

Contaminación ambiental y su influencia en las edificaciones. Estudios preliminares.

Environmental pollution and its influence on the buildings. Preliminary studies.

Cecilia Valdés¹, Francisco Corvo², Julia Pérez¹, Carmen Portilla¹, Dainerys Fernández¹.

¹*cecilia.valdes@cnic.edu.cu*

Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Ave. 25 #15202 esq. 158, Cubanacán, Playa
(Cuba)

²*corvo@imre.oc.uh.cu*

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales. Universidad de la Habana.
Calle Zapata esquina G, Vedado, Plaza 10400, Ciudad de La Habana (Cuba)

Contaminación ambiental y su influencia en las edificaciones. Estudios preliminares.

RESUMEN: En la actualidad la contaminación ambiental existente además de afectar la salud, ha incidido también en la degradación superficial de los materiales empleados en las edificaciones. Las estructuras antiguas construidas en piedra fueron enclavadas en zonas poco urbanizadas y con un mínimo o casi nulo desarrollo industrial. En nuestros días estos edificios están ubicados en zonas altamente urbanizadas e industrializadas y el material pétreo con el cual fueron erigidas, se encuentra afectado por los contaminantes químicos emitidos por las industrias y el abundante tráfico vial. El Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís data del siglo XVII y está enclavado en la Habana Vieja. Este monumento está situado en una zona urbano-marino-industrial y en la superficie del material pétreo empleado en su construcción, se evidencia la formación de costras y pátinas como consecuencia de la contaminación. En el presente trabajo se muestran los valores de NO₂ y sulfatos monitoreados en el interior de la edificación mediante captadores pasivos. Por otra parte, fue aplicado y evaluado mediante la Pipa de Karsten, la observación visual y microscópica un hidrofugante en base orgánica empleado para la protección superficial de la piedra. Se demostró la capacidad del hidrofugante de disminuir el acceso de agua en la piedra de la edificación. El yeso es el contaminante mayoritario de la costra presente en la superficie pétreo.

Palabras clave: contaminación ambiental, degradación, piedras, yeso.

Environmental pollution and its influence on the buildings. Preliminary studies.

ABSTRACT: At present the existing environmental pollution also affect health, has also affected the surface degradation of the materials used in buildings. The old stone-built structures were locked in some urban areas with minimal or almost no industrial development. Today these buildings are located in highly urbanized and industrialized areas and the stone material, with which they were erected, is affected by chemical pollutants emitted by industries and the heavy road traffic. The Basilica Minor San Francisco de Asis and Convent seventeenth century and is located in Old Havana. This monument is located in urban-industrial-marine area and on the surface of the stone used in its construction, evidenced the formation of crusts and patinas as a result of pollution. **Materials and Methods:** In this paper we show the values of NO₂ and sulphates monitored inside the building using passive sensors. On the other hand, was implemented and evaluated by Karsten Pipe, visual and microscopic observation an organic-based repellent to protect the stone surface. **Results and Conclusions:** The capacity of the products to decrease water access inside the stone was confirmed. Gypsum is the majority of the crust contaminant present in the stone surface.

Keywords: environmental pollution, degradation, stones, gypsum.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la contaminación ambiental existente además de afectar la salud, ha incidido también en la degradación superficial de los materiales empleados en las edificaciones. Las estructuras antiguas construidas en piedra fueron enclavadas en zonas poco urbanizadas y con un mínimo o casi nulo desarrollo industrial. En nuestros días, estos edificios están ubicados en zonas altamente urbanizadas e industrializadas y el material pétreo con el cual fueron erigidas, se encuentra afectado por los contaminantes químicos emitidos por las industrias y el abundante tráfico vial.

Importantes edificaciones consolidadas entre el siglo XVI y XIX, pertenecientes al Centro Histórico de la Ciudad de La Habana, han sido construidos con piedra caliza coralina. Esta piedra ornamental utilizada en la mayoría de las estructuras antes mencionadas, se encuentra expuesta al medio ambiente y por tanto su única protección es ella misma. Es por ello que se hace necesario estudiar y preservar el medio ambiente que las rodea. El Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís (Figura 1), es un fiel exponente de la arquitectura del siglo XVII y está enclavado en la Habana Vieja¹. Este monumento está situado en una zona urbano-marino-industrial y en la superficie del material pétreo empleado

en su construcción, se evidencia la formación de costras y pátinas como consecuencia de la contaminación.



Figura 1. Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís

La contaminación y las edificaciones

El aumento de la acidez de la lluvia y el aire perjudica seriamente los materiales en edificios, monumentos y esculturas. Hay que tener en cuenta entonces, que si el material pétreo utilizado es muy poroso se facilitaría la entrada de contaminantes por medio de la lluvia a través del micro y el macroporos del material². La piedra carbonatada tiende a tener una alta porosidad y la porosidad total se acerca a 15-20 % (o incluso hasta 45 %) para la mayoría de las piedras calizas³.

La deposición seca de contaminantes, en especial el SO_2 , es uno de los principales procesos que ocurren en la superficie pétreo. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), es el producto de degradación que se obtiene como resultado final de la reacción de la calcita con el óxido de azufre atmosférico. Es un producto estable en un sistema acuoso medianamente ácido^{4, 5, 6}.

En cuanto al mecanismo que hace particularmente agresivo a los compuestos de nitrógeno, es la facilidad con que se oxidan e hidrolizan, acidificando el agua de lluvia y provocando los clásicos efectos de lluvia ácida. Las emisiones de las industrias cercanas a las edificaciones, afectan en mayor o menor medida en dependencia del comportamiento de los factores atmosféricos (precipitaciones, dirección del viento)⁷.

Conservación del material pétreo

El análisis de los mecanismos de degradación de la piedra ha llevado a la conclusión de que es necesario protegerla, particularmente de la acción del agua, la cual facilita la entrada de los contaminantes en el interior de la piedra, así como el crecimiento de organismos biológicos. Para ello, se han utilizado diferentes clases de recubrimientos y se pudieran dividir en hidrofugantes, pinturas y consolidantes de acuerdo con su principio de protección.

Todos estos productos deben cumplir con los siguientes requisitos: impermeabilidad al agua líquida, permeabilidad al vapor de agua, estabilidad química y fotoquímica, repelencia al aceite, buenas propiedades ópticas para preservar el color original, no afectar a la piedra ni al medio ambiente^{8, 9, 10}.

La degradación de la piedra es común en la mayoría de las edificaciones coloniales pero en ocasiones, se realizan las reparaciones sin tener en consideración el tipo de clima ni las condiciones ambientales particulares de la zona en la que se encuentra ubicada la edificación de interés. Esto ha conducido, en muchos casos, a la aplicación de tratamientos con agentes, que lejos de mejorar las condiciones de una obra, pueden no tener el efecto o la eficiencia esperados y en algunos casos la llevan a un estado de deterioro aún más grave. Para evitar estos nefastos efectos, debe de tenerse en cuenta, antes de realizar cualquier tratamiento superficial, la recopilación de información sobre las propiedades físicas y químicas del material pétreo para atacar adecuadamente el problema¹¹.

Algunos de los agentes empleados son las ceras y aceites naturales, los fluoatos y productos orgánicos sintéticos como polímeros acrílicos y de siloxano, siliconas, poliolefinas fluorinadas y resinas epóxicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Contaminantes atmosféricos

- *Determinación de NO₂.*

A través de captadores pasivos se efectuó la determinación de NO₂¹² en el interior de la Sala de Conciertos y del Coro, pertenecientes a la Basílica del Convento así como en el exterior de la edificación. Los captadores fueron situados a 2,5 m de altura para la recepción de concentraciones medias de NO₂. De esta manera, se valoran los niveles de contaminación existentes con respecto a este contaminante en el interior de la Basílica y se comparan con los datos obtenidos en el exterior de la estructura y de una entidad comercial situada a ± 1 Km. de distancia del monumento.

- *Determinación de compuestos de azufre.*

El contenido de compuestos de azufre fue determinado por el método gravimétrico descrito en la NC 12-01-08/1988¹³ y la clasificación del ambiente se realizó mediante la ISO 9223 standard¹⁴. Se utilizaron dos placas alcalinas y fueron colocadas perpendicular a la superficie saliente de una columna del Coro de la Basílica a 1, 5 m de altura del suelo. El tiempo de exposición fue mensual.

- *Difracción de Rayos-X*

Se utilizó esta técnica para caracterizar la superficie de piedra sin tratamiento con el objetivo de identificar los componentes cristalinos presentes en ella. La caracterización de fases se llevó a cabo en un Difractómetro policristalino HZG4 y se utilizó radiación K α de Cobre con filtro de Níquel. El barrido se realizó con un intervalo angular 2 θ de 10 - 70° y a un paso de 0,05° y un tiempo de conteo de 5 s.

- *Aplicación de producto para la protección de la piedra y ensayo capilar (Pipa de Karsten).*

Se aplicó el hidrofugante 700s de base siloxano en solvente orgánico (para intemperie) sobre la superficie de dos columnas de la edificación. Mediante la Pipa de Karsten fue evaluada su absorción capilar *in situ* y el resultado se comparó con el obtenido en la superficie sin tratar. Este método (Figura 2.6), especialmente indicado para valorar la eficacia de tratamientos de hidrofugación^[64] Consiste en determinar la absorción de agua utilizando una pipa de cristal graduada aditamento que se adhiere a la superficie de la piedra, se llena de agua y enrasa hasta 4 mL. Mediante un cronómetro se toma el tiempo de absorción de agua de la roca sin y con aplicación del producto hidrofugante. El tiempo máximo de evaluación es de 30 min. y el coeficiente de absorción fue hallado según la Norma ISO 15148.

- *Microscopía Electrónica de Barrido y EDX*

Las superficies de las muestras sin y con tratamiento fueron analizadas utilizando un microscopio electrónico de barrido TESCAM TS 5130 SB y un EDX INCA 350, trabajando a un potencial de 10 a 20 KV con el objetivo de poner en evidencia el efecto de estos tratamientos en los cambios morfológicos y en el recubrimiento con la capa protectora. Además, a través de la EDX pudo obtenerse la composición mineralógica y química de la roca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de concentración de NO₂ en la atmósfera interior y exterior de la edificación (Tabla 1) se encuentran por debajo del límite permisible (32 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) para la salud humana y ambiental¹². No obstante, es válido señalar que la presencia de este contaminante, favorece la reacción de los compuestos de azufre con la superficie pétreo¹⁵,¹⁶. El tipo de roca calcárea con la cual fue construida la edificación, es sensible a los compuestos ácidos. Por tanto, la calcita presente en ella, reacciona fácilmente con los contaminantes de carácter ácido presentes en el ambiente como los reportados en la tabla 1 (compuestos de azufre y NO₂).

Tabla 1. Valores de contaminantes atmosféricos reportados en el interior y exterior del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís.

Sitio	Condiciones de exposición	Compuestos de azufre (mg/m ² d)			Clasif. ISO 9223	Concentración de NO ₂ (µg/m ³)			Clasif. UNE 13528
		Ave.	Máx.	Mín.		Ave.	Máx.	Mín.	
Basílica	interior	10.50	12.50	6.51	P ₁	21.60	30.95	6.23	Aceptable
Coro	interior	11.60	14.65	7.6	P ₁	20.88	32.96	11.50	Aceptable
Convento	exterior	-	-	-	-	23.77	31.22	11.24	Aceptable

Los datos de NO₂ obtenidos tanto en el interior como exterior del Convento son menores que los reportados en el exterior de una entidad comercial. Valores de 30,83 µg/ m³ y 39,05 µg/ m³ han sido reportados en dicho local y los mismos se encuentran en el límite de concentración admisible¹⁷. Cabe señalar que la entidad comercial se encuentra ubicada en una zona de intenso tráfico, a 1 km del Convento, donde los gases emitidos por el transporte influyen de manera directa en los resultados obtenidos.

En cuanto a los compuesto de azufre, el SO₂ es uno de los contaminantes que influyen de manera directa en la degradación de la piedra caliza que combinado con la lluvia y otros contaminantes, acelera el proceso de deterioro del material. La formación de las sales de yeso (CaSO₄ · 2H₂O) es el resultado de la reacción de los compuestos de azufre depositados en la superficie pétreo con el carbonato de calcio de la roca. En ambientes interiores como los de la Basílica de la edificación, puede observarse la degradación de la piedra debido a la deposición de los compuestos de azufre así como la presencia de NO₂. Este fenómeno se evidencia por la presencia de polvo y muestras del material pétreo depositados sobre las sillas colocadas en la Basílica.

Identificación de sales de la costra oscura de la superficie pétreo.

Alteraciones superficiales como son las costras pueden encontrarse en varias zonas de la edificación (Figura 2). Principalmente pueden ser observadas en lugares donde la radiación solar no incide de forma directa y por largos periodos de tiempo, la dirección en la que está orientada la pared y el confinamiento a la que están sometidas por la construcción de otras edificaciones a su alrededor. Por otra parte, la humedad presente en alguna de las paredes facilita la deposición de contaminantes.



a)

b)

Figura 2. a) Costra formada en la entrada de la Torre de la edificación. b) Costra formada en la entrada de la Basílica de la edificación (calle de los Oficios).

En la tabla 2 se muestran las sales identificadas mediante un ensayo de difracción de Rayos X. Puede observarse que el yeso es la fase mayoritaria y en menos cantidad aparecen la calcita y el cuarzo así como trazas de aragonita, wedelita, wewelita y anhidrita.

Tabla 2. Resultados del análisis de difracción de rayos X de muestras de piedra y costra de la superficie pétreo de la edificación.

Muestras	Fases determinadas	
	Principal	Minoritaria
Piedra del Convento	Calcita (CaCO ₃)	Yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O) cuarzo (SiO ₂) silicato de magnesio (MgSiO ₃)
Costra de la fachada de la Basílica	Yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	Calcita (CaCO ₃) cuarzo (SiO ₂)
Costra del Campanario	Yeso (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	aragonita (CaCO ₃) wedelita (C ₂ CaO ₄ · 2H ₂ O) wewelita (C ₂ CaO ₄ · H ₂ O) anhidrita (CaSO ₄)

Este resultado confirma la presencia de compuestos de azufre en el ambiente. Por otra parte, vale señalar que en el momento en que fueron tomadas las muestras de costras de la fachada exterior de la Basílica, la misma no había sido sometida a un sistema de limpieza desde su restauración (1994-1999). En la actualidad la misma presenta una coloración más clara y los rasgos de la superficie pétreo se observan con mayor nitidez.

Absorción capilar

Para lograr una conservación adecuada de la superficie pétreo se aplicó, en secciones de columnas de la edificación, un hidrofugante de base siloxano en solvente orgánico. Mediante la Pipa de Karsten (Figura 3) se le realizó en varios períodos de tiempo, ensayos de absorción capilar.



Figura 3. Pipa de Karsten.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de absorción capilar *in situ*.

Superficies	Coeficiente de absorción (kg/m ² s ^{0.5})					
	Patio Norte			Plaza de San Francisco		
	4 meses	18 meses	3 años	4 meses	18 meses	3 años
Piedra sin tratamiento	0,162	0,0924	0,199	0,202	0,220	0,176
Piedra con hidrofugante	0,0046	0,0046	0,0529	0,0047	0,0046	0,0693

Los valores mostrados en la tabla 3 evidencian la efectividad del hidrofugante en cuanto a la capacidad de frenar o disminuir el paso del agua de lluvia a través de los micro y macroporos de la superficie pétreo. Entre el segundo y tercer año (2010) de aplicado el producto en las secciones de columnas, las mismas fueron sometidas a un sistema de limpieza en varias ocasiones. No obstante, el resultado demuestra la permanencia del producto en dichas superficies. De esta manera se puede establecer el tiempo óptimo de efectividad del producto y elaborar un cronograma de mantenimiento con dicho producto en la estructura.

Por otra parte, no existe una variación aparente de las características de la piedra y en las superficies en que fue aplicado el producto no se evidencian pérdidas de material (Tabla 4).

Tabla 4. Diagnóstico visual del hidrofugante ensayado.

Hidrofugante	Cambios cromáticos		Rugosidad		Organismos biológicos		Costras		Pátinas	
	si	no	si	no	si	no	si	no	si	no
siloxano		x		x		x		x		x

La microscopia electrónica de barrido nos permitió observar hasta que profundidad hay presencia del hidrofugante aplicado y su capacidad sellante. Mientras que por medio de la espectrometría de energía dispersiva de rayos X se realizó un mapeo de los elementos constituyentes.

En las micrografías de las muestras tratadas y sin tratar, figura 4, se evidencian cambios sustanciales en la morfología y en la topografía de su superficie. Es apreciable una mayor irregularidad en la superficie de la roca sin tratar en comparación con la roca tratada. También se observa la desaparición de los poros y microporos, distintivos de la roca sin tratar, aspecto que justifica la acción sellante mostrada por el producto en los ensayos de absorción capilar realizados.

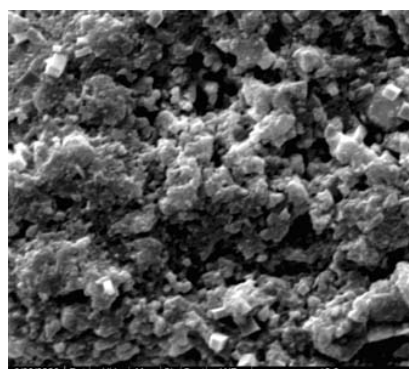
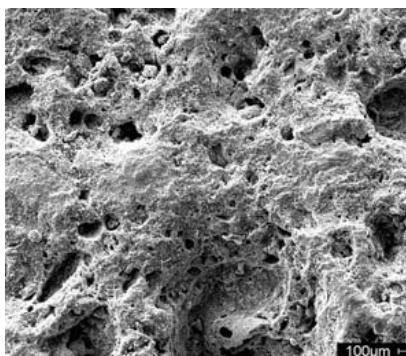


Figura 4. Micrografía de la piedra caliza coralina sin tratamiento y tratada con hidrofugante.

El mapeo del contenido de silicio (uno de los constituyentes del producto hidrofugante ensayado) en la sección transversal de las muestras de roca, permitió determinar que dicho elemento se distribuye uniformemente en toda la sección transversal. Mientras que el análisis EDX permite corroborar la presencia de sus componentes a una distancia de alrededor de 60 μ m de la superficie. (Figura 5)

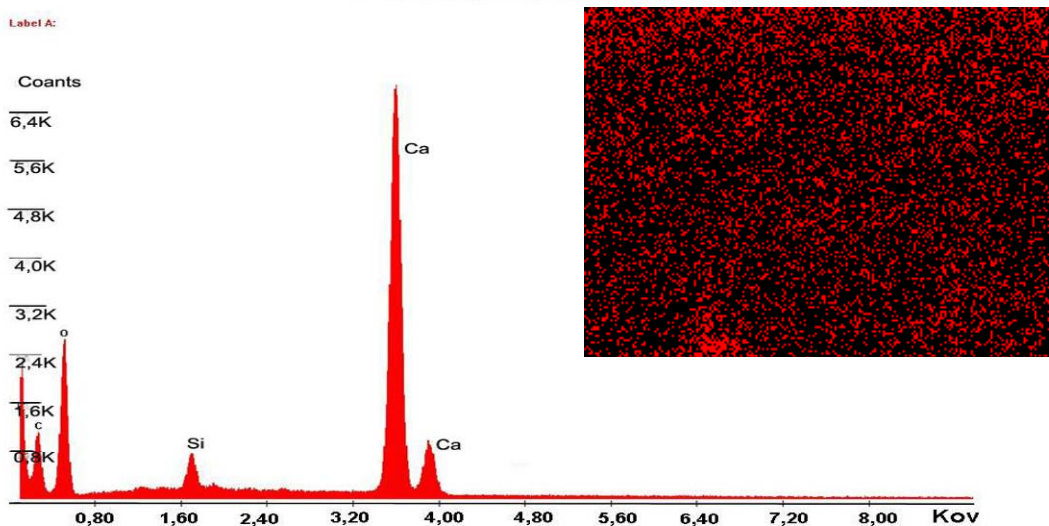


Figura 5. EDX y mapeo de la sección transversal de la roca tratada con hidrofugante.

CONCLUSIONES

La presencia de agentes contaminantes como los compuestos de azufre y NO_2 favorecen la formación de costras negras en la superficie pétreo de la edificación.

El yeso es el contaminante mayoritario de la costra presente en la superficie pétreo.

Se demostró la capacidad sellante del hidrofugante de base siloxano en solvente orgánico al disminuir el acceso de agua en la piedra de la edificación.

AGRADECIMIENTOS

Al personal y directiva del Convento y Basílica Menor de San Francisco de Asís.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Taboada, D.: *"El templo encantado"*. **Opus Habana**, Vol. III, No. 3-4, pp. 4-15, La Habana, 1999.
2. Leygraf, C. and Graedel, T.: Atmospheric corrosion. Electrochemical Society Series, Wiley Interscience, 2000.
3. Graedel, T. E.: Journal of The Electrochemical Society, Vol. 147, No. 3, pp. 1006-1009, 2000.
4. Gobbi, G., Zappia, G and Sabbioni, C.: "Sulphite quantification on damaged stones and mortars". **Atmospheric Environment**, Vol. 32, No. 4, pp. 783-789, 1998.
5. Pope, Gregory A., Meierding, Thomas C. and Paradise, Thomas R.: "Geomorphology's role in the study of weathering of cultural stone". **Geomorphology**, No. 47, pp. 211-225, 2002.
6. Sikiotis, D. and Kirkitsos, P.: "The adverse effects of nitrates on stone monuments". **The Science of the Total Environment**, No. 171, pp. 173-182, 1995.
7. Collazo, A.: Modelación de transformaciones químicas a escala local del NO_x a nitrato. Seminario Taller CONTAT 2007, Ciudad de La Habana, Cuba, junio de 2007.
8. Maravelaki-Kalaitzaki, P. et.al.: "Evaluation of silicon-based strengthening agents on porous limestones". **Progress in inorganic coatings**. No. 57, pp. 140-148, 2006.
9. Tsakalov, A., Manoudis, P., Karapanagiotis, I., Chrysoulakis, I. and Panayiotou, C. "Assessment of synthetic polymeric coatings for the protection and preservation of stone monuments". **Journal of Cultural Heritage**, Vol. 8, pp. 69-72, 2007.
10. Gorchakov, G. I.: Materiales de la construcción. Ed. MIR, Moscú, 1984.
11. Méndez Vivar, Juan.: "Importancia de la química en la conservación de monumentos de piedra caliza y mármol". **Educación Química**, Vol. 8, No. 4, pp. 225-230, 1997.
12. Norma UNE 13528 Parte 3. *Captadores difusivos para determinar concentración de gases y vapores.*

13. Norma NC 12-01-08/1988. *Determinación del contenido de dióxido de azufre.*
14. ISO 9223:1992- Corrosion of metals and alloys. Aggressivity of the atmosphere. Classification.
15. Tidblad, J. et.al.: Exposure Programme on Atmospheric Corrosion Effects of Acidifying Pollutants in Tropical and Subtropical Climates. **Water Air Soil Pollut**, No. 7, pp. 241-247, 2007.
16. Massey, S.W.: The effects of ozone and NOx on the deterioration of calcareous Stone. **The Science of the Total Environment**, No. 227, pp. 109-121, 1999.
17. Corvo, F. et.al. Influence of air pollution and humidity on limestone materials degradation in historical buildings located in cities under tropical coastal climates. *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. (2009).