

## Optimización del uso del agua en revoques de tepetate mediante el empleo de polisacáridos

Water use optimization in tepetate renders through the use of polysaccharides

**<sup>1</sup>Lilian García-Alonso Alba, <sup>2</sup>Luis Fernando Guerrero-Baca, <sup>3</sup>Mónica Vázquez-Martínez**

<sup>1</sup>Investigadoras e Investigadores por México, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Avenida Insurgentes sur No. 1582, Col. Crédito Constructor, Del. Benito Juárez. C. P. 03940, Ciudad de México, México. Correo electrónico: [lilian.alonso@secihti.mx](mailto:lilian.alonso@secihti.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1275-2248>

<sup>2</sup>Doctorado en Ciencias y Artes para el Diseño, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Calzada del hueso No. 1100, Col. Villa Quietud, Del. Coyoacán, C. P. 04960, Ciudad de México, México. Correo electrónico: [lfgbaca@correo.xoc.uam.mx](mailto:lfgbaca@correo.xoc.uam.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8256-4851>

<sup>3</sup>Maestría en Conservación y Restauración de Bienes Culturales Inmuebles, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México. [lainbelik@hotmail.com](mailto:lainbelik@hotmail.com) <https://orcid.org/0009-0008-3827-2833>

\*Autor de correspondencia.

Recibido: 24 de octubre de 2025

Aceptado: 5 de mayo de 2026

Publicado: 29 de mayo de 2026

<https://doi.org/10.33064/iycuaa2026988348>  
e8348

### RESUMEN

Los revoques de tierra, empleados históricamente para proteger edificaciones de adobe, bajareque, han perdido su tradición constructiva debido a la adopción masiva del cemento. El tepetate, suelo volcánico abundante en México, es una alternativa sostenible, pero demanda altos volúmenes de agua para la trabajabilidad. La industria de la construcción consume el 16% del agua dulce mundial, y en México, donde el 76% del territorio presenta sequía moderada a severa, la optimización del uso del agua es una necesidad. Este estudio optimiza el uso del agua en revoques de tepetate mediante heteropolisacáridos de plantas endémicas mexicanas y glicerol. Las formulaciones lograron reducciones de agua de hasta 65%. El mucílago de agave al 0.5% alcanzó resistencias a compresión de 42.09 kg/cm<sup>2</sup> (157% superior al control), mientras que formulaciones con glicerol al 1.5% demostraron resistencia excepcional al impacto hídrico. Este enfoque establece un modelo replicable para bioconstrucción y restauración sustentable en regiones áridas.

**Palabras clave:** Construcción sostenible; tepetate; revoques de tierra; eficiencia hídrica; bioprospección; polisacáridos.

### ABSTRACT

Earth renders, historically used to protect adobe, wattle-and-daub, and rammed earth buildings, have lost their construction tradition due to massive cement adoption. Tepetate, a volcanic soil abundant in Mexico, represents a sustainable alternative but demands high water volumes to achieve adequate workability. The construction industry consumes

approximately 16% of global freshwater, and in Mexico, where 76% of the territory experiences moderate to severe drought conditions, optimizing water use is an imperative necessity. This study optimizes water use in tepetate renders through heteropolysaccharides from Mexican endemic plants and industrial glycerol. Optimized formulations achieved water reductions up to 65%. Agave mucilage at 0.5% reached compressive strengths of 42.09 kg/cm<sup>2</sup> (157% higher than control), while glycerol formulations at 1.5% demonstrated exceptional resistance to surface water impact (422 vs. 5 minutes). This approach establishes a replicable model for bio-construction and sustainable heritage restoration in arid regions.

**Keywords:** Sustainable construction; tepetate; earth renders; water efficiency; bioprospecting; polysaccharides.

## INTRODUCCIÓN

Un componente de la edificación al que se presta poca atención con relación a los espacios y, sobre todo, a la protección ante los agentes ambientales es el sistema de recubrimientos. El uso masivo del cemento en la edificación convencional y también en las obras tradicionales e históricas ha hecho pensar a muchos sectores de la sociedad que se trata de componentes infalibles y de larga duración (Guerrero, 2018).

Esta idea es errónea. Cotidianamente vemos inmuebles a los que se les tiene que retirar los revoques porque presentan desprendimientos, eflorescencias salinas o disgregaciones. Si este problema es grave con los inmuebles hechos de tabique, piedra o bloques de hormigón, es crítico para la arquitectura de tierra, la cual requiere de procesos de protección superficial específicos, por la incompatibilidad que presentan con la mayoría de los materiales de origen industrializado (Guerrero y Ávila, 2019).

A lo largo de la historia, las edificaciones hechas con adobe, bajareque, tapia, tierra apilada o incluso de piedra asentada con lodo recibieron acciones de mantenimiento a partir de revoques de tierra gracias a los cuales han logrado conservarse por siglos. Hasta principios del siglo XX en México existió una larga tradición en el uso de los revoques de tierra tanto en las viviendas más sencillas como en grandes conjuntos monumentales. Esta estrategia constructiva garantizaba un adecuado comportamiento higrotérmico en todo tipo de regiones bioclimáticas, resultando especialmente eficaz en territorios con climas extremos como los que caracterizan el norte del país. La llegada de los revoques de cal y arena a finales del siglo XIX, y finalmente los de cemento, provocó la pérdida de la tradición constructiva de revoques de tierra a tal grado que actualmente sólo algunas

artesanas o artesanos del medio rural recuerdan datos sobre su empleo (Guerrero, Ávila y García-Alonso, 2022).

Considerando el potencial económico y ecológico que representa la recuperación del uso de revoques de tierra tanto para la conservación del patrimonio edificado como en edificios convencionales, desde hace más de diez años se ha venido experimentando el empleo de diferentes dosificaciones y estrategias que permiten mejorar su adherencia, resistencia y durabilidad (García-Alonso, Vázquez y Guerrero 2025; Guerrero, Ávila y García-Alonso, 2022; Guerrero, 2018). Una de las variables fundamentales son los procesos de hidratación de los morteros empleados para revoques, puesto que la falta o exceso de agua puede tener efectos negativos en su aplicación, debilitarlos y provocar fisuras y desprendimientos en función de la reactividad de las arcillas presentes en los suelos.

Se realizaron pruebas para la aplicación de aplanados empleando uno de los tipos de tierra que más fácilmente se pueden conseguir en zonas urbanas del centro de la República Mexicana y cuyo costo e impacto ambiental son muy reducidos: los suelos llamados "tepetates".

El tepetate, que es un suelo derivado de la actividad volcánica y que se encuentra en relativa abundancia en el centro del territorio de México, tradicionalmente se emplea en rellenos y sub bases de caminos y calles, pero demanda altos volúmenes de agua para alcanzar trabajabilidad adecuada, limitando su aplicación en regiones con escasez hídrica (Gama-Castro, 2007). Para esta investigación se parte del empleo de este recurso para su uso en la edificación como alternativa de protección superficial de los edificios y como cohesión para diferentes tipos de mampuestos, bajo la premisa de procurar la reducción del empleo de cemento o cal, aglutinantes altamente contaminantes y demandantes de energía para su fabricación.

Cuando se analiza de manera comparativa el impacto ambiental de los sistemas constructivos en la búsqueda de alternativas sostenibles, se tiende a utilizar como referentes las emisiones contaminantes y la energía embebida de los componentes. Se deja de lado uno de los factores que cada día se vuelve más crítico: el consumo de agua potable (González, Guerrero y Quiroa, 2024).

La industria de la construcción consume aproximadamente el 16% del agua dulce mundial, representando uno de los sectores con mayor huella hídrica (Miller et al., 2018; Aghdam et

al., 2023). En México, donde el 76% del territorio presenta condiciones de sequía moderada a severa (CONAGUA, 2023), la optimización del uso del agua en la construcción y la restauración del patrimonio edificado no es solo una oportunidad de mejora, sino una necesidad imperativa para la sostenibilidad nacional.

Los materiales de construcción tradicionales, particularmente los empleados en los revoques y morteros, requieren cantidades significativas de agua tanto en su preparación como en su curado (Ahmed et al., 2023; Ogunbode et al., 2022).

La caracterización y desarrollo de protocolos para reducir el empleo del agua para la conformación de morteros para revoques resulta pertinente y relevante, porque puede potenciar el empleo en una amplia gama de soluciones constructivas de revestimientos plenamente sostenibles desde el punto de vista económico, ecológico y sociocultural.

#### *Biodiversidad mexicana: un patrimonio subutilizado*

México alberga entre 10-12% de la biodiversidad mundial, posicionándose como uno de los 17 países megadiversos del planeta (Sarukhán et al., 2017; CONABIO, 2020). Sin embargo, el potencial biotecnológico de esta riqueza biológica permanece poco explorado, particularmente en aplicaciones constructivas (Vázquez-Barrios & Martínez, 2020). Las plantas endémicas mexicanas han sustentado la evolución de mecanismos únicos de supervivencia que incluyen la producción de polisacáridos complejos con propiedades extraordinarias de retención hídrica y cohesión (González-Cortázar et al., 2021).

El estudio de especies nativas incidirá en su valorización económica. La transformación de conocimientos tradicionales sobre plantas mexicanas en aplicaciones técnicas modernas puede generar (García-Mendoza et al., 2004; Koleff et al., 2012):

- Cadenas de valor locales basadas en biodiversidad.
- Incentivos económicos para conservación ex-situ e in-situ.
- Alternativas sustentables a aditivos sintéticos importados.
- Fortalecimiento de economías rurales mediante bioprospección responsable.

#### *Plantas endémicas seleccionadas: patrimonio biológico con potencial constructivo*

*Opuntia aciculata* - Las comunidades mesoamericanas han utilizado mucílago de cactáceas en construcción durante milenios (Toledo & Barrera-Bassols, 2017; Altieri & Toledo, 2011). Destaca el empleo del nopal (*Opuntia aciculata*) especie endémica de regiones

semiáridas mexicanas, del cual se puede extraer un mucílago con propiedades hidrocoloidales superiores a las de otras subespecies, debido a su adaptación a condiciones de estrés hídrico extremo (Chandra & Eklund, 2020). Su valorización representa un puente entre sabiduría ancestral y biotecnología moderna (Berkes, 2018).

*Agave lechuguilla* - Esta especie, adaptada a ecosistemas desérticos del norte de México, produce fibras y mucílago con excepcionales propiedades mecánicas (Martínez-López et al., 2023). Su aprovechamiento integral (fibras para refuerzo, mucílago para cohesión) establece un modelo de bioeconomía circular que maximiza el valor agregado por unidad de biomasa extraída, minimizando presión sobre poblaciones silvestres (Mahmood et al., 2024).

*Cyrtopodium macrobulbon* - Las orquídeas terrestres mexicanas desarrollan mucílago complejo para optimizar captación y retención hídrica (García-Alonso & Ruvalcaba, 2020). El aprovechamiento de *C. macrobulbon* representa una frontera innovadora en bioprospección, puesto que la investigación de especies poco estudiadas puede revelar propiedades constructivas únicas (Vandebroek et al., 2019). Su inclusión puede poner en valor el potencial de exploración sistemática de la microbiota mexicana para su empleo sostenible.



Figura 1. Pseudo bulbos de *Cyrtopodium macrobulbon* en venta en el mercado de Oaxaca para uso medicinal.  
Fotografía de los autores, 2023.

### *Economía circular: Glicerol como subproducto valorizado*

La producción nacional de biodiésel genera aproximadamente 100,000 toneladas anuales de glicerol como subproducto (Cardeño et al., 2011). Su incorporación en materiales constructivos transforma un residuo industrial en recurso valioso, cerrando ciclos de material y reduciendo dependencia de aditivos sintéticos importados (Ghisellini et al., 2016; Pomponi & Moncaster, 2017). Este enfoque se alinea con principios de economía circular donde los residuos de un proceso se convierten en insumos de otro (Kirchherr et al., 2017; Marín-García et al., 2023).

**Objetivo:** Desarrollar recubrimientos de tierra para la edificación y restauración basados en el empleo de tepetate hidratado con agua, mezclada con dosificaciones optimizadas de aditivos naturales e industriales, a fin de reducir el consumo hídrico.

**Objetivos particulares:**

- Evaluar la viabilidad técnica de sustituir aditivos sintéticos por heteropolisacáridos de plantas endémicas mexicanas para el mejoramiento de mezclas de tierra.
- Establecer protocolos de aprovechamiento sustentable de especies nativas que incentiven conservación y generen valor económico local.
- Desarrollar un modelo replicable de construcción circular aplicable a la conservación y la restauración patrimonial.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Enfoque de sostenibilidad en selección de materiales

La selección de materiales se basó en criterios de sostenibilidad integral (Arrigoni et al., 2017; Anand & Amor, 2022) que parten de cuatro premisas:

1. Origen local: Reducción de emisiones por transporte.
2. Disponibilidad renovable: Especies con capacidad de regeneración.
3. Valor agregado regional: Fortalecimiento de economías locales.
4. Circularidad: Aprovechamiento de subproductos industriales.

### *Protocolos de extracción sustentable*

Cosecha responsable de plantas endémicas. Para la selección y el aprovechamiento ecológico de las especies vegetales a emplear con fines constructivos se requiere prever su

abundancia y disponibilidad regional, así como el tiempo que tarda en reproducirse. Cada especie vegetal tiene ritmos específicos y condicionantes asociadas al medio.

*Nopal (Opuntia aciculata)*: Extracción no destructiva mediante el corte parcial de cladodios maduros, preservando la capacidad regenerativa de la planta (Rodríguez-Hernández et al., 2019). Rendimiento de 70 ml de mucílago por cladodio, con regeneración completa en 3 a 4 meses.

*Agave (Agave lechuguilla)*: Aprovechamiento de las hojas externas sin comprometer el corazón de crecimiento. Protocolo de cosecha rotativa que permite el mantenimiento de poblaciones silvestres (Martínez-López et al., 2023). Rendimiento de 280 ml de mucílago por 150g de material foliar.

*Orquídea (Cyrtopodium macrobulbon)*: Cosecha selectiva de bulbos superficiales manteniendo su sistema radicular (Benítez-Malvido et al., 2018). Rendimiento de 200 ml de mucílago proveniente de dos bulbos, con mínimo impacto en supervivencia de la planta.

*Medición de eficiencia hídrica*. Se implementó una metodología específica para cuantificar la posible reducción hídrica comparativa, basada en estándares internacionales de sostenibilidad (Ali et al., 2024; UN-Water, 2023):

- Línea base: Muestra control de tepetate hidratado con agua destilada.
- Medición volumétrica: Registro preciso de volúmenes de agua y aditivos.
- Cálculo de eficiencia: Porcentaje de reducción hídrica =  $[(\text{Vol\_control} - \text{Vol\_aditivo}) / \text{Vol\_control}] \times 100$

## **RESULTADOS**

Los análisis comparativos que fundamentaron el presente estudio tendiente a evaluar el nivel de hidratación necesario para obtener morteros con las condiciones reológicas adecuadas para ser aplicados como recubrimientos de muros realizados con materiales porosos, permitieron identificar primero la cantidad de agua que requiere un volumen específico de tepetate triturado y tamizado por una malla #10. Luego se hicieron diversas muestras similares, pero variando los líquidos aglutinantes que en cada caso incluían los cuatro tipos de polisacáridos a evaluar, los cuales previamente habían sido caracterizados para que tuvieran densidades equivalentes. En todos los casos estudiados, la inclusión de los agregados en muy bajos porcentajes de disolución (entre 0.5% y 1.5%) se tradujo en una

notable disminución de la cantidad de líquido necesario para alcanzar la condición de plasticidad y cohesividad requeridas para lograr la adherencia prevista de los morteros en una misma superficie.

*Impacto hídrico.* Los resultados demuestran una transformación fundamental en el perfil hídrico que requirió el tepetate:

- Mucílago de agave disuelto al 1.5%: reducción hídrica del 65%.
- Mucílago de orquídea disuelto al 0.5% y nopal fresco disuelto al 1%: reducción hídrica del 62.5%.
- Glicerol disuelto al 1.5%: reducción hídrica del 58%.

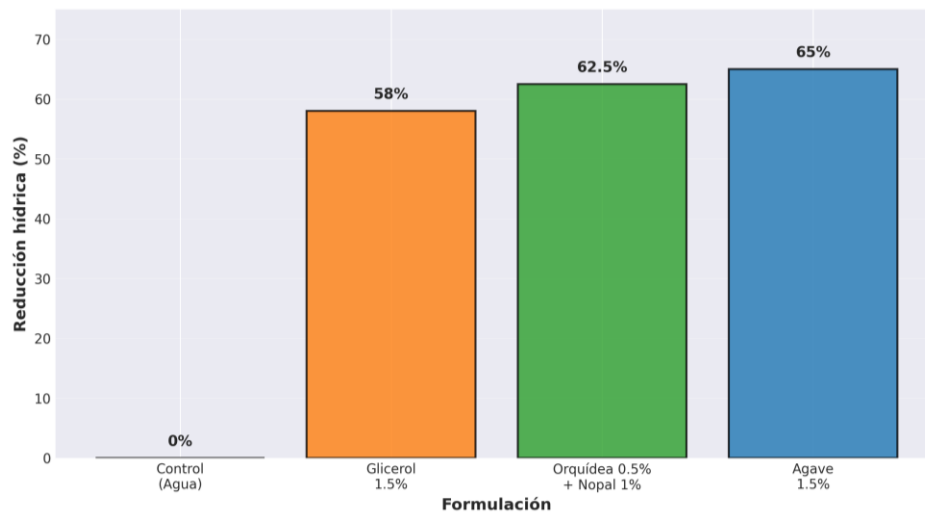


Figura 2. Comparación de reducción hídrica entre formulaciones. El mucílago de agave al 1.5% logró la mayor reducción hídrica (65%), seguido por la combinación de orquídea y nopal (62.5%) y glicerol (58%).

Nota: Elaboración propia.

*Implicaciones de escala.* En un proyecto determinado ya sea de restauración o de obra nueva en el que se aplican por ejemplo 1000 m<sup>2</sup> de superficie de revoque, estas reducciones representan:

- Ahorro hídrico: 15,000-20,000 litros de agua.
- Reducción de costos: 30-40% en suministro hídrico.
- Impacto ambiental: Menor presión sobre acuíferos locales.

Paralelamente a la evaluación referente al estudio comparativo entre la hidratación de los morteros para revoques tanto con agua sola como las diferentes disoluciones de polisacáridos, se analizó el comportamiento estructural de las mezclas una vez que habían secado. Se tomó como base su capacidad de carga evaluada en probetas cúbicas de 5 cm por lado, según la norma ASTM-C-109/C 109M – 02 y se obtuvieron los siguientes resultados.

Resistencia a la compresión:

- Mucílago de agave disuelto al 0.5%: promedio de 42.09 kg/cm<sup>2</sup> (157% superior al control).
- Mucílago de orquídea disuelto al 1.5%: promedio de 39.73 kg/cm<sup>2</sup> (143% superior al control).
- Formulaciones con glicerol disuelto al 1.5%: promedio de 33-35 kg/cm<sup>2</sup> (126% superior al control).

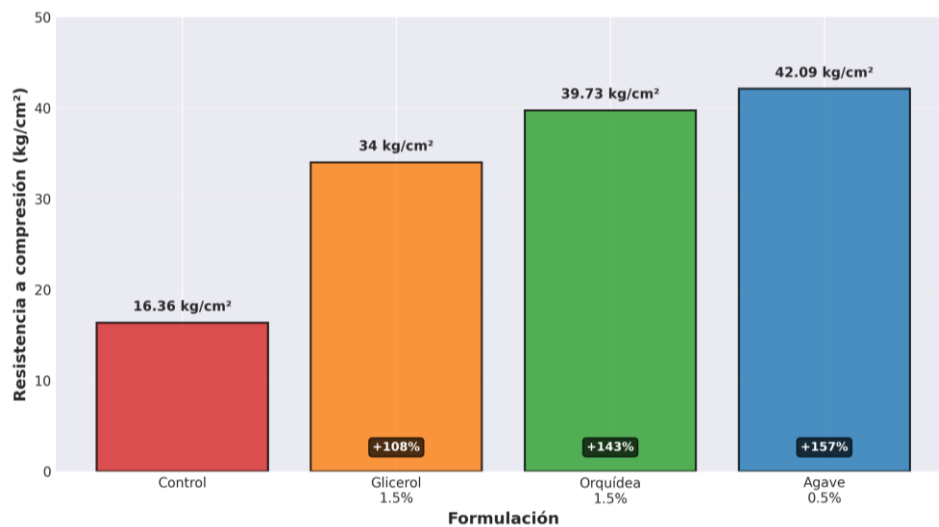


Figura 3. Comparación de resistencia a compresión entre formulaciones. El mucílago de agave al 0.5% alcanzó la mayor resistencia (42.09 kg/cm<sup>2</sup>, 157% superior al control), seguido por orquídea al 1.5% (39.73 kg/cm<sup>2</sup>, 143% superior) y glicerol al 1.5% (34 kg/cm<sup>2</sup>, 108% superior). Los valores sobre las barras indican los porcentajes de incremento respecto al control.

Nota: Elaboración propia.

Estos resultados demuestran los aditivos naturales permiten superar significativamente la capacidad de carga de los morteros para ser aplicados como revoques.

### Resistencia a la absorción hídrica mediante la prueba Karsten

Otra característica evaluada en probetas cúbicas de 5 cm por lado, según la norma UNE-EN 16302 para la determinación de la cantidad de líquido absorbido puede traducirse en la potencial resistencia de los revestimientos al impacto de la lluvia. La prueba de la pipeta o Tubo de Karsten consiste en evaluar el tiempo que tarda en ser absorbido un volumen específico de líquido por el material por evaluar, una vez que es vertido por la parte superior del instrumento y dejado caer por gravedad. Al igual que sucedió con las pruebas de resistencia a la compresión, los resultados fueron analizados comparativamente con relación a las muestras de referencia (control) en las que el líquido vertido era agua. Los resultados promedio se presentan a continuación.

- Control (agua): Absorción completa en 5 minutos.
- Mucílago de orquídea disuelto al 1.5%: 471 minutos (aumento del 9,320%).
- Glicerol disuelto al 1.5%: 422 minutos (aumento del 8,340%).

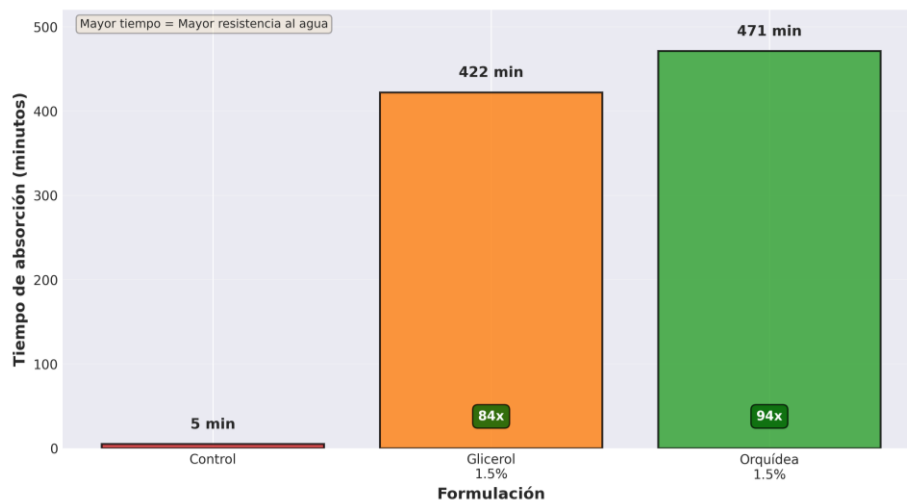


Figura 4. Comparación de resistencia a la absorción de agua mediante Prueba Karsten. El mucílago de orquídea al 1.5% requirió 471 minutos para absorber 4 ml de agua (94 veces más que el control), seguido por glicerol al 1.5% con 422 minutos (84 veces más). Un tiempo mayor indica mayor resistencia al agua y mejor protección del revoque ante condiciones de lluvia.

Nota: Elaboración propia.

Esta resistencia sugiere la formación de redes poliméricas hidrofóbicas que protegen la estructura del revoque, similar a los mecanismos reportados en materiales derivados de plantas adaptativos al clima (Huang et al., 2022; Flores-Vivián et al., 2013).

## DISCUSIÓN

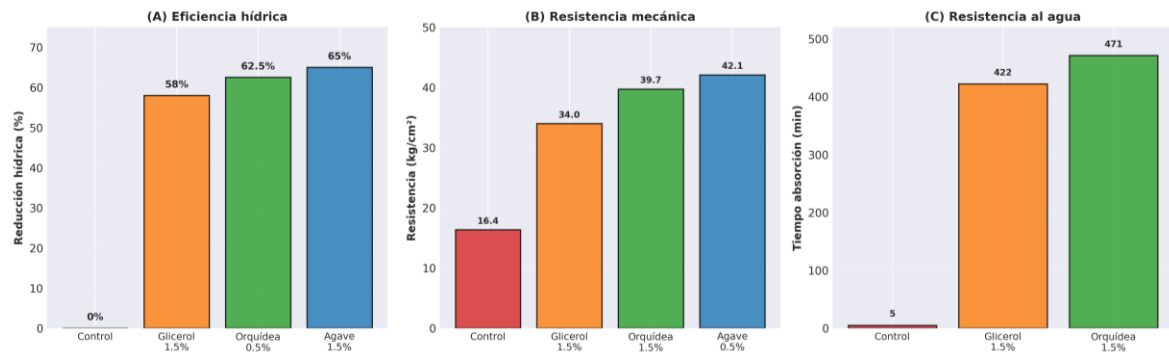


Figura 5. Comparación integral de propiedades entre formulaciones. (A) Eficiencia hídrica: el agave al 1.5% logró la mayor reducción (65%). (B) Resistencia mecánica: el agave al 0.5% alcanzó la mayor resistencia a compresión (42.09 kg/cm²). (C) Resistencia al agua: la orquídea al 1.5% demostró el mayor tiempo de absorción (471 minutos). Permite visualizar el desempeño comparativo de cada formulación en las tres variables principales del estudio.

Nota: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de heteropolisacáridos de plantas endémicas mexicanas y glicerol industrial mejora significativamente las propiedades del tepetate como material de revoque.

### *Eficiencia hídrica y sostenibilidad*

La reducción del consumo de agua entre 58% y 65% representa un avance sustancial para la construcción sostenible en regiones con escasez hídrica. El mucílago de agave al 1.5% logró la mayor reducción (65%), seguido por las formulaciones con orquídea y nopal fresco al 1% (62.5%). Estos valores son consistentes con estudios previos sobre el uso de mucílago de cactáceas en materiales de construcción (Guerrero y Ávila, 2019; Chandra & Eklund, 2020).

La capacidad de retención hídrica de los polisacáridos complejos explica este comportamiento. Las estructuras moleculares de los mucílago forman redes que mantienen el agua dentro de la matriz del mortero, optimizando la hidratación del tepetate sin requerir exceso de agua libre.

### *Resistencia mecánica*

El aumento en la resistencia a la compresión observado en todas las formulaciones con aditivos, comparado con la muestra control (16.36 kg/cm<sup>2</sup>), indica una mejora en la cohesión interna del material. El mucílago de agave al 0.5% alcanzó el valor más alto (42.09 kg/cm<sup>2</sup>, 157% superior al control), seguido por el mucílago de orquídea al 1.5% (39.73 kg/cm<sup>2</sup>, 143% superior).

La consistencia en las resistencias obtenidas con nopal envejecido y glicerol en todas las concentraciones (25-27 kg/cm<sup>2</sup> y 33-35 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente) sugiere un comportamiento más predecible, ventajoso para aplicaciones prácticas donde pequeñas variaciones en dosificación no comprometerían significativamente el desempeño.

### *Resistencia al agua*

La prueba Karsten reveló que las formulaciones al 1.5% presentaron mayor resistencia a la absorción de agua. El mucílago de orquídea al 1.5% requirió 471 minutos para absorber 4 ml (9,320% más que el control), seguido por glicerol al 1.5% con 422 minutos (8,340% más). Estos resultados indican la formación de una superficie hidrófoba protectora, crítica para la durabilidad de revoques expuestos a la intemperie.

La prueba de inmersión total confirmó la resistencia excepcional del mucílago de agave al 0.5 % y al 1% y al 1.5 %, con 90 minutos de resistencia antes de la desintegración. La variabilidad en los coeficientes de absorción de la prueba italiana sugiere que diferentes aditivos modifican no solo la resistencia superficial, sino también la estructura interna del material.

### *Implicaciones para aplicaciones de restauración*

Los resultados permiten recomendar formulaciones específicas según las necesidades del proyecto:

- Para máxima resistencia mecánica: Mucílago de agave al 0.5%
- Para máxima resistencia al agua: Mucílago de orquídea al 1.5% o glicerol al 1.5%
- Para aplicaciones generales con comportamiento predecible: Glicerol al 1%
- Para máxima reducción de agua: Mucílago de agave al 1.5%

La compatibilidad de estos materiales modificados con sustratos históricos de tierra requiere validación en campo para confirmar su idoneidad en diferentes condiciones ambientales y tipos de edificaciones patrimoniales.

## *Implicaciones para la sostenibilidad*

### *Escalabilidad y replicación*

Potencial de implementación. El potencial de escalabilidad del modelo desarrollado se fundamenta en la abundante disponibilidad de recursos naturales e industriales en territorio mexicano. La presencia de tepetate en aproximadamente el 60% del territorio nacional proporciona una base material extensa para la implementación de las tecnologías desarrolladas, mientras que la extraordinaria biodiversidad endémica, que comprende más de 12,000 especies vegetales con potencial biotecnológico, ofrece oportunidades prácticamente ilimitadas para la expansión de la investigación (CONABIO, 2020).

La producción anual de 100,000 toneladas de glicerol como subproducto industrial garantiza el suministro de este componente clave para aplicaciones constructivas a escala nacional. Paralelamente, la demanda existente de más de 140,000 inmuebles patrimoniales que requieren restauración proporciona un mercado inmediato para la implementación de estas tecnologías sustentables (Dirzo et al., 2014).

La replicabilidad del modelo se ve favorecida por la diversidad de ecosistemas mexicanos y la distribución geográfica de las especies endémicas, que permite la adaptación de protocolos de extracción a diferentes regiones biogeográficas. Esta característica facilita el desarrollo de cadenas de suministro regionales que reducen costos de transporte y fortalecen economías locales.

## **CONCLUSIONES**

### *Transformación del paradigma constructivo*

Este estudio demuestra que la construcción sustentable no solo es técnicamente viable sino superior en rendimiento a métodos convencionales. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran de manera concluyente que la construcción sustentable no solo representa una alternativa técnicamente viable a los métodos convencionales, sino que establece un nuevo estándar de rendimiento superior. La reducción de hasta 65% en el consumo hídrico, combinada con mejoras mecánicas, redefine las expectativas de desempeño para materiales constructivos destinados a regiones áridas y semiáridas (Ramírez-Villegas et al., 2020).

Esta transformación del paradigma constructivo trasciende la mera sustitución de materiales, estableciendo un marco conceptual donde la sustentabilidad y el alto

rendimiento convergen sinérgicamente. Los resultados evidencian que la integración de biodiversidad mexicana en aplicaciones constructivas genera beneficios múltiples que incluyen eficiencia hídrica, resistencia mecánica mejorada y durabilidad excepcional, superando consistentemente las propiedades de materiales convencionales (Berardi, 2017; UNEP, 2023)

#### *Modelo replicable de bioprospección*

La metodología desarrollada establece un protocolo sistemático para la valorización biotecnológica de especies endémicas mexicanas que puede aplicarse a escala nacional. Este enfoque integra conocimiento tradicional con validación científica moderna, creando un puente metodológico entre la sabiduría ancestral y la biotecnología contemporánea (Toledo & Barrera-Bassols, 2017).

El modelo de bioprospección propuesto incentiva la conservación mediante uso sustentable, transformando la rica biodiversidad nacional en ventaja tecnológica competitiva. La sistematización de protocolos de extracción sustentable, evaluación de propiedades y optimización de formulaciones proporciona un marco replicable para la exploración de otras especies endémicas con potencial constructivo, estableciendo las bases para un programa nacional de bioprospección aplicada (Vázquez-Barrios & Martínez, 2020; García-Mendoza et al., 2004).

#### *Recomendaciones para la implementación*

1. Desarrollo de normas técnicas para incorporación de mucílagos en especificaciones constructivas.
2. Programas de capacitación para comunidades rurales en extracción y procesamiento.
3. Incentivos fiscales para proyectos que incorporen materiales de biodiversidad nacional.
4. Investigación expandida en otras especies endémicas con potencial constructivo.

#### *Visión a largo plazo*

La integración sistemática de biodiversidad mexicana en materiales constructivos posiciona al país como líder potencial en biotecnología aplicada a construcción sustentable, generando simultáneamente conservación biológica, seguridad hídrica y desarrollo económico rural. Este modelo representa una estrategia de adaptación al cambio

climático fundamentada en soluciones basadas en naturaleza que maximiza co-beneficios ambientales y sociales (IPCC, 2022; Sarukhán et al., 2017).

Este modelo representa una estrategia de adaptación al cambio climático basada en soluciones naturales que maximiza cobeneficios ambientales y sociales. Las perspectivas de desarrollo futuro incluyen la expansión hacia otras aplicaciones constructivas y el desarrollo de materiales compuestos de segunda generación que integren múltiples especies endémicas. La visión de largo plazo contempla la consolidación de México como referente en construcción sustentable basada en biodiversidad, transformando la riqueza biológica nacional en ventaja tecnológica (Altieri & Toledo, 2011).

Esta investigación pretende establecer bases científicas y metodológicas para una mejora constructiva que convierte el patrimonio biológico nacional en motor de innovación tecnológica, demostrando que la sustentabilidad y el alto rendimiento no solo son compatibles, sino sinérgicos en la generación de soluciones constructivas avanzadas.

#### Agradecimientos

Agradecemos a las comunidades locales de Oaxaca y Tlaxcala por compartir conocimientos tradicionales sobre el aprovechamiento de plantas endémicas, y al Laboratorio de Tecnologías Tradicionales (Tectrad) por facilitar materiales y equipamiento especializado.

#### REFERENCIAS

- Aghdam, A. B., Kamyab, H., Yuzir, A., Aghdam, E. B., & Chelliapan, S. (2023). Reviewing the role of water in sustainable construction: Water footprint assessment and reduction strategies. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137563.
- Ahmed, H., Tizani, W., Mohammed, A., & Kurda, R. (2023). Water scarcity and sustainable construction: A systematic review of water recycling in building materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106847.
- Ali, M., et al. (2024). Water footprint reduction in construction materials: A comprehensive review of sustainable practices. *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00583.
- Altieri, M. A., & Toledo, V. M. (2011). The agroecological revolution in Latin America: Rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies*, 38(3), 587-612.

- Anand, C. K., & Amor, B. (2022). Recent advances in bio-based building materials. *Materials Today Sustainability*, 18, 100144.
- Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., & Dotelli, G. (2017). Life cycle assessment of natural building materials: The role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of rammed earth and straw bale techniques. *Journal of Cleaner Production*, 142, 189-207.
- Benítez-Malvido, J., Martínez-Falcón, A. P., Dattilo, W., & González-DiPierro, A. M. (2018). The role of plant diversity and chemical defense in ecological restoration. *Plant Ecology*, 219(5), 537-551.
- Berardi, U. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 230-241.
- Berkes, F. (2018). *Sacred ecology* (3ª ed.). Routledge.
- Cardeño, F., Gallego, L. J., & Ríos, L. A. (2011). Refinación de la fase glicerina del biodiesel de aceite de palma empleando ácidos minerales. *Información Tecnológica*, 22(6), 15-24.
- Chandra, S., & Eklund, L. (2020). Cactus mucilage as sustainable bio-additive in concrete: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 247, 118631.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2020). *La biodiversidad en México: Síntesis de conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*.
- Comisión Nacional del Agua. (2023). Atlas del agua en México 2023. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/atlas-del-agua-en-mexico>
- Dirzo, R., Young, H. S., Galetti, M., Ceballos, G., Isaac, N. J., & Collen, B. (2014). Defaunation in the Anthropocene. *Science*, 345(6195), 401-406.
- Flores-Vivián, I., Hejazi, V., Kozhukhova, M. I., Nosonovsky, M., & Sobolev, K. (2013). Self-assembling particle-siloxane coatings for superhydrophobic concrete. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(13), 6247-6253.
- Gama-Castro, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: El caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 133-145.
- García-Alonso, L., & Ruvalcaba, J. L. (2020). Research and conservation of bio-cultural heritage and traditional technologies. En *47th Conference of CIMUSET* (pp. 116-125). CIMUSET.
- García-alonso, L., Vázquez, M., & Guerrero, L. (2025). Enhancing tepetate renders with endemic plant mucilage and safe additives: a sustainable approach to

architectural conservation. *ArtGRID - Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, 7(1), 77-88. <https://doi.org/10.57165/artgrid.1563266>

- García-Mendoza, A. J., Ordóñez, M. J., & Briones-Salas, M. (Eds.). (2004). *Biodiversidad de Oaxaca*. Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32.
- González, A., Guerrero, L., & Quiroa, J. (2024). Bajareque tecnificado. Evaluación de agua incorporada en comparación con la edificación convencional. *Limaq*, 14, 145-167.
- González-Cortázar, M., Herrera-Ruiz, M., Zamilpa, A., Jiménez-Ferrer, E., Tortoriello, J., & Alvarez, L. (2021). Mucilage from *Opuntia* species as natural additive for construction materials: A review of traditional knowledge and scientific validation. *Industrial Crops and Products*, 171, 113896.
- Guerrero, L. (2018). Identificación y valoración del patrimonio precolombino construido con tierra modelada. *Anales del Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas Mario J. Buschiazzo*, 48(1), 125-141.
- Guerrero, L., & Ávila Boyas, E. (2019). Pañetes de tierra estabilizada con nopal. *Revista Nodo*, 14(27), 53-62.
- Guerrero, L., Ávila, E., & García-Alonso, L. (2022). El glicerol como estabilizante de revoques de tierra. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 11(21), 83-97.
- Huang, B., Zhang, H., Li, Y., Wang, J., & Chen, X. (2022). Climate-adaptive building materials: A review of bio-based solutions for water management. *Building and Environment*, 208, 108594.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II contribution to the sixth assessment report*. Cambridge University Press.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- Koleff, P., Urquiza-Haas, T., & Contreras, B. (2012). Prioridades de conservación de los bosques tropicales en México: reflexiones sobre su estado de conservación y manejo. *Ecosistemas*, 21(1-2), 6-20.

- Mahmood, A., Ahmad, S., Khan, M. A., Mirza, J., & Shah, S. N. (2024). Enhancing concrete properties with *Agave americana* fiber reinforcement. *ACS Omega*, 9(8), 9456-9467.
- Martínez-López, M., García-Hernández, C., Ruiz-Terán, F., & Villalobos-Pietrini, R. (2023). Traditional ecological knowledge of *Agave lechuguilla* sustainable management in Northern Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 19(1), 1-15.
- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1(1), 69-76.
- Ogunbode, E. B., Coker, A. O., & Sridhar, M. K. (2022). Water conservation in the building and construction industry: A systematic review. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102723.
- Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710-718.
- Ramírez-Villegas, J., Molero Milan, A., Alexandrov, N., Asseng, S., Challinor, A. J., Crossa, J., van Eeuwijk, F., Ghanem, M. E., Grenier, C., Heinemann, A. B., Kelly, A. M., Kholová, J., Kroupin, P. Y., Mallikarjuna Swamy, B. P., Ndikumana, T., Quiroz, R., Rodriguez, M., Roorkiwal, M., Sonder, K.,... Reynolds, M. (2020). Climate change impacts on Mexican agriculture: Evidence from panel data. *Agricultural Systems*, 177, 102697.
- Rodríguez-Hernández, A. I., Muñoz-Muñoz, F., Guarneros-Peña, S. R., & Ibarra-Junquera, V. (2019). Cactus mucilage as an efficient natural flocculant to treat synthetic dairy wastewater. *ACS Omega*, 4(19), 18165-18173.
- Sarukhán, J., Koleff, P., Carabias, J., Soberón, J., Dirzo, R., Llorente-Bousquets, J., Halffter, G., González, R., March, I., Mohar, A., Anta, S., & de la Maza, J. (2017). *Capital natural de México: Síntesis, evaluación del conocimiento actual, escenarios y sustentabilidad*. CONABIO.
- Toledo, V. M., & Barrera-Bassols, N. (2017). Political agroecology in Mexico: A path toward sustainability. *Sustainability*, 9(2), 268.
- UN-Water. (2023). *The United Nations world water development report 2023: Partnerships and cooperation for water*. UNESCO.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Building materials and climate change: How the construction sector can contribute to climate goals*.
- Vandebroek, I., Pieroni, A., Stepp, J. R., Hanazaki, N., Ladío, A., Alves, R. R., Picking, D., Delgoda, R., Maroyi, A., van Andel, T., Quave, C. L., Paniagua-Zambrana, N. Y.,

Bussmann, R. W., Odonne, G., Abbasi, A. M., Albuquerque, U. P., Baker, J., Kutz, S., Timsina, S.,... Hurrell, J. A. (2019). Medicinal plant knowledge in three Mexican communities: Consensus within diversity. *PLoS One*, 14(6), e0218091.

- Vázquez-Barrios, V., & Martínez, M. L. (2020). Mexican endemic plants and their potential for bioprospecting in sustainable construction. *Botanical Sciences*, 98(3), 445-462.