



Hot Science

Biotecnología aplicada al patrimonio cultural: estrategias para la preservación del patrimonio edificado

Biotechnology applied to cultural heritage: strategies for the preservation of built heritage

Resumen

Los monumentos mayas sufren deterioro a causa de la acción sinérgica de agentes químicos, biológicos y físicos. La piedra caliza, puede experimentar biodeterioro debido a la acción microbiana. El deterioro es usualmente contrarrestado por medio de intervenciones humanas, por medio la remoción de las biopelículas y la consolidación. Estudios recientes muestran la aplicación de la biotecnología para la conservación de estas superficies, utilizando métodos de biomineralización microbiana, biocidas y bioconsolidantes. La biotecnología tiene el potencial de contribuir con métodos y estrategias, que, sumadas a las prácticas convencionales de restauración, coadyuvan con la preservación del patrimonio edificado bajo un enfoque interdisciplinario.

Palabras clave: Patrimonio cultural, bioconservación, biomineralización.

Summary

Mayan monuments are prone to deterioration due to the synergistic action of chemical, biological and physical agents. Limestone suffers biodeterioration due to microbial action. Deterioration is usually dealt with removal of biofilms and consolidation. Recently, the application of biotechnology for the conservation can be performed using microbial biomineralization, biocides and bioconsolidants. Biotechnological approaches also include the use of certain microorganisms can biostabilize stone surfaces. Biotechnology has the potential

Benjamín Otto Ortega Morales^{1*}

Juan Carlos Camacho-Chab¹

José Alberto Narváez-Zapata²

¹Centro de Investigación en Microbiología Ambiental y Biotecnología, Universidad Autónoma de Campeche, Av. Agustín Melgar s/n., Campeche, México.

²Instituto Politécnico Nacional-CBG. Blvd. del Maestro esq. Elías Piña, Col. Narciso Mendoza, Reynosa, Tamaulipas, México.

*Autor para la correspondencia:
beortega@uacam.mx

to contribute with methods and strategies that, added to conventional restoration practices, to the preservation of built heritage based on an interdisciplinary approach.

Keywords: Cultural heritage, bioconservation, biomineralization.

Introducción

Los monumentos históricos son las manifestaciones más evidentes del legado cultural de un pueblo. México es un país que cuenta con un amplio legado de sitios arqueológicos mayas y que forman parte del patrimonio histórico mundial. Algunos ejemplos incluyen Chichén-Itzá en Yucatán, Chicanná en Campeche y Palenque en Chiapas (Figura 1). Estos monumentos están constituidos principalmente de piedra calcárea la cual es altamente susceptible al ataque químico.



b)

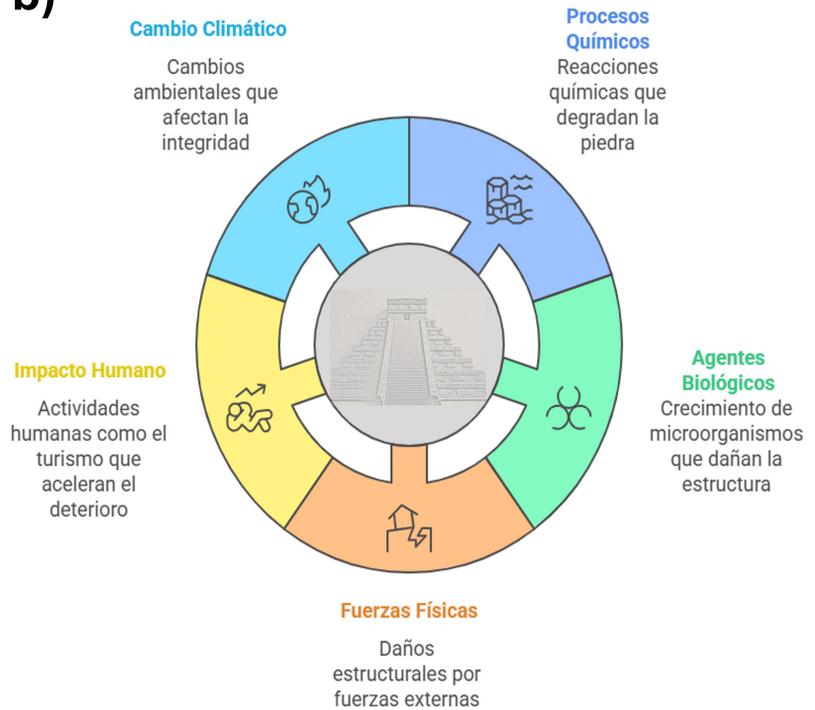


Figura 1. Biodeterioro en monumentos arqueológicos, a) Sitio de Chicanná en el estado de Campeche, México. Nótese la presencia de vegetación circundante que crea un microclima al que están expuestos los monumentos así como la presencia de alteraciones cromáticas de origen microbiano (cambio de color) de la piedra expuesta al ambiente. b) Principales amenazas para el biodeterioro de los monumentos históricos. (Imagen propia).

mico y es mecánicamente débil, y por ello le hacen particularmente susceptible a procesos de deterioro por agentes químicos, biológicos y físicos, que a menudo operan de manera sinérgica [1]. Adicionalmente, el impacto humano a través de la actividad turística y el cambio climático añaden factores que contribuyen con este deterioro. Las vinculaciones colaborativas entre el sector gubernamental, el académico, la sociedad civil y el sector privado por medio de acciones multisectoriales e interdisciplinarias, son clave para contribuir a la conservación.

Biodeterioro de la piedra

Como se mencionó anteriormente, múltiples factores inciden en el deterioro de los monumentos. Sin embargo, las características climáticas de la península de Yucatán y México caracterizado por un clima semi-tropical caracterizadas por cambios cíclicos de altas temperaturas y alta humedad, favorecen la proliferación de microorganismos los cuales contribuyen directa e indirectamente a la degradación calcárea. La actividad microbiana se considera uno de los factores más impor-

tantes en el deterioro de materiales pétreos. Las biopelículas subaéreas son comunidades microbianas constituidas de líquenes, algas, bacterias, hongos y arqueas que colonizan superficies sólidas expuestas a la atmósfera. Las biopelículas subaéreas pueden generar deterioro por múltiples mecanismos por ejemplo a través de decoloración (alteración cromática), producción de ácidos orgánicos e inorgánicos y otros metabolitos ácidos, osmolitos, y daño físico por penetración activa [2, 3]. Estas biopelículas se adhieren mediante sustancias poliméricas extracelulares (EPS), las cuales facilitan la adhesión de los microorganismos y la captura de partículas, aerosoles, minerales y compuestos orgánicos presentes en el ambiente.

El daño estético se manifiesta principalmente a través de la alteración cromática, causada por pigmentos liberados por los microorganismos, como melaninas, carotenos y pigmentos fotosintéticos. Este tipo de biodeterioro puede ir de una alteración estética al franco deterioro por acumulación de partículas y sales creando un ambiente favorable para microorganismos halófilos [2].



Figura 2. Biopelículas epilíticas litobióticas desarrolladas sobre sustratos calcáreos en el sitio arqueológico de Becán, Campeche, México. La paleta de colores está relacionada con los diferentes grupos microbianos asociados y sus pigmentos constitutivos. Las comunidades de líquenes aparecen como alteraciones incrustantes irregulares blanquecinas, que ejercen un efecto biometeorizante / biodeterioro por medio de la secreción de metabolitos ácidos y la alteración biofísica de los poros de la roca, lo que causa su desagregación. (Imagen propia).

La producción de ácidos orgánicos e inorgánicos por los microorganismos contribuye igualmente a la degradación de la piedra. Los ácidos inorgánicos, como el ácido sulfúrico y el ácido nítrico, pueden disolver materiales debilitando la estructura mineral. Por otro lado, los ácidos orgánicos (oxálico y cítrico principalmente) reaccionan con los minerales de la piedra, solubilizándolos mediante la formación de sales y aumentando la disolución de ciertos tipos de rocas [2]. En el aspecto físico, la penetración de microorganismos filamentosos, especialmente hongos y cianobacterias, en las fisuras de la piedra también genera daños físicos significativos, pues estos microorganismos provocan presión interna al absorber agua y expandirse, lo que facilita la entrada de polvo y otros agentes que contribuyen al deterioro progresivo de la piedra.

Las biopelículas subaéreas muestran generalmente distribuciones heterogéneas asociadas con el sustrato rocoso, producto de la variabilidad ambiental (tipo de sustrato y condiciones micrometeorológicas), que conducen

a una baja en disponibilidad de agua, lo que crea ambientes extremófilos para las comunidades litobióticas que colonizan las superficies como crecimientos epilíticos -en la superficie- como los que exhiben en la Figura 2.

También pueden presentarse como comunidades endolíticas crecen dentro de fisuras, grietas y poros en las matrices rocosas [1]. El grado en que las superficies son colonizadas por microbios depende de los parámetros climáticos (por ejemplo, temperatura, luz y humedad), la composición del sustrato mineral y sus propiedades intrínsecas (Figura 3).

Las primeras investigaciones sobre el biodeterioro se basaban principalmente en técnicas microbiológicas dependientes de cultivo, que permiten caracterizar las comunidades de microorganismos responsables del deterioro. Sin embargo, estas técnicas dependientes de cultivo tienen limitaciones, ya que solo una fracción de los microorganismos presentes en el ambiente puede ser cultivada en condiciones de laboratorio, lo cual no proporciona una visión completa de la diversidad microbiana involucrada [4].

Los avances en biología molecular y el uso de métodos basados en ADN han revolucionado el estudio del biodeterioro. Estas técnicas moleculares permiten identificar una mayor diversidad de microorganismos sin necesidad de cultivarlos, incluso detectando aquellos que no pueden sobrevivir fuera de su entorno natural. Actualmente, es posible reconocer no solo microorganismos comunes, sino también extremófilos como *Rubrobacter*, *Euhalothece* y *Salinibacter*, estos microorganismos considerados halófilos subsisten en ambientes salinos, por lo que se pueden encontrar en costras salinas o eflorescencias que aparecen en los edificios históricos (Figura 4).

El uso de estas técnicas moleculares abre nuevas posibilidades para conservación preventiva, permitiendo la identificación rápida de microorganismos viables y el diseño de tratamientos de bioconservación más precisos y eficaces [4].

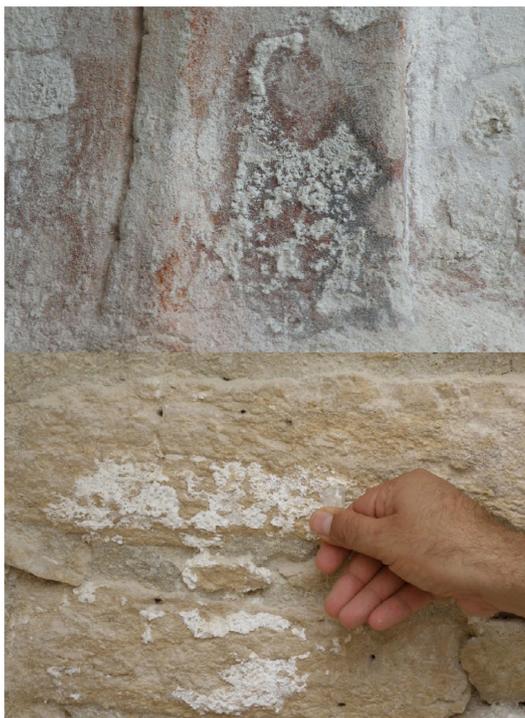
Control de la colonización microbiana

Los procesos de protección involucran varios tipos de intervención. La limpieza de los monumentos de piedra se suele realizar mediante métodos mecánicos (cepillado). Posteriormente, la eliminación de biopelículas se realiza por medio de un tratamiento biocida con agentes químicos como etanol o peróxido de hidrógeno. Independientemente de la técnica elegida, se debe tener cuidado de no provocar daños en el material original; los procesos deben ser graduales, selectivos y económicamente viables. También existe el uso de agentes biocidas más espe-



Figura 3. Biopelículas epilíticas (subaereas) desarrolladas sobre sustratos calcáreos, nótese la presencia de la biopelícula como alteración de color negro en superficies expuestas a una permanente radiación. El desprendimiento del biofilm provoca erosión del sustrato calcáreo expuesto (sustrato blanquecino). (Imagen propia).

a)



b)

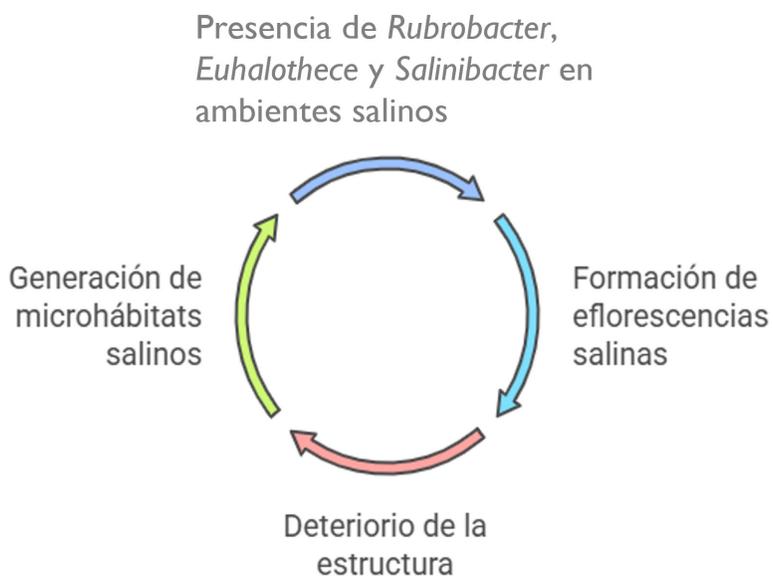


Figura 4. Microorganismos extremófilos relacionados al biodeterioro. a) Eflorescencia en estuco (arriba) y piedra calcárea (abajo) es indicativa un posible daño salino. Las eflorescencias representan así mismo microhábitats para el desarrollo de microorganismos halófilos. b) Ciclo de biodeterioro relacionado a microorganismos extremófilos. (Imagen propia).

cializados, son productos químicos capaces de eliminar organismos indeseables. Sin embargo, algunos biocidas, a pesar de su alta eficiencia presentan problemas de toxicidad y restricciones ambientales. Por otra parte, las nanopartículas han recibido recientemente atención por parte de las comunidades de conservación y restauración como alternativas a los biocidas. Las NP de TiO₂ son el tipo de nanopartícula más estudiado que muestra propiedades biocidas [5].

Consolidación de piedra monumental

Por su parte, la consolidación representa un procedimiento importante pero complejo en el campo de la conservación, ya que puede provocar efectos indeseables, como cambios cromáticos, formación de subproductos y liberación de sustancias agresivas. El término consolidación se define como la aplicación de un material sobre un sustrato descohesionado que, al interactuar con la superficie, mejora su cohesión, sus características mecánicas y la adhesión de las capas alteradas al sustrato. La consolidación de materiales pétreos expuestas al aire libre ha incluido desde hace décadas el uso de polímeros sintéticos, como poliacrilatos y polimetacrilados, que buscan extender la durabilidad de los materiales. Aunque los polímeros acrílicos ofrecen resistencia inicial a la biodegradación, estudios han demostrado que, en condiciones naturales prolongadas, pueden ser colonizados por hongos, generando un oscurecimiento en la piedra, daños estéticos y estructurales [6].

Para conservar los monumentos de gran valor cultural que sufren deterioro, se han realizado estudios enfocados en identificar los principales microorganismos que lo causan y en analizar los métodos de protección que mejor se adapten a las superficies de piedra. Inicialmente, los ensayos de laboratorio permiten evaluar la efectividad de compuestos biocidas y consolidantes bajo condiciones controladas. Estos ensayos buscan replicar las características físicas y mineralógicas de los materiales del monumento para probar la eficacia de las formulaciones en superficies deterioradas. Re-

cientemente, se han explorado métodos en principio más compatibles con el ambiente, consolidando materiales deteriorados mediante la biomineralización [3,7]. Este proceso, inducido por bacterias carbonatogénicas, genera en el material poroso la consolidación de piedra de forma compatible y eficaz, evitando algunos problemas de los tratamientos convencionales. Este enfoque innovador y ecológico se puede aplicar mediante tres métodos principales, (1) aplicación de cultivos externos sobre la piedra; (2) activación de bacterias carbonatogénicas existentes y (3) cultivo de laboratorio de bacterias nativas del sustrato, que luego se reintroducen en el material (Figura 5) [5, 8].

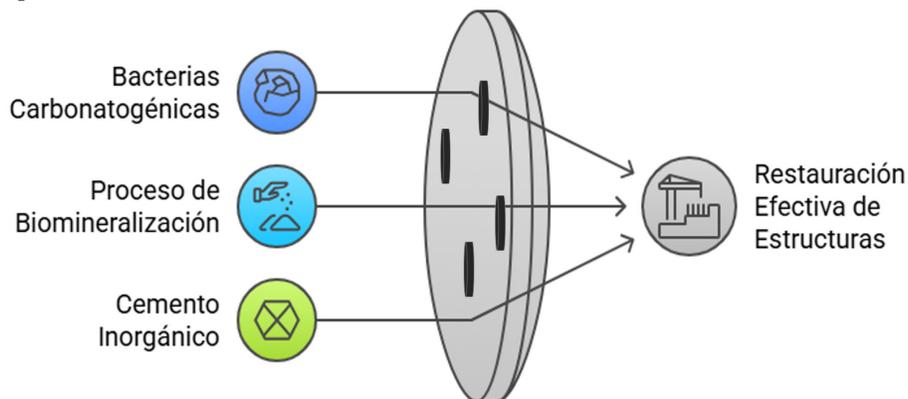
Conclusión

El deterioro de los monumentos históricos es un fenómeno extremadamente complejo, donde inciden diversos agentes, que operan de manera sinérgica a diferentes escalas de temporales y espaciales. Frente a esta complejidad, es crucial su estudio por medio de enfoques interdisciplinarios. La aplicación de la biotecnología en la conservación del patrimonio histórico ha avanzado significativamente con el aprovechamiento de organismos litotróficos en tecnologías como la biolimpieza y la biomineralización desde finales de los años 90 y principios de los años 2000, respectivamente, que ofrecen soluciones eficaces y sostenibles para la preservación de materiales históricos. La consolidación de piedra mediante biomineralización, en la que microorganismos (más comúnmente bacterias) específicos se impregnan en la piedra deteriorada donde se les permite producir nuevo material lítico, es una práctica ya utilizada tanto en la restauración y la ingeniería civil en algunos países. **iBIO**

Referencias

- [1] Ortega-Morales, O., Guezennec, J., Hernández-Duque, G., Gaylarde, C. C., & Gaylarde, P. M. (2000). Phototrophic biofilms on ancient Mayan buildings in Yucatan, Mexico. *Current microbiology*, 40(2), 81–85. <https://doi.org/10.1007/s002849910015>
- [2] Scheerer, S., Ortega-Morales, O., & Gaylarde, C. (2009). Microbial deterioration of stone monuments--an

a)



b)

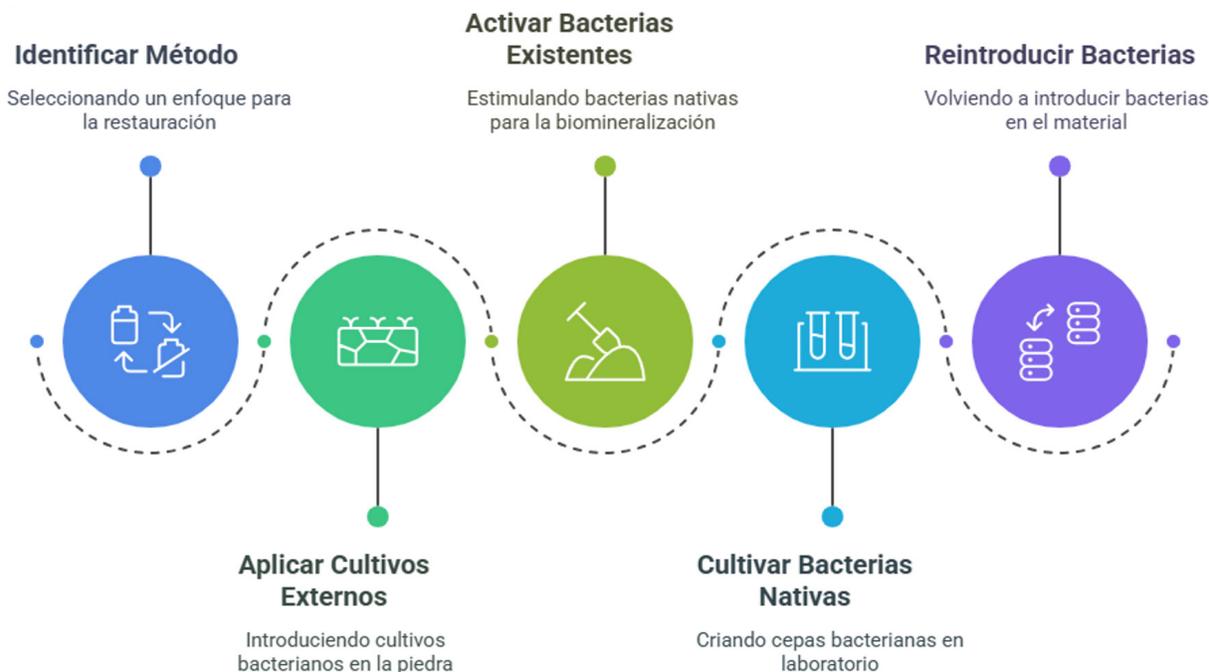


Figura 5. Conservación del patrimonio impulsado por bacterias carbonatogénicas. a) generalidades, b) Soluciones con bacterias carbonatogénicas en superficies deterioradas. (Imagen propia).

updated overview. In Elsevier (ed): *Advances in applied microbiology* (pp. 97–139). [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)00805-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)00805-8)

[3] Jroundi, F., Elert, K., Ruiz-Agudo, E., Gonzalez-Muñoz, M. T., & Rodriguez Navarro, C. (2020). Bacterial diversity evolution in Maya plaster and stone following a bio-conservation treatment. *Frontiers in Microbiology*, 11:599144. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.599144>

[4] Fernandes P. (2006). Applied microbiology and biotechnology in the conservation of stone cultural heritage materials. *Applied microbiology and biotechnology*, 73(2), 291–296. <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0599-8>

[5] Ortega-Morales, B. O., & Gaylarde, C. C. (2021). Bioconservation of historic stone buildings—an updated review. *Applied Sciences*, 11(12), 5695. <https://doi.org/10.3390/app11125695>

[6] Narvárez-Zapata, J. A., Paramo-Aguilera, L. A., & Ortega-Morales, B. O. (2012). Culturable fungi associated with urban stone surfaces in Mexico City. *Electronic journal of biotechnology: EJB*, 15(4). <https://doi.org/10.2225/vol15-issue4-fulltext-6>

[7] Rodríguez-Navarro, C., Jroundi, F., González-Muñoz, M. A. T., & Elert, K. (2023). Consolidación de la piedra con bacterias. *Revista PH*, 252. <https://doi.org/10.33349/2023.110.5373>

[8] Camacho-Chab, J. C., Camacho-Chab, P. A., Pereañez-Sacarías, J. E., Montero-Muñoz, J. L., Almeyda-Cen, A. I., Dzul-López, L. A., Reyes-Estebanez, M. M., & Ortega-Morales, B. O. (2024). Short-term effect of biopolymer-based coatings on surface hardness and color of limestone exposed to tropical outdoor conditions. *Coatings*, 14(2), 154. <https://doi.org/10.3390/coatings14020154>