

Interacción entre comportamiento hídrico, sales superficiales y eficacia de tratamientos de control de biodeterioro en fachadas de ladrillo cerámico en ambiente urbano húmedo

Anderson Melo Parra

Juan Carlos Roa Granados

Tutor: Walter Mauricio Barreto Castillo

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia

anderson.melo@usantotomas.edu.co; juanroag@usantotomas.edu.co; walterbarreto@usta.edu.co

1. Resumen

Este estudio experimental aplicado, desarrollado en la ciudad de Bogotá D. C., Colombia, analiza el comportamiento de ladrillos cerámicos sometidos a biodeterioro en condiciones de alta humedad y evalúa la efectividad de tratamiento de cloruro de benzalconio al 10 %, sobre el sustrato. Se emplean dos metodologías complementarias: (i) cuantificación del biodeterioro mediante procesamiento digital de imágenes, a partir de segmentación cromática y análisis por píxel para determinar el porcentaje de cobertura y su variación temporal postratamiento; y (ii) caracterización fisicoquímica del material mediante ensayos de absorción capilar, pH, contenido de sales solubles y microscopía electrónica de barrido con análisis EDS.

Los resultados evidenciaron una reducción progresiva del biofilm activo en las dos concentraciones evaluadas, con mayor respuesta en la muestra tratada con BAC al 10 %, la cual alcanzó una efectividad del 91,59 % a las 92 horas de seguimiento. Desde el punto de vista fisicoquímico, el pH presentó una variación reducida, pasando de 9,61 en la muestra sin tratamiento a 9,35 en la muestra tratada, mientras que el contenido de sales solubles aumentó de 0,09 % a 0,21 %. En el ensayo de absorción capilar se observó una reducción aproximada del 61 % en la absorción inicial de agua, aunque sin evidenciar impermeabilización total del material. El análisis SEM-EDS permitió identificar alteraciones morfológicas del biofilm, residuos superficiales asociados al tratamiento e incremento de carbono, oxígeno y cloro, compatibles con la permanencia superficial del BAC.

Se concluye que el BAC al 10 % mostró alta eficacia en la reducción del biofilm activo bajo las condiciones evaluadas; sin embargo, su desempeño debe interpretarse de manera integral, considerando la eficacia biológica, la modificación del comportamiento hídrico, el incremento de sales solubles y la interacción superficial con la matriz cerámica

Palabras clave: Biodeterioro; análisis por píxel; segmentación cromática; procesamiento de imágenes; cloruro de benzalconio; materiales cerámicos; caracterización fisicoquímica; biofilm; capilaridad; sales solubles; SEM-EDS.

2. Introducción

Bogotá, capital de Colombia, se ubica a 2.640 m s. n. m. y presenta un clima frío de montaña, clasificado como templado oceánico isotérmico (Cfb). La temperatura media anual es cercana a 13,7 °C, con máximas alrededor de 19 °C y mínimas cercanas a 7 °C. El régimen de lluvias es bimodal, con periodos húmedos entre marzo–mayo y septiembre–noviembre, y una precipitación media anual aproximada de 797 mm. Estas condiciones, sumadas a una alta frecuencia de nubosidad y neblina, favorecen la persistencia de humedad en superficies constructivas (IDEAM, 2018).

Bajo este escenario, el biodeterioro en materiales cerámicos, particularmente en ladrillo a la vista, constituye una patología recurrente. La presencia de humedad, asociada a fenómenos como la ascensión capilar y la retención de agua en la red porosa, genera condiciones propicias para la colonización de microorganismos como algas, hongos y líquenes. Esta interacción incide no solo en la alteración superficial del material, sino también en la modificación de sus propiedades fisicoquímicas, afectando su comportamiento y durabilidad (Loukou et al., 2024).

El control de estas patologías se ha abordado tradicionalmente mediante técnicas como el hidrolavado y la limpieza química (ácidos). No obstante, estos métodos presentan limitaciones relacionadas con la alteración de la superficie del material, la movilización de sales solubles y la recurrencia del biodeterioro en condiciones de humedad persistente. En este contexto, el uso de biocidas se ha incorporado como una alternativa para el control del crecimiento biológico; sin embargo, su aplicación suele centrarse en la eliminación de los agentes biológicos, sin una evaluación sistemática de sus efectos sobre las propiedades del material.

Estudios sobre conservación de materiales porosos han reportado el uso de biocidas, especialmente amonios cuaternarios, para el control del crecimiento biológico en monumentos y edificios históricos. Sin embargo, también advierten que la eficacia biológica debe evaluarse junto con la compatibilidad material–tratamiento, considerando posibles cambios en porosidad, absorción capilar, composición química y apariencia superficial (Sameño Puerto, 2018; Favero-Longo et al., 2020; Casanova Municchia et al., 2023).

En Colombia, la evidencia experimental sobre el impacto técnico de los biocidas es notablemente limitada, centrándose la investigación local primordialmente en la eficiencia de extracción y el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) de agentes naturales como lo reportan Moncada, Tamayo y Cardona (2016) para aceites esenciales de orégano y romero. Esta brecha investigativa es crítica, Si bien este estudio demuestra que en Colombia se investiga la producción y sostenibilidad de estos biocidas “verdes”, las fuentes consultadas no registran estudios locales equivalentes que evalúen el impacto fisicoquímico.

La carencia de estudios sistemáticos sobre parámetros como la absorción capilar, el pH y el contenido de sales solubles restringe la formulación de criterios de selección y más en entornos como Bogotá, donde la alta disponibilidad de agua y la humedad relativa favorecen la persistencia de biopelículas.

En este sentido, el presente estudio se orienta a evaluar el efecto de la aplicación de cloruro de benzalconio —BAC— como biocida seleccionado, sobre un material cerámico afectado por biodeterioro, mediante la comparación de sus propiedades fisicoquímicas y microestructurales antes y después del tratamiento. Para ello, se emplean ensayos de absorción capilar, determinación de pH, contenido de sales solubles y análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS).

De esta manera, el estudio aporta evidencia experimental inicial sobre el desempeño y la compatibilidad del BAC bajo las condiciones evaluadas en materiales cerámicos en contextos de alta humedad, contribuyendo a la toma de decisiones técnicas en procesos de conservación y mantenimiento de edificaciones.

3. Planteamiento del problema

El problema de investigación radica en la limitada evidencia experimental sobre la eficacia del BAC en ladrillos cerámicos afectados por biodeterioro bajo condiciones de alta humedad, así como sobre sus posibles efectos fisicoquímicos en el sustrato. Aunque los biocidas, especialmente los amonios cuaternarios, se emplean para el control del crecimiento biológico, diversos estudios advierten que su evaluación debe considerar no solo la reducción del biofilm, sino también la compatibilidad material–tratamiento, incluyendo absorción capilar, pH, sales solubles y microestructura (Sameño Puerto, 2018; Favero-Longo et al., 2020; Casanova Municchia et al., 2023).

En el contexto de Bogotá, donde la humedad persistente favorece la recolonización biológica, esta falta de información limita la toma de decisiones en conservación, mantenimiento y patología de fachadas de ladrillo a la vista. Por ello, la investigación se orienta a responder la siguiente pregunta:

¿En qué medida la aplicación de BAC reduce el biofilm activo en ladrillos cerámicos biodeteriorados y qué modificaciones fisicoquímicas genera sobre el sustrato?

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Evaluar la eficacia de la aplicación del Cloruro de Benzalconio en ladrillos afectados por biodeterioro bajo condiciones de alta humedad, así como las alteraciones fisicoquímicas que puedan afectar su compatibilidad con el material en el contexto de Bogotá

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el estado fisicoquímico, microestructural y el nivel de colonización biológica inicial del material cerámico afectado por biodeterioro
- Determinar la eficacia del tratamiento con Cloruro de benzalconio.
- Cuantificar las variaciones fisicoquímicas y microestructurales del material posterior a la aplicación del biocida.
- Analizar la compatibilidad del biocida con el material cerámico, a partir del análisis integral de las variaciones inducidas por el tratamiento

5 Marco teórico y conceptual

5.1 Biodeterioro en materiales cerámicos expuestos a alta humedad

Los materiales cerámicos, especialmente el ladrillo, presentan alta durabilidad; sin embargo, su comportamiento frente a agentes ambientales y biológicos depende de sus propiedades y condiciones de exposición. La porosidad característica de estos materiales facilita la absorción y retención de humedad, lo que favorece la migración de sales y el desarrollo de procesos fisicoquímicos que afectan su durabilidad (Torraca, 2005).

La humedad constituye el principal factor condicionante del biodeterioro, al generar condiciones propicias para la colonización de microorganismos como bacterias, hongos, algas y líquenes. Estos organismos forman biopelículas que permiten su persistencia y promueven la degradación del material mediante interacciones físicas y químicas (Matho et al., 2022; Guiamet et al., 2013).

El biodeterioro resulta de la interacción entre factores físicos, químicos y biológicos, manifestándose en acumulación de biomasa, alteraciones superficiales, microfisuración y procesos de disolución o transformación mineral que afectan la durabilidad del material (Torraca, 2005; Coutinho et al., 2013; Stanaszek-Tomal, 2020).

La interacción entre humedad y sales solubles intensifica estos procesos, ya que su disolución, migración y cristalización en la red porosa genera presiones internas que provocan fisuración y pérdida de material. Este fenómeno se ve reforzado por la actividad biológica, estableciendo un ciclo progresivo de deterioro.

La bioreceptividad del ladrillo depende de su porosidad, composición, rugosidad superficial y condiciones de exposición. Su capacidad de retener humedad lo convierte en un sustrato favorable para la colonización microbiana en ambientes húmedos (Torraca, 2005; Stanaszek-Tomal, 2020).

En conjunto, el biodeterioro en materiales cerámicos expuestos a alta humedad es un proceso multifactorial que involucra la interacción entre el material, el ambiente y la actividad microbiana, lo que condiciona su desempeño y durabilidad (Coutinho et al., 2013; Stanaszek-Tomal, 2020).

5.2 Relación entre humedad, capilaridad, sales y pH

La interacción entre humedad, capilaridad, sales solubles y pH constituye un sistema fisicoquímico determinante en el deterioro de materiales cerámicos porosos. En el ladrillo, la red capilar interconectada permite el ingreso y transporte de agua y solutos, generando condiciones para procesos de disolución, migración, cristalización y transformación mineral (Sabbioni et al., 2023; Zhao et al., 2022).

La ascensión capilar es uno de los principales mecanismos de ingreso de humedad. Este fenómeno depende del tamaño de poro, la tensión superficial del agua y la afinidad entre el líquido y la matriz sólida. En materiales con poros finos, la retención de agua puede prolongarse,

favoreciendo el transporte de sales disueltas y manteniendo condiciones adecuadas para la actividad biológica.

La presencia de sales solubles intensifica el deterioro, ya que estas pueden disolverse, migrar y cristalizar dentro de la red porosa. Durante los ciclos de humedad y secado, la cristalización genera presiones internas capaces de inducir fisuración, pérdida de material y deterioro progresivo del sistema poroso. Este proceso puede mantenerse incluso en condiciones aparentemente secas, debido al comportamiento higroscópico de algunas sales (Sabbioni et al., 2023).

El pH también influye en la estabilidad química del sistema. En materiales cerámicos puede variar por efecto de sales, contaminantes atmosféricos o actividad biológica, modificando la solubilidad de compuestos minerales y condicionando la actividad microbiana. Por tanto, cambios en el pH pueden favorecer procesos de disolución, precipitación o transformación superficial.

En conjunto, humedad, capilaridad, sales y pH actúan como variables interdependientes: la humedad activa el transporte capilar, la capilaridad moviliza sales, las sales generan tensiones internas y el pH regula la estabilidad química y biológica del sistema. Esta interacción explica la complejidad del biodeterioro en ladrillos cerámicos expuestos a ambientes húmedos y la necesidad de evaluar cualquier tratamiento no solo por su eficacia biológica, sino también por sus efectos sobre el comportamiento fisicoquímico del material.

5.3 Técnicas de limpieza y control del biodeterioro

El control del biodeterioro en materiales cerámicos requiere seleccionar técnicas que reduzcan la colonización biológica sin comprometer la integridad física, química y estética del material. Estas intervenciones deben adaptarse al tipo de sustrato, contaminante y condiciones ambientales, ya que no existe un procedimiento único aplicable a todos los casos (U.S. National Park Service [NPS], 1979).

Entre los métodos físicos, el hidrolavado permite remover suciedad y biomasa superficial; sin embargo, cuando se aplica con presiones elevadas puede generar erosión, pérdida de material fino, aumento de rugosidad e incremento de la penetración de humedad. Además, la incorporación de agua puede redistribuir sales solubles y favorecer procesos de recristalización o recolonización si no se controla el secado posterior (NPS, 1979; English Heritage, 2012).

La limpieza química mediante soluciones ácidas, alcalinas o neutras, puede ser efectiva para remover depósitos y biopelículas, pero también implica riesgos asociados a disolución mineral, alteración del pH, generación o movilización de sales, manchas y decoloración. Por ello, requiere pruebas preliminares y control de concentración, tiempo de contacto y método de aplicación (NPS, 1979; Historic England, 2016).

Los biocidas, incluidos los compuestos de amonio cuaternario, actúan directamente sobre microorganismos como algas, hongos y bacterias. Su eficacia depende de la penetración, el tiempo de exposición y las condiciones ambientales; no obstante, pueden dejar residuos o modificar el comportamiento químico del material. Por esta razón, su uso debe evaluarse junto

con estrategias de control de humedad, monitoreo y análisis de compatibilidad material–tratamiento (English Heritage, 2012; Historic England, 2016).

La selección de tratamientos para el biodeterioro debe considerar no solo la remoción o reducción del agente biológico, sino también los posibles efectos sobre porosidad, sales, pH, apariencia y durabilidad del sustrato.

5.4 Interacción biocida

La aplicación de tratamientos biocidas sobre materiales cerámicos y pétreos implica una interacción entre el producto, los microorganismos y el sustrato, que puede generar modificaciones fisicoquímicas más allá de la reducción biológica. Por ello, la eficacia de un biocida debe evaluarse junto con su compatibilidad, entendida como la capacidad de no alterar negativamente las propiedades del material tratado (Sameño Puerto, 2018).

Dentro de los biocidas empleados en conservación, los compuestos de amonio cuaternario han sido utilizados por su acción sobre bacterias, algas, hongos y cianobacterias. El cloruro de benzalconio pertenece a esta familia y actúa mediante la desestabilización de membranas celulares, reduciendo la actividad biológica superficial. Sus principales ventajas son la disponibilidad comercial, la acción de amplio espectro y la posibilidad de aplicación en soluciones controladas. Sin embargo, como otros amonios cuaternarios, puede dejar residuos, modificar la humectabilidad superficial o quedar retenido en la red porosa.

La respuesta del material depende de su naturaleza mineralógica y porosa. Sameño Puerto (2018) evidenció que distintos biocidas presentan comportamientos diferenciados según el sustrato: Biotin R mostró alta eficacia con baja interacción en ciertos materiales pétreos, mientras que Preventol RI80 presentó mejor compatibilidad en materiales cerámicos como el ladrillo. Esto indica que la selección del producto debe considerar tanto su eficacia biológica como su interacción con el material.

La aplicación de biocidas también puede modificar propiedades físicas como porosidad abierta, absorción capilar y movilidad de sales. Además, el estado de hidratación del sustrato condiciona la absorción del producto y puede favorecer la movilización de sales solubles, generando procesos de recristalización y tensiones internas (Favero-Longo et al., 2020).

En este contexto, el análisis microestructural mediante SEM-EDS permite evaluar la interfase biocida-material y detectar cambios en morfología y composición. La literatura coincide en que la evaluación debe ser integral, incluyendo pH, sales solubles, capilaridad y caracterización microestructural (Sameño Puerto, 2018; Casanova Municchia et al., 2023; Favero-Longo et al., 2020).

Por lo anterior, la interacción biocida-material debe abordarse considerando la eficacia biológica, el comportamiento hídrico, la dinámica de sales y la estabilidad microestructural, especialmente en materiales cerámicos expuestos a humedad persistente.

6 Metodología

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque experimental aplicado, orientado a analizar el comportamiento de un material cerámico (ladrillo) afectado por procesos de biodeterioro asociados a condiciones de alta humedad y evaluar la efectividad de tratamientos con cloruro de benzalconio aplicado sobre el sustrato.

El estudio integró dos metodologías complementarias:

- Cuantificación del biodeterioro y efectividad del tratamiento biocida mediante procesamiento digital de imágenes.
- Caracterización fisicoquímica del sustrato mediante ensayos de laboratorio.

La segmentación cromática permitió determinar la cobertura de biofilm activo, su variación temporal y la efectividad del tratamiento. Los ensayos de laboratorio incluyeron absorción capilar (UNE-EN 1925), pH, contenido de sales solubles y microscopía electrónica de barrido (SEM) con análisis EDS, orientados a evaluar posibles modificaciones en el material.

6.1 Selección del material

Se seleccionaron unidades de ladrillo con colonización biológica activa, representativas de condiciones reales de exposición y caracterizadas por biopelículas asociadas a humedad superficial. La selección se realizó en un inmueble ubicado en un sector cercano al Parque Nacional y a los Cerros Orientales de Bogotá. La edificación, construida en 1944, se encuentra dentro del polígono del Plan Especial de Manejo y Protección (PEMP) del Centro de Bogotá.

Previo a la aplicación de los tratamientos, se realizó el registro del estado inicial (t_0), utilizado como línea base para el análisis de cobertura del biodeterioro y la evaluación de la efectividad.

6.2 Selección y aplicación del biocida

Según la literatura revisada, existen biocidas comerciales utilizados en el control del biodeterioro, como Biotin R y Preventol RI80, aplicados en superficies minerales. Sin embargo, su baja disponibilidad en el contexto colombiano y la necesidad de importación limitaron su uso experimental. A partir de la revisión de estos productos, se identificó que pertenecen principalmente a compuestos catiónicos, especialmente amonios cuaternarios. Por ello, se seleccionó cloruro de benzalconio —BAC— en presentación comercial al 50 %, por su disponibilidad local, acción de amplio espectro y posibilidad de preparación en concentraciones controladas.

Se prepararon soluciones de BAC al 5 % y 10 %, seleccionadas como concentraciones contrastantes para comparar la respuesta del biofilm activo frente a dos niveles de exposición al principio activo, sin ampliar excesivamente la matriz experimental ni los costos de ensayo.

Las soluciones se aplicaron mediante aspersión directa sobre la superficie afectada, sin remoción mecánica de la capa biológica, con el fin de mantener un enfoque no invasivo y evitar alteraciones físicas sobre la microestructura del ladrillo. La aplicación se realizó sobre un biofilm consolidado, bajo una condición exigente de penetración y contacto con la biopelícula.

Para el tratamiento experimental se aplicó un consumo equivalente a 1,126 L/m², procurando cubrir homogéneamente el área delimitada de análisis. Posteriormente, se realizó seguimiento fotográfico durante seis días, con registros en jornada de mañana y tarde.

Para el análisis de laboratorio se seleccionó la muestra tratada con BAC al 10 %, debido a que presentó la mayor reducción de biofilm activo en el procesamiento digital de imágenes y representó el escenario de mayor interacción potencial entre el biocida y el sustrato, en términos de retención de residuos, transporte hídrico capilar e interacción superficial con la matriz cerámica.

6.3 Registro temporal y adquisición de imágenes

Se definió un periodo de seguimiento de seis días para registrar la evolución inicial del efecto del biocida, considerando que los compuestos de amonio cuaternario actúan progresivamente sobre el biofilm. Bajo condiciones de aplicación sin remoción mecánica previa, se realizaron capturas en dos momentos diarios: jornada de la mañana y jornada de la tarde.

Para garantizar la consistencia del registro, se controlaron el ángulo de toma, encuadre, distancia aproximada, iluminación, temperatura y humedad relativa. Se empleó el mismo dispositivo durante toda la secuencia, manteniendo constante la posición relativa entre cámara y muestra. Las imágenes fueron tomadas con iluminación natural indirecta, evitando exposición solar directa, sombras proyectadas o reflejos.

Durante el seguimiento, la temperatura ambiental osciló entre 11 °C y 20 °C, mientras que la humedad relativa varió entre 61 % y 81 %. Con ello se construyó una serie temporal de ocho momentos de análisis (t₀–t₇), consolidando 16 observaciones experimentales correspondientes a las dos concentraciones evaluadas.

6.4 Procesamiento digital de imágenes

El avance del tratamiento se evaluó mediante procesamiento digital de imágenes desarrollado en Python, empleando principalmente las librerías OpenCV, NumPy y Matplotlib para segmentación cromática, análisis por píxel y representación gráfica. El objetivo del script fue identificar y cuantificar las zonas con biofilm activo, biofilm muerto o remanente y sustrato expuesto, a partir de la secuencia temporal de fotografías.

Se definió una máscara fija de análisis para cada muestra, aplicada de forma consistente durante toda la serie temporal. Las imágenes fueron normalizadas y alineadas respecto a la imagen inicial (T₀) para reducir diferencias de iluminación, sombra, exposición y pequeños desplazamientos de encuadre. La normalización incluyó ajuste de balance de color y mejora de contraste local mediante ecualización adaptativa.

La segmentación cromática se realizó principalmente en los espacios de color HSV y LAB. El HSV permitió diferenciar tonalidad, saturación y brillo, mientras que LAB apoyó la separación cromática con menor sensibilidad a cambios de iluminación. A partir de estos espacios, el script clasificó los píxeles en biofilm activo, biofilm muerto/remanente y superficie

expuesta. La variable principal de eficacia fue la cobertura de biofilm activo, por representar la fracción biológicamente relevante del deterioro.

La cuantificación se realizó mediante conteo de píxeles dentro de la máscara fija, calculando cobertura activa, cobertura muerta, exposición del sustrato y efectividad del tratamiento respecto a T0, según las variables definidas en la Tabla 1. Para reducir falsos positivos, el procedimiento excluyó ruido de fondo, sombras, textura mineral intensa e irregularidades superficiales no consistentes con la evolución temporal.

Como complemento visual, el script generó mapas de calor en los que la intensidad cromática representa la concentración espacial del biofilm detectado. La escala tipo JET se interpretó de forma gradual: colores cálidos indicaron mayor intensidad de cobertura, tonos intermedios una presencia moderada y colores fríos una menor detección de biofilm. Estos mapas no reemplazaron la cuantificación numérica, sino que permitieron visualizar espacialmente la reducción del biofilm activo durante el tratamiento.

La segmentación cromática fue calibrada para identificar principalmente biofilm activo; por tanto, los resultados representan la dinámica de la actividad biológica visible y no la eliminación física total del material orgánico superficial. El avance del biocida se interpretó a partir de tres comportamientos: disminución de la cobertura activa, aumento de la exposición del sustrato y persistencia o variación del biofilm muerto/remanente.

La validación del procedimiento se realizó mediante controles internos de consistencia: uso de máscara fija, verificación visual frente a fotografías originales, revisión de mapas de calor, control de falsos positivos y estabilidad del número total de píxeles analizados en cada muestra.

Tabla 1

Variables del procesamiento digital de imágenes

VARIABLE	SÍMBOLO	CÁLCULO	UND	INTERPRETACIÓN
Píxeles totales de la muestra	P_total	Conteo de píxeles dentro de la máscara del ladrillo	píxeles	Área total de análisis de la muestra
Píxeles de biofilm activo	P_activo	Conteo de píxeles clasificados como biofilm activo	píxeles	Superficie con colonización biológica activa
Píxeles de biofilm muerto/remanente	P_muerto	Conteo de píxeles clasificados como residuo muerto o remanente	píxeles	Superficie con restos no activos de colonización
Cobertura activa	C_activo	$(P_{\text{activo}} / P_{\text{total}}) \times 100$	%	Fracción de la muestra ocupada por biofilm activo
Cobertura muerta	C_muerto	$(P_{\text{muerto}} / P_{\text{total}}) \times 100$	%	Fracción de la muestra ocupada por residuo muerto/remanente
Exposición	E	$100 - C_{\text{activo}}$	%	Porcentaje de superficie no clasificada como biofilm activo
Efectividad del biocida	Ef	$((C_{\text{activo_T0}} - C_{\text{activo_Tn}}) / C_{\text{activo_T0}}) \times 100$	%	Reducción relativa del biofilm activo respecto a T0

6.5 Laboratorios

Se realizó un análisis comparativo pre y post tratamiento, utilizando una muestra con biodeterioro activo como línea base y una muestra tratada con BAC al 10%. La selección de la

muestra tratada al 10 % respondió a que esta concentración presentó la mayor reducción de biofilm activo en el análisis digital de imágenes y representó el escenario de mayor interacción potencial entre el biocida y el sustrato

Los ensayos incluyeron: absorción capilar (UNE-EN 1925), pH (INV E-768:2013), contenido de sales solubles (INV E-158:2013) y microscopía electrónica de barrido (SEM) con análisis EDS.

Estos ensayos permitieron evaluar cambios en la porosidad, transporte hídrico, composición química y microestructura del material, asociados al tratamiento biocida.

Los resultados de laboratorio fueron utilizados para interpretar las variaciones observadas en el análisis digital, permitiendo establecer la relación entre la reducción del biofilm activo y las modificaciones físicas y químicas del material. Se reconoce como limitación metodológica que los ensayos fisicoquímicos se realizaron únicamente sobre la muestra tratada al 10 %, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación experimental aplicada y no como una validación estadística generalizable a todas las concentraciones o condiciones de exposición.

7 Resultados y análisis

7.1 Resultados del análisis mediante procesamiento digital de imágenes

Los resultados presentados en este capítulo corresponden al análisis realizado mediante procesamiento digital de imágenes, basado en segmentación cromática y conteo de píxeles.

Este enfoque permitió cuantificar la evolución del biofilm sobre la superficie de las muestras de ladrillo a lo largo del tiempo, mediante indicadores como cobertura activa, cobertura muerta, exposición y efectividad del tratamiento.

Es importante señalar que estos resultados constituyen una de las dos líneas de análisis de la investigación, complementándose con los resultados obtenidos a partir de ensayos fisicoquímicos de laboratorio.

7.1.1 Estabilidad del área de análisis

La estabilidad del área de análisis se verificó mediante el número total de píxeles contenidos en la máscara fija de cada muestra. Durante toda la serie temporal (**T0–T7**), el área evaluada se mantuvo constante:

- Ladrillo superior (BAC 5 %): 249.222 píxeles.
- Ladrillo inferior (BAC 10 %): 247.002 píxeles.

Como se observa en la Figura 1, la delimitación mediante máscara permitió conservar áreas de medición estables durante el procesamiento. Esta condición garantiza que las variaciones registradas correspondan a cambios en la cobertura del biofilm y no a diferencias en el área analizada.

Figura 1*Muestra inicial y mapeo*

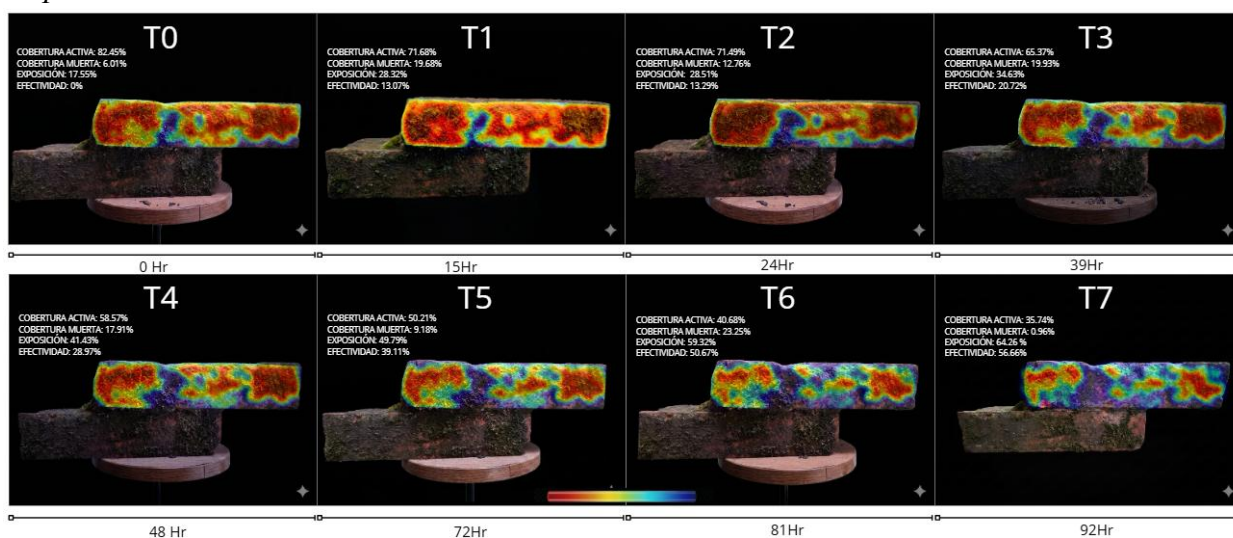
Nota. A la izquierda, muestra sin tratamiento; a la derecha, aplicación de máscara por píxel.

7.1.2 Análisis visual del proceso

El análisis visual de las fotografías y mapas de calor evidencia una reducción progresiva del biofilm activo en ambas muestras, como se observa en las Figuras 2 y 3.

En la muestra tratada con BAC al 5 %, la reducción fue gradual y persistieron zonas con cobertura visible hacia los tiempos finales. En contraste, la muestra tratada con BAC al 10 % presentó una disminución más acelerada y mayor exposición del sustrato en T7.

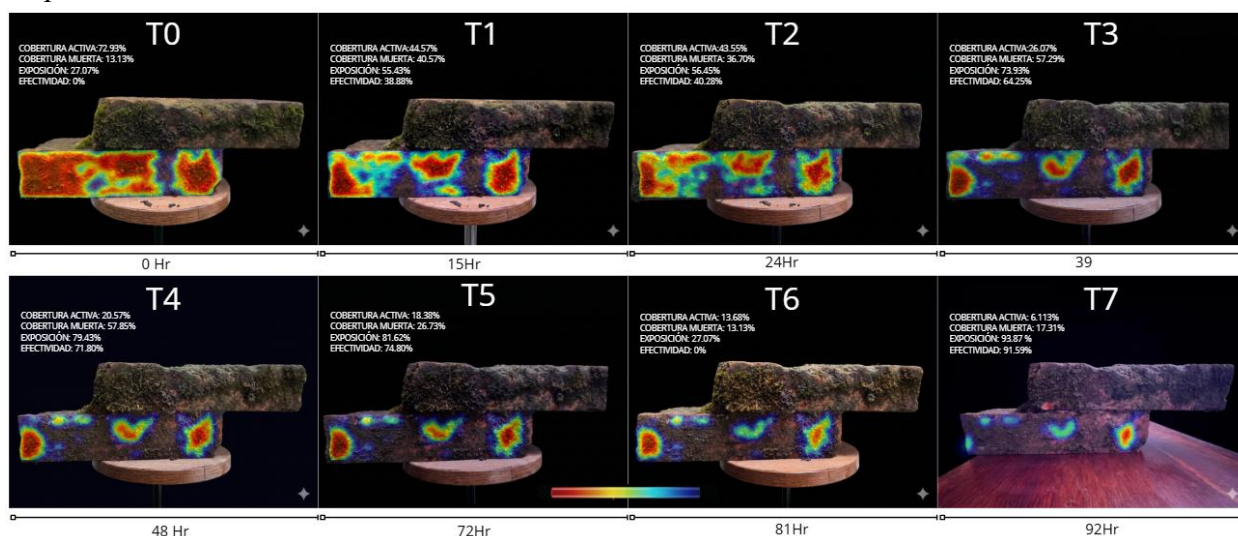
Los mapas de calor muestran una transición de zonas de alta intensidad, representadas por colores cálidos, hacia zonas de menor intensidad, asociadas a colores fríos, lo que indica la reducción espacial del biofilm activo durante el seguimiento.

Figura 2*Mapa de calor del tratamiento con BAC al 5 %*

Nota. Efectividad del tratamiento representada en mapa de calor con BAC al 5 %.

Figura 3

Mapa de calor del tratamiento con BAC al 10 %



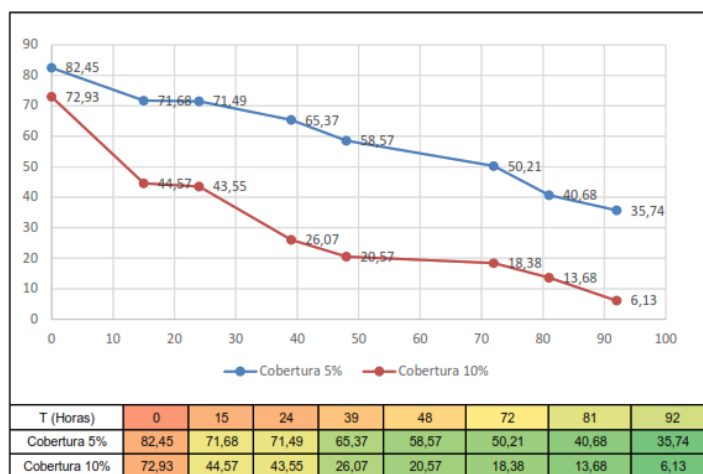
Nota. Efectividad del tratamiento representada en mapa de calor con BAC al 10 %.

7.1.3 Evolución de la cobertura de biofilm activo

Se observa una disminución progresiva de la cobertura activa en ambas muestras. La reducción es más pronunciada en la muestra tratada con BAC al 10 %, especialmente en los primeros tiempos del ensayo, como se observa en la Figura 4.

Figura 4

Cobertura de biofilm activo en el tiempo



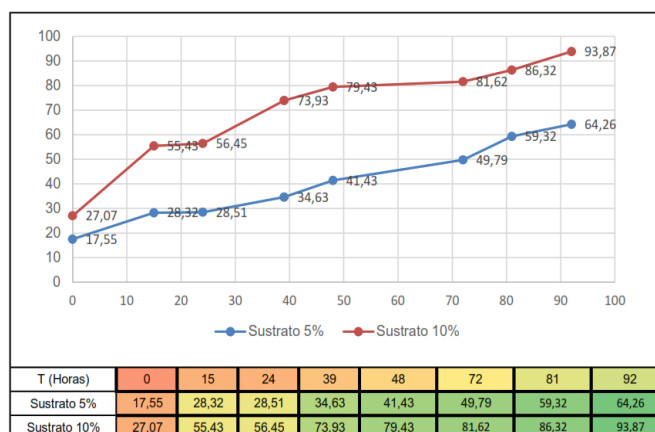
Nota. Cobertura de biofilm activo en el tiempo hasta 92 horas.

7.1.4 Evolución de la exposición superficial

La exposición presenta un comportamiento inverso al de la cobertura activa, aumentando progresivamente en ambas muestras. La muestra tratada con BAC al 10% alcanza valores significativamente mayores en menor tiempo. Como se observa en la Figura 5

Figura 5

Exposición superficial del sustrato



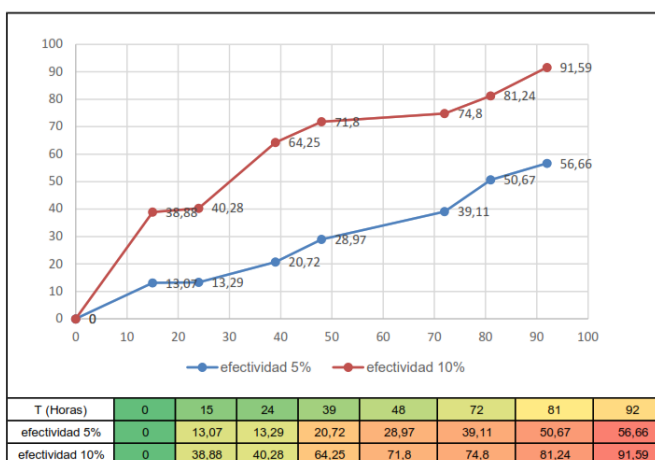
Nota. Exposición del sustrato a las 92 horas: 93,87 % en la muestra tratada con BAC al 10 %.

7.1.5 Evolución de la efectividad del tratamiento

La efectividad del tratamiento aumenta progresivamente en ambas concentraciones, siendo más alta y más rápida en la muestra tratada con BAC al 10%. Como se muestra en la Figura 6, la concentración del 10% muestra una efectividad del 91,59 % a las 92 hrs.

Figura 6

Efectividad del tratamiento hasta las 92 horas



Nota. Efectividad de las concentraciones desde la aplicación hasta las 92 horas.

7.1.6 Integración de resultados

El análisis conjunto de las variables evidencia que:

- la cobertura activa disminuye progresivamente,
- la exposición aumenta de forma inversa,
- y la efectividad del tratamiento se incrementa con el tiempo.

Estas tendencias se presentan en ambas concentraciones, con diferencias en la velocidad y magnitud del cambio, siendo más pronunciadas en la muestra tratada con BAC al 10%.

7.1.7 Síntesis de los resultados del análisis por imágenes

El procesamiento digital de imágenes permitió cuantificar de manera objetiva la evolución del biofilm sobre la superficie del ladrillo, evidenciando comportamientos diferenciados entre las dos concentraciones evaluadas.

Este enfoque proporciona una base cuantitativa para el análisis del biodeterioro, permitiendo complementar los resultados obtenidos mediante ensayos fisicoquímicos de laboratorio.

7.2 Resultados de laboratorio

7.2.1 Caracterización fisicoquímica pre y postratamiento

7.2.1.1 Estabilidad química y compatibilidad de pH

La medición de pH se incorporó como indicador de estabilidad química, dado que variaciones significativas pueden reflejar procesos de acidificación, alcalinización o interacción entre el tratamiento y la matriz cerámica.

Los resultados evidenciaron un valor de pH 9,61 en la muestra sin tratamiento y pH 9,35 en la muestra tratada con cloruro de benzalconio —BAC—, equivalente a una variación de 0,26 unidades. Estos valores corresponden a mediciones puntuales reportadas por el laboratorio, por lo que no se dispone de desviación estándar ni error asociado. En consecuencia, la diferencia debe interpretarse como un resultado indicativo de baja variación ácido-base, y no como una diferencia estadísticamente significativa.

Ambas muestras se mantienen dentro de un rango alcalino moderado, coherente con la naturaleza de los materiales cerámicos cocidos. Bajo las condiciones evaluadas, no se evidenció un desplazamiento ácido-base marcado asociado al tratamiento. Sin embargo, el pH por sí solo no permite concluir la compatibilidad integral del BAC, por lo que este resultado debe interpretarse junto con los análisis de sales solubles, capilaridad y microestructura.

7.2.1.2 Dinámica de sales solubles e indicadores de retención

El contenido de sales solubles se evaluó debido a que estos compuestos pueden incidir directamente en la durabilidad de materiales cerámicos porosos.

Los resultados mostraron un valor de 0,09 % (91 ppm) en la muestra inicial sin tratamiento y 0,21 % (210 ppm) en la muestra posterior a la aplicación del cloruro de benzalconio (BAC), equivalente a un incremento aproximado del 133 % frente a la condición inicial

La muestra inicial presentó un contenido soluble bajo, lo que permite inferir que el ladrillo, previo al tratamiento, se encontraba en una condición relativamente limpia desde el punto de vista salino, sin evidencia relevante de acumulación previa de sales asociadas a humedad o deterioro. Este dato es importante, ya que reduce la probabilidad de que el aumento posterior provenga de sales preexistentes movilizadas desde el interior del material.

Bajo este contexto, el incremento registrado en la muestra tratada puede asociarse de manera técnicamente razonable a la incorporación y retención parcial del cloruro de benzalconio dentro de la red porosa. El método INV E-158:2013 determina el contenido soluble a partir del residuo sólido obtenido después de extraer y evaporar la solución de ensayo; por tanto, cualquier compuesto soluble remanente en el material y susceptible de extracción puede reflejarse en el valor final reportado.

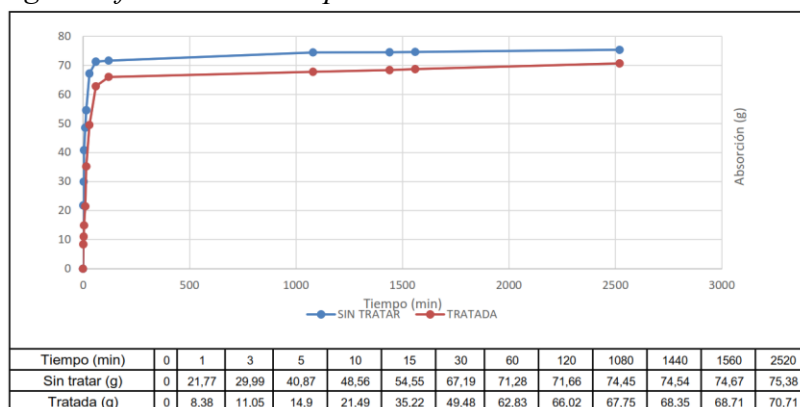
7.2.2 Comportamiento hidrodinámico y cinética de absorción

7.2.2.1 Variación del coeficiente de absorción capilar (UNE-EN 1925)

Los resultados evidenciaron diferencias relevantes entre la muestra inicial sin tratamiento y la muestra posterior a la aplicación del cloruro de benzalconio (BAC). Durante el primer minuto de exposición, la muestra sin tratar absorbió 21,77 g, mientras que la muestra tratada absorbió 8,38 g, lo que representa una reducción aproximada del 61 % en la absorción inicial, como se muestra en la figura 7.

Figura 7

Absorción de agua en función del tiempo



Nota. Absorción de agua en función del tiempo.

Este comportamiento indica que el tratamiento modificó de manera importante la respuesta inicial del material frente al contacto con agua líquida. En términos prácticos, el ladrillo tratado presentó una menor velocidad de succión capilar, es decir, una mayor resistencia al ingreso inmediato de humedad por los poros superficiales más activos.

Desde el punto de vista técnico, esta respuesta puede asociarse a la interacción del BAC con la superficie interna de la red porosa. Al tratarse de un compuesto surfactante catiónico, su adsorción sobre las paredes capilares puede modificar la energía superficial y el ángulo de contacto del agua, disminuyendo la absorción inicial del ladrillo. En consecuencia, el agua encuentra mayor resistencia para penetrar rápidamente durante los primeros instantes del ensayo.

La tendencia comparativa se mantuvo durante el desarrollo de la curva de absorción, con valores sistemáticamente menores en la muestra tratada respecto de la muestra control. Sin embargo, hacia el final del ensayo la diferencia entre ambas condiciones se redujo: la muestra sin tratamiento registró 75,38 g y la muestra tratada 70,71 g, equivalente a una variación cercana al 6 %.

Este resultado permite establecer que el tratamiento no impermeabilizó completamente el ladrillo ni bloqueó de forma total su porosidad conectada. Su efecto principal consistió en retardar la cinética inicial de ingreso del agua, más que en impedir la absorción total a largo plazo. Esta distinción es relevante, ya que un sellado absoluto podría generar acumulación interna de humedad, mientras que una reducción controlada de la capilaridad inicial puede resultar favorable para la durabilidad del material.

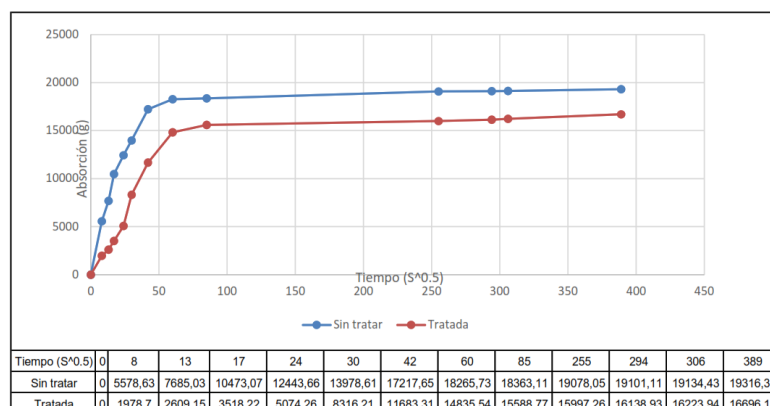
Desde la perspectiva de la patología de la construcción, una menor velocidad de absorción inicial implica menor vulnerabilidad frente a eventos cortos de lluvia, salpicadura, condensación o humectaciones intermitentes, reduciendo la disponibilidad inmediata de agua libre necesaria para la reactivación de microorganismos y la movilización de sales.

En consecuencia, los resultados del ensayo UNE-EN 1925 indican que la aplicación del BAC generó una modificación favorable del comportamiento capilar del ladrillo, actuando como regulador de la entrada inicial de humedad sin anular totalmente la capacidad natural de intercambio hídrico del material.

7.2.2.2 Análisis del efecto hidrófugo y taponamiento poroso

Los resultados del ensayo de absorción por capilaridad evidenciaron una disminución sostenida de la absorción en la muestra tratada con cloruro de benzalconio (BAC) respecto a la muestra sin tratamiento. En el primer punto de medición, la muestra control registró una absorción de 5578,63 g/m², mientras que la muestra tratada presentó 1978,70 g/m², lo que representa una reducción aproximada del 64,5 %. Esta diferencia se mantuvo a lo largo del ensayo y, al final del periodo de evaluación, la muestra sin tratamiento alcanzó 19316,37 g/m², frente a 16696,18 g/m² en la muestra tratada, equivalente a una disminución final cercana al 13,6 %. En la figura 8 se observan los resultados de análisis de capilaridad en las dos muestras.

Figura 8
Resultados de capilaridad con y sin tratamiento



Nota. Resultados de capilaridad con y sin tratamiento.

Estos resultados indican que el tratamiento modificó de forma importante la respuesta hidrodinámica del ladrillo, particularmente en la fase inicial de absorción. Desde el punto de vista físico, este comportamiento es compatible con un efecto hidrófugo inicial, ya que el BAC reduce la velocidad con la que el agua ingresa al material y aumenta la resistencia al mojado inmediato.

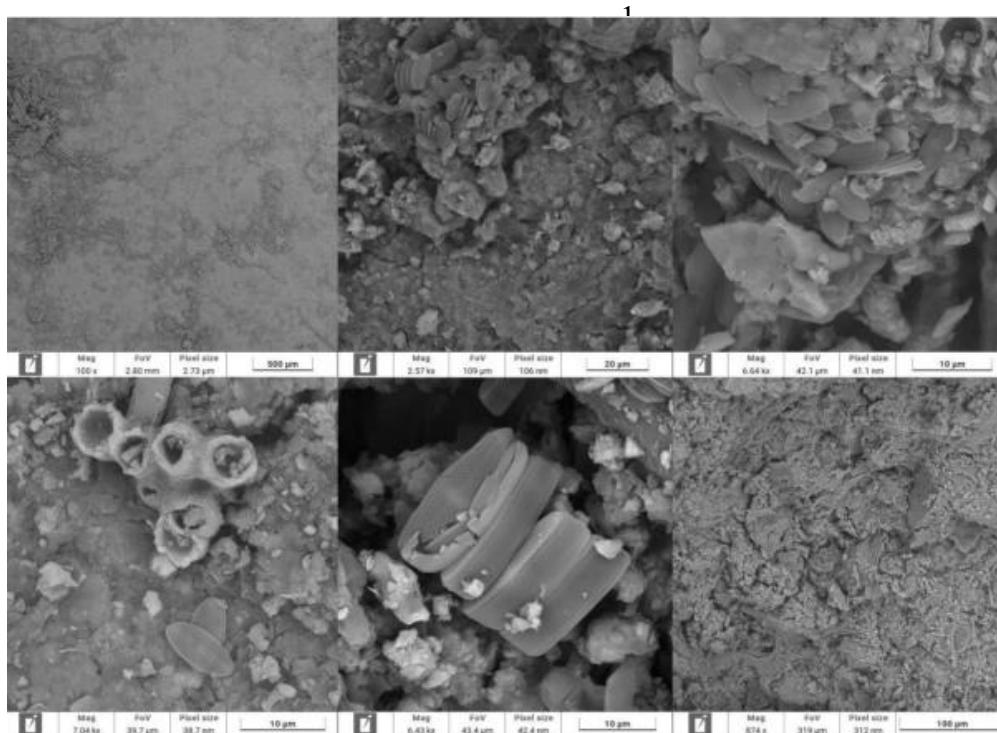
No obstante, el comportamiento de la curva también muestra que la muestra tratada continuó absorbiendo agua y alcanzó una meseta de saturación, por lo que no puede afirmarse una impermeabilización total del ladrillo. En este sentido, los datos sugieren más bien una modificación funcional de la red capilar superficial o un posible taponamiento parcial de los poros más activos, suficiente para retardar la absorción y reducir la cantidad total de agua incorporada, pero no para bloquear completamente la transferencia hídrica del material.

Desde la perspectiva de la patología de la construcción, este resultado es favorable, ya que una menor absorción inicial y una menor absorción acumulada reducen la disponibilidad de agua libre en el sistema poroso, disminuyendo las condiciones que favorecen la recolonización biológica y la movilización de sales dentro del ladrillo.

7.2.3 Caracterización microestructural y elemental (SEM-EDS)

7.2.3.1 Morfología superficial pretratamiento

El análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) correspondiente al ladrillo cerámico sin tratamiento permitió establecer la condición inicial de la superficie biodeteriorada. La Figura 9 integra micrografías a diferentes aumentos, lo que permite reconocer tanto la morfología general del sustrato como detalles asociados a la colonización biológica.

Figura 9*Morfología superficial de la muestra sin tratamiento mediante SEM*

Nota. Microscopía electrónica de barrido (SEM), muestra sin tratamiento.

En la muestra sin tratamiento se observa una superficie irregular, rugosa y heterogénea, con presencia de depósitos superficiales, cavidades abiertas, partículas finas adheridas y microfracturas. Estas discontinuidades aumentan el área expuesta y favorecen la retención temporal de humedad, condición coherente con la mayor absorción capilar registrada en la muestra inicial.

A mayores aumentos se identifican estructuras orgánicas adheridas, con morfologías elipsoidales y tubulares compatibles con microalgas silíceas, como diatomeas. Estas estructuras se localizan principalmente sobre la superficie, ocupando poros, cavidades y microfisuras accesibles, sin evidencia de penetración profunda en la matriz cerámica.

La condición inicial del material puede resumirse en tres aspectos: superficie rugosa y porosa, colonización biológica visible y presencia de depósitos superficiales asociados a humedad persistente. Esta configuración confirma la susceptibilidad del ladrillo al biodeterioro y constituye la línea base comparativa para evaluar los cambios posteriores generados por la aplicación del BAC.

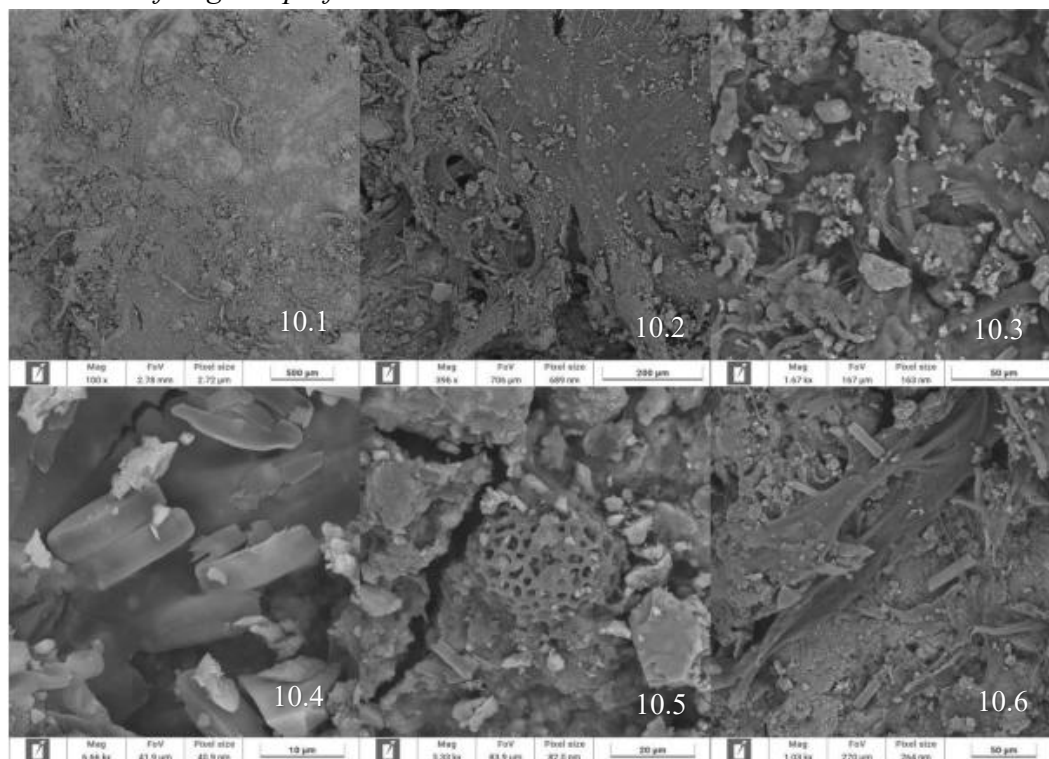
7.2.3.2 Morfología superficial postratamiento

El análisis microestructural correspondiente a la Cerámica 2 tratada con cloruro de benzalconio (BAC), evidenció modificaciones superficiales consistentes con la interacción entre

el biocida, la matriz cerámica y los remanentes biológicos presentes después de la intervención. Las imágenes de la Figura 10 muestran una superficie distinta a la condición inicial.

Figura 10

Morfología superficial de la muestra tratada con BAC mediante SEM



Nota. Microscopía electrónica de barrido (SEM), muestra con tratamiento.

En la vista general de la imagen 10.1, se observa que la superficie aparece parcialmente sellada por una capa irregular adherida. De acuerdo con la interpretación del informe de laboratorio, esta capa corresponde a precipitados del biocida, cloruro de benzalconio (BAC), retenidos sobre la superficie y dentro de la red porosa. No se trata, por tanto, de depósitos inespecíficos, sino de acumulaciones asociadas al biocida utilizado.

En aumentos intermedios, imagen 10.2 y 10.3 la capa residual presenta morfología heterogénea y distribución discontinua. Se identifican zonas donde el BAC se encuentra concentrado preferencialmente en cavidades y poros de mayor accesibilidad, fenómeno coherente con el transporte capilar de la solución líquida y su posterior retención por adsorción en las paredes internas del material cerámico. Este comportamiento respalda la hipótesis del efecto reservorio, planteada en la investigación, según la cual parte del principio activo permanece anclado en la red porosa del ladrillo posterior al tratamiento.

A mayores magnificaciones, imágenes 10.4 y 10.5 (6.66kx y 3.33kx) se reconocen que las estructuras biológicas, no conservan integridad completa: se encuentran fracturadas, colapsadas, parcialmente recubiertas por residuos de BAC o embebidas dentro de una matriz

amorfa superficial. Esta condición indica afectación estructural posterior al tratamiento y pérdida de continuidad de los organismos adheridos.

La imagen 10.6 (15 μm) evidencia organismos silíceos tubulares fracturados, lo que indica pérdida de continuidad morfológica de los remanentes biológicos posteriores a la aplicación del BAC. Este hallazgo resulta relevante porque muestra una afectación física de las estructuras adheridas, distinta a la condición pretratamiento, donde los organismos conservaban mayor integridad geométrica.

Desde el punto de vista técnico, la condición superficial postratamiento puede resumirse en tres aspectos principales:

1. Presencia de una capa residual superficial asociada al biocida aplicado.
2. Recubrimiento parcial de poros, cavidades y zonas rugosas, modificando la exposición directa de la red capilar superficial.
3. Alteración morfológica de remanentes biológicos, evidenciada por organismos cubiertos, fragmentados o fracturados.

Estos resultados guardan relación con los ensayos fisicoquímicos desarrollados en la investigación. La ocupación parcial de poros y la modificación superficial observada por SEM son coherentes con la disminución de la absorción capilar inicial registrada en la muestra tratada, mientras que la permanencia de residuos del tratamiento sobre el material puede asociarse al incremento medido en sales solubles posteriores a la aplicación.

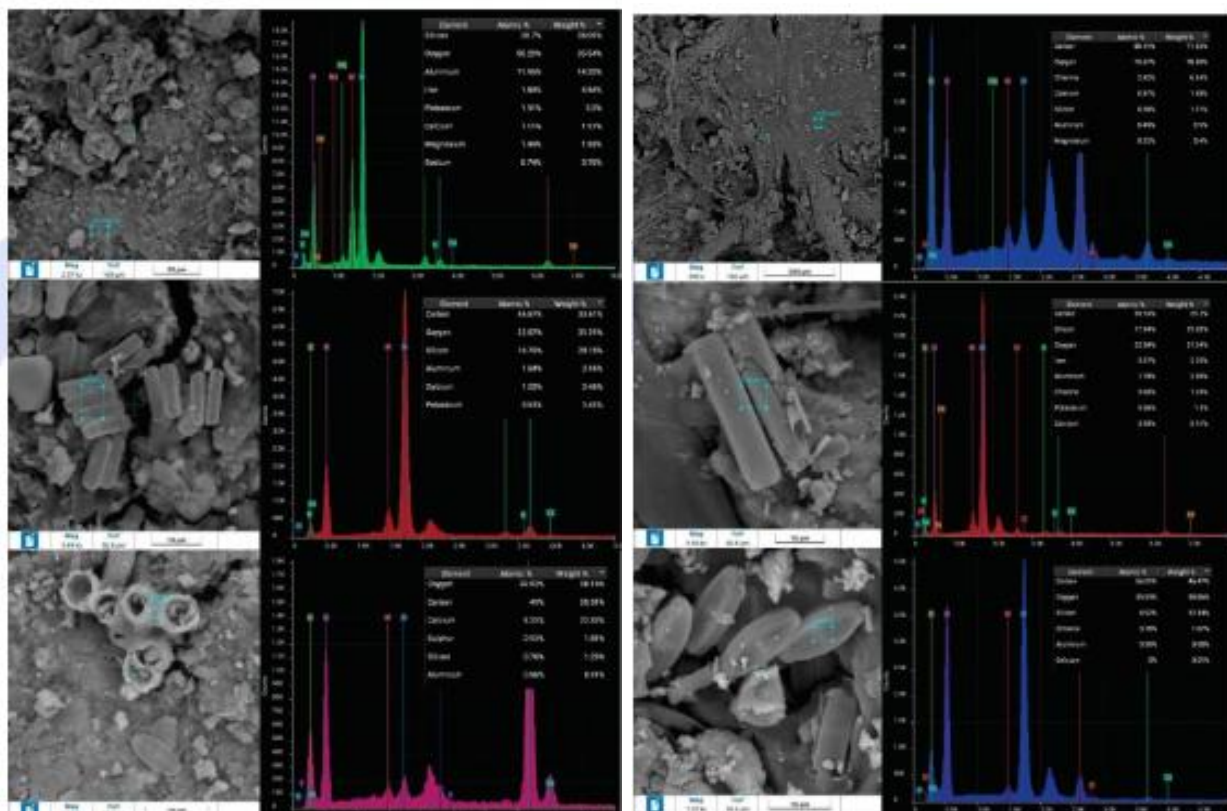
En términos de desempeño, la evidencia microestructural indica que el BAC no actuó únicamente como agente de control biológico, sino también como modificador superficial del ladrillo en la zona expuesta al ambiente. Bajo las condiciones evaluadas, el efecto se concentra en la interfaz superficie-ambiente, sin evidencia concluyente de alteraciones profundas en la matriz cerámica.

En consecuencia, la morfología postratamiento confirma una intervención efectiva sobre la colonización superficial existente y una modificación física del sistema poroso más externo, factores que pueden contribuir a disminuir la humectación inicial del material y limitar procesos posteriores de recolonización biológica.

7.2.3.3 Composición elemental por EDS

El análisis de espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS), permitió comparar la composición elemental superficial de las muestras de ladrillo en condición sin tratamiento y tratada (BAC). Esta técnica identifica los principales elementos presentes en zonas puntuales de la superficie analizada, lo que resulta útil para establecer variaciones químicas asociadas al sustrato cerámico, a la colonización biológica y al tratamiento aplicado

Figura 11
Composición elemental superficial por EDS



Nota. Espectroscopía por dispersión de energía de rayos X (EDS).

Composición de la muestra sin tratamiento

De acuerdo con el informe y a la figura 11.1, la muestra presentó una composición rica en silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y carbono (C). Esta asociación elemental es coherente con la naturaleza de un material cerámico elaborado a partir de arcillas cocidas, donde predominan fases aluminosilicáticas acompañadas de cuarzo y óxidos accesorios.

En los puntos analizados sobre estructuras biológicas adheridas, el EDS reportó contenidos altos de carbono (C) y oxígeno (O), consistentes con materia orgánica superficial. Asimismo, la detección de silicio (Si) en ciertas morfologías elipsoidales y tubulares respalda la presencia de organismos silíceos compatibles con diatomeas identificadas previamente en SEM.

Composición de la muestra tratada

Para la muestra y la figura 11.2, el laboratorio reportó un incremento relativo de carbono (C), oxígeno (O) y cloro (Cl) respecto de la condición sin tratamiento. Esta variación se asocia a la presencia superficial del biocida aplicado.

Este resultado es técnicamente consistente con el uso de cloruro de benzalconio (BAC), cuya formulación incorpora cadenas carbonadas y el ion cloruro como contraión. Por tanto, la aparición y mayor intensidad del cloro en la muestra tratada constituye un indicador químico compatible con la permanencia de residuos del producto sobre la superficie del ladrillo.

Comparación pre y postratamiento

La comparación entre ambas muestras permite establecer tres hallazgos objetivos:

- La matriz cerámica base conserva su identidad elemental, manteniéndose la presencia de Si y Al como componentes dominantes del ladrillo.
- La muestra tratada incorpora señal de Cl y mayor proporción de C y O, asociable al tratamiento aplicado.
- Las estructuras biológicas aún detectables conservan señales silíceas, aunque recubiertas parcialmente por el producto en varios puntos observados

En términos de desempeño, el EDS confirma que la aplicación del BAC produjo una huella química superficial medible, representada principalmente por el incremento de C, O y Cl, sin evidenciar cambios sustanciales en la composición elemental del sustrato cerámico. Esto respalda la hipótesis de que el biocida actuó predominantemente en la interfaz superficial del material, manteniendo la integridad química general del ladrillo bajo las condiciones evaluadas.

7.3 Integración multiescala de resultados: relación entre imagen digital y laboratorio

Uno de los aportes metodológicos de la investigación fue la articulación entre el análisis digital de imágenes y los ensayos de laboratorio. El procesamiento digital permitió cuantificar tempranamente la respuesta del biofilm al tratamiento, mientras que los ensayos fisicoquímicos y microestructurales permitieron interpretar los cambios observados en el material.

A partir de la segmentación cromática y el conteo de píxeles, se identificó una reducción significativa de la cobertura biológica activa. A las 92 horas de seguimiento, la muestra tratada con BAC al 10 % alcanzó una efectividad del 91,59 %, reduciendo la cobertura activa de 72,93 % a 6,13 %. Este resultado evidenció la utilidad del análisis digital como herramienta de seguimiento rápido para verificar la eficacia del tratamiento sobre la superficie colonizada.

Los ensayos de laboratorio permitieron complementar esta lectura. La medición de pH indicó baja variación ácido-base; el análisis de sales solubles registró un incremento asociado a la posible permanencia parcial del BAC en la red porosa; y el ensayo de absorción capilar mostró una reducción de la absorción inicial de agua. A su vez, el análisis SEM-EDS permitió

identificar alteraciones morfológicas del material biológico y residuos superficiales compatibles con el tratamiento aplicado.

En conjunto, la integración de resultados permitió relacionar la disminución del biofilm activo con cambios medibles en el comportamiento hídrico, químico y microestructural del ladrillo, fortaleciendo la interpretación del tratamiento desde un enfoque aplicado de patología de la construcción.

8. Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

La investigación permitió establecer que el cloruro de benzalconio —BAC— presentó una respuesta favorable para la reducción del biofilm activo en ladrillos cerámicos expuestos a condiciones de alta humedad. La integración entre procesamiento digital de imágenes y ensayos de laboratorio permitió analizar el tratamiento no solo desde su eficacia biológica, sino también desde su interacción con el sustrato.

El análisis digital evidenció que la concentración al 10 % alcanzó la mayor efectividad, con una reducción significativa de la cobertura activa a las 92 horas. Este resultado confirma la utilidad de la segmentación cromática y el conteo por píxeles como herramientas objetivas para el seguimiento temporal del biodeterioro superficial.

Los ensayos fisicoquímicos mostraron que el tratamiento no produjo un desplazamiento ácido-base marcado y modificó principalmente la cinética inicial de absorción capilar, sin impermeabilizar completamente el ladrillo. No obstante, el incremento de sales solubles después de la aplicación constituye un aspecto crítico que debe considerarse en términos de durabilidad y comportamiento a largo plazo.

El análisis SEM–EDS permitió confirmar que el BAC actuó principalmente en la interfaz superficie–biofilm–sustrato, generando alteración morfológica del material biológico, presencia de residuos superficiales y señales elementales compatibles con la permanencia del producto. Por tanto, el tratamiento no debe interpretarse como remoción física total del biodeterioro, sino como reducción de actividad biológica y modificación superficial del sistema.

En conjunto, el BAC al 10 % puede considerarse una alternativa técnicamente viable bajo las condiciones evaluadas; sin embargo, su aplicación debe estar precedida por diagnóstico del material y análisis de compatibilidad, especialmente en fachadas expuestas a humedad persistente o con presencia previa de sales.

Finalmente, se reconoce como limitación metodológica el tamaño muestral reducido, la ausencia de réplicas estadísticas y la caracterización fisicoquímica centrada en la muestra tratada al 10 %. Por ello, los resultados deben entenderse como evidencia experimental aplicada y no como validación generalizable. Futuras investigaciones deberán ampliar el número de muestras, incorporar análisis estadístico y evaluar el desempeño del tratamiento en condiciones reales de servicio.

8.2 Recomendaciones

La aplicación de BAC debe realizarse únicamente después de un diagnóstico previo del sistema constructivo, identificando origen de humedad, fisuras, estado de juntas, exposición solar, ventilación y condiciones de escorrentía. Sin el control de la causa hídrica, el tratamiento biocida puede convertirse en una medida temporal.

Se recomienda priorizar su uso en ladrillos o mamposterías cerámicas con bajo contenido inicial de sales solubles. En materiales contaminados con sulfatos, nitratos o cloruros, la incorporación adicional de compuestos solubles puede favorecer procesos de recristalización, manchas o deterioro durante ciclos de humedad-secado.

No se recomienda su aplicación directa en sistemas con acero embebido, anclajes metálicos o mampostería reforzada expuesta a ingreso recurrente de agua, debido al posible riesgo de corrosión asociado a la presencia de cloruros.

Las concentraciones deben definirse técnicamente según el estado del material y el nivel de colonización. Aunque el BAC al 10 % presentó mejor desempeño que el 5 % en este estudio, ello no implica que concentraciones superiores sean automáticamente más convenientes.

Después de la aplicación, se recomienda implementar monitoreo periódico mediante inspección visual, registro fotográfico comparativo y, cuando sea posible, medición de humedad superficial. En fachadas de valor patrimonial, el tratamiento debe complementarse con estrategias no invasivas de control ambiental, drenaje, ventilación y mantenimiento de juntas.

Referencias

- Casanova Municchia, A., Fidanza, M. R., & Caneva, G. (2023). Advances in testing the interference of biocides on stone materials: A comparative analysis and guidelines for a standardised approach. *Journal of Cultural Heritage*, 64, 23–41. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.08.007>
- Coutinho, M. L., Molinero, A., Gutiérrez-Patricio, S., Hernández-Mariné, M., Gómez-Bolea, A., Rogerio-Candelera, M. Á., Phillips, A. J. L., Jurado, V., Saiz-Jiménez, C., & Macedo, M. F. (2013). Microbial communities on deteriorated artistic tiles from the Pena National Palace (Sintra, Portugal). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 84, 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.05.033>
- English Heritage. (2012). *Practical building conservation: Stone*. Ashgate.
- Favero-Longo, S. E., Vannini, A., Benesperi, R., Bianchi, E., Fačkovcová, Z., Giordani, P., Malaspina, P., Martire, L., Matteucci, E., Paoli, L., Ravera, S., Roccardi, A., Tonon, C., & Loppi, S. (2020). The application protocol impacts the effectiveness of biocides against lichens. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 155, 105105. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.105105>
- Guiamet, P., Crespo, M., Lavin, P., Ponce, B., Gaylarde, C., & de Saravia, S. G. (2013). Biodeterioration of funeral sculptures in La Recoleta Cemetery, Buenos Aires, Argentina: Pre- and post-intervention studies. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 101, 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.06.037>
- Historic England. (2016). *Cleaning brickwork*. Historic England.
- Matho, K. U., Vandana, Priyadarshane, M., Samantaray, D. P., & Das, S. (2022). Bacterial biofilm and extracellular polymeric substances in environmental pollutant remediation: Beyond the protective role in survival. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134759. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134759>
- Sameño Puerto, M. (2018). *Biodeterioration in cultural heritage buildings: Methodology for evaluating biocidal treatments* [Doctoral dissertation].
- Stanaszek-Tomal, E. (2020). The influence of pore structure on moisture parameters of cement–polymer mortars contaminated with filamentous fungi. *PLOS ONE*, 15(4), e0231347. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231347>
- Stanaszek-Tomal, E. (2024). Microorganisms in red ceramic building materials—A review. *Coatings*, 14(8), 985. <https://doi.org/10.3390/coatings14080985>
- Torraca, G. (2005). *Lectures on materials science for architectural conservation*. ICCROM.
- U.S. National Park Service. (1979). *Preservation Brief 1: Assessing cleaning and water-repellent treatments for historic masonry buildings*. U.S. Department of the Interior.