J. (2008). Archaeometric analysis of the “Jehoash Inscription” tablet. *Journal of Archaeological Science* 35(11), 2966-2972. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.019>
- [8] Gadd, G. M., Fomina, M., Pinzari, F. (2024). Fungal biodeterioration and preservation of cultural heritage, artwork, and historical artifacts: Extremophily and adaptation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 88(1), e00200-22. <https://doi.org/10.1128/membr.00200-22>
- [9] De la Rosa-García, S., Sierra-Fernández, A., García-Solís, C., García-Soberanes, N., Quintana, P., Gómez-Cornelio, S., Fort, R. (2024). Fungal community dynamics on limestone at the Chichén Itzá archaeological site in Mexico driven by protective treatments. *Science of the Total Environment* 906, 167563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167563>
- [10] Gazzano, C., Favero-Longo, S. E., Iacomussi, P., Piervittori, R. (2013). Biocidal effect of lichen secondary metabolites against rock-dwelling microcolonial fungi, cyanobacteria and green algae. *International Biodeterioration & Biodegradation* 84, 300-306. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.033>