



Cuerpo 3, 1997

Efectos de la contaminación en edificios del patrimonio histórico

♦ Jorge Uruchurtu

La contaminación es casi tan antigua como el hombre, y es el resultado de sus actividades económicas y sociales. Su consecuencia es el cambio en las propiedades del medio ambiente, en perjuicio de animales, plantas, materiales y, en última instancia, del hombre mismo. Los materiales sufren daños de muchas maneras, por ejemplo, la corrosión en los metales, deterioros en el hule y el vidrio, desmoronamiento y erosión en materiales de construcción y destrucción en obras de arte.

El problema es particularmente importante en cuanto al deterioro de materiales en edificios de interés histórico, en especial la piedra natural expuesta a la intemperie, afectada por los contaminantes presentes en la atmósfera.

Los efectos adversos de la contaminación atmosférica en este tipo de edificios pueden mitigarse manteniendo la piedra limpia, aunque la única solución permanente de este problema es eliminar la contaminación. El incremento del número de edificios que han sido limpiados y devueltos a su forma original mediante la restauración ya es un hecho. En algunos casos, los costos han sido cuantiosos, pero la apariencia de las ciudades ha mejorado para el goce de propios y extraños.

El impacto de la lluvia ácida en estructuras se divide en tres clases: en materiales naturales (como piedras calizas y areniscas); en materiales hechos por el hombre (como hierro y aluminio), y en monumentos históricos y sitios arqueológicos. Para nuestro propósito, el primer punto y el tercero son especialmente importantes.

El deterioro puede ocurrir por la disolución o fractura de la piedra. Las piedras calizas y areniscas contienen carbonatos que reaccionan con el ácido sulfúrico del agua de lluvia y las disuelven. Los metales son corroídos por sustancias “agresivas” presentes en la atmósfera y en el agua de lluvia. El lector puede consultar la literatura especializada para conocer los detalles de los mecanismos correspondientes.¹

¹ *Environmental Control & Public Health*, Air Pollution, Unit 15, Open University Press, Londres, 1975; *5th Report*, Royal Commission on Environmental Pollution, HMSO, Londres, 1976.

♦ Profesor-Investigador, Centro de Investigaciones en Ingenierías y Ciencias Aplicadas





Antecedentes históricos

Existen evidencias históricas de los efectos adversos de la contaminación atmosférica en materiales encontrados, por ejemplo, en Pompeya y Santorini. En la Gran Bretaña, donde se introdujo el carbón para uso doméstico en el año 852, se reporta que en el año 1228 las paredes del vecindario donde se encontraba la “Calle del Carbón Marino” estaban cubiertas con incrustaciones de hollín, y en la Edad Media, la deformación por contaminación en muchos edificios decorados fue causa de gran preocupación. Crónicas de la época nos hablan de los efectos sufridos por la piedra de la Catedral de San Pablo, “aproximándose a la ruina debido a la cualidad corrosiva de los humos producidos por la combustión del carbón, a los cuales ha sido expuesta”.²

En 1661, John Evelyn describió el ennegrecimiento de edificios debido a humos producidos por la combustión: “Es este horrible humo que oscurece nuestras iglesias y hace que nuestros palacios se vean viejos [...] nubes de humo y azufre, llenos de oscuridad y pestilencia sobre esta gloriosa y antigua ciudad [...] corroyendo barras de hierro y las más duras piedras con los malignos espíritus que acompañan al azufre”.³

En 1782, un visitante alemán describió los colegios de Oxford como “construidos con piedra gris,

que cuando nueva quizá lucía atractiva, pero que en la actualidad tiene una sucia y desagradable apariencia”.⁴

En la actualidad muchas antigüedades —pinturas, estatuas y edificios— han sido destruidas por la contaminación atmosférica. El obelisco de Cleopatra, con una antigüedad de 3,000 años y transportado de Alejandría a Londres en 1878, sufrió un mayor deterioro al ser expuesto a la atmósfera londinense que durante su estancia en Egipto.

Otras evidencias de los efectos nocivos de atmósferas contaminadas se encuentran en los mármoles del Partenón en Atenas y en edificios de Florencia y Venecia; en las cavernas prehistóricas de Altamira en España y de Lascaux en Francia; en las esculturas de Rodin expuestas a la atmósfera de Tokio; en la Catedral de México, y muchas más.

Efectos de la contaminación

La contaminación atmosférica no es un problema de reciente aparición. Desde siempre, la atmósfera ha contenido una cierta cantidad de contaminantes provenientes de fuentes naturales. Estas fuentes están constituidas principalmente por partículas de tierra en suspensión, sal arrojada por el mar, residuos de actividad volcánica, bacterias, semillas y esporas, etcétera. En las ciudades y zonas industriales, los seres humanos generamos una gran

² Timothy Nourse, *Campania Felix*, Londres, 1700.

³ John Evelyn, *Fumifugium of the Inconvenience of the Aer and Smoke of London Dissipated*, Londres, 1661.

⁴ Karl Philipp Moritz, *Travels in England in 1782*, Cassell, Londres, 1816.

cantidad y diversidad de contaminantes en forma de partículas y de gas, mediante la actividad industrial, el transporte y los servicios; sin embargo, esta contaminación puede reducirse a dos tipos de componentes: partículas y gases.

Aun en atmósferas “cristalinas”, los materiales pueden ser afectados por la humedad, la lluvia o las heladas. Los procesos por los que se deterioran y desmoronan las piedras son de origen físico, químico y aun biológico. Por ejemplo, la piedra o el concreto pueden quebrarse al absorber agua.

La contaminación atmosférica afecta a los materiales de cinco formas distintas: erosión, depósito y remoción, ataque químico directo, ataque químico indirecto y corrosión electroquímica. Existen además otros factores que influyen en el ataque de los contaminantes, como la humedad, la temperatura, la lluvia, la luz solar y el viento.

Ningún material resiste indefinidamente la acción de los agentes atmosféricos. Sin embargo, en la actualidad la contaminación atmosférica es el factor más importante del deterioro o envejecimiento prematuro de los materiales de las construcciones. Los contaminantes principales en el proceso de deterioro son los gases como el bióxido de carbono, los compuestos ácidos del azufre y los productos sólidos de la combustión como el hollín, que causan deterioro en las piedras, por lo cual también son de suma importancia.

Los efectos de la contaminación atmosférica relacionados con el envejecimiento de los materiales en las construcciones, dependen en gran medida

de su contenido en carbonatos. La piedra caliza y los mármoles consisten esencialmente de carbonato de calcio, el cual reacciona con el bióxido de azufre y forma sulfato de calcio; en la reacción de las calizas de magnesio con el bióxido de azufre se forma sulfato de calcio y sulfato de magnesio, los cuales son solubles en agua.

Sin embargo, el carbonato de calcio es poco soluble en agua pura, aunque su disolución es mucho mayor ante el bióxido de carbono diluido en agua. Y debido a que esta solución es inestable, el carbonato de calcio se redeposita al evaporarse el agua. En edificios de piedra caliza y mármol, el carbonato de calcio entra en contacto con el agua de lluvia, cuyo resultado es la remoción del material calcáreo y su depósito en otra parte de la superficie del edificio.

Las superficies de mármol y piedra caliza expuestas a la intemperie son erosionadas por la lluvia aun en atmósferas libres de contaminantes. En atmósferas contaminadas la erosión es más pronunciada en las superficies lavadas por la lluvia, lo cual es de gran importancia cuando se trata de esculturas y bajorrelieves. Sin embargo, la erosión continua impide que el hollín se adhiera a la superficie expuesta, lo que le permite mantenerse razonablemente limpia. Las superficies cubiertas o a la sombra acumulan hollín, el cual forma un recubrimiento disonante con las superficies limpias expuestas a la intemperie. Cualquier escurrimiento produce y forma zonas de limpieza que contrastan con el resto de la superficie oscura, además, de formar



depósitos debajo de cornisas y relieves. Estos depósitos de materia carbonácea y sulfato o carbonato de calcio, pueden alcanzar grandes proporciones.⁵

Las piedras areniscas y el granito no son solubles en agua y tienden a ennegrecerse sobre las superficies en atmósferas contaminadas por humos. Esto hace que las superficies expuestas a la intemperie y a las zonas cubiertas no muestren tanto contraste en su apariencia, como ocurre con las superficies de piedras calizas. Los depósitos acumulados se unen con materia silíceo presente en los materiales, lo cual da como resultado compuestos poco solubles y difíciles de remover.

Los efectos dañinos del bióxido de azufre en las piedras se manifiestan en forma de escamas o costras, o de desintegración general de la superficie. La reacción química entre el bióxido de azufre —o sulfato de amonio, presente en el aire y la lluvia— y los carbonatos presentes en la piedra da como resultado la formación de sulfato de calcio y sulfato de magnesio.

El bióxido de azufre incrementa la acidez del agua de lluvia y acentúa la erosión de las superficies expuestas a la intemperie. Además, induce la cristalización de los sulfatos formados y el envejecimiento prematuro y deterioro de los materiales.

La cristalización del sulfato de magnesio en los poros de la piedra causa desintegración debido a la acumulación de las sales. El sulfato de calcio, aunque menos soluble, produce efectos parecidos y al

depositarse en la superficie de la piedra forma una capa dura que se transforma en costras, las cuales, al desprenderse eventualmente de la superficie, la dejan suave y arenosa y permiten un continuo desmoronamiento.

Las calizas, los mármoles y las piedras areniscas calcáreas también están expuestas a los efectos del bióxido de azufre. Esto se debe a que su cohesión está subordinada a la pequeña cantidad de carbonatos que sirven de cemento para los granos de silicio. Aun los materiales inmunes al ataque directo del bióxido de azufre pueden dañarse si se utilizan en combinación con piedra caliza que absorba sulfatos o agua de lluvia que acarree cierta cantidad de sulfato de calcio, el cual se acumula en la superficie de la piedra y forma las desagradables costras superficiales. Incluso la resistente piedra de granito puede sufrir “descascamiento” de su superficie por la absorción de sulfatos.

Medidas de protección y conservación

Existen diversas medidas para proteger las estructuras, aunque la más sencilla sería el control de las fuentes contaminantes. La selección de materiales, el cuidado en el diseño y la reparación de las estructuras son medios con los cuales se puede reducir el deterioro de los materiales de las construcciones.

Para contrarrestar los efectos de la contaminación atmosférica son de utilidad la limpieza y el

⁵ R. J. Schaffer, “The Weathering of Natural Building Stones”, *Building Research, Special Report*, Londres, 1981.

lavado de la piedra, los métodos abrasivos, la limpieza mecánica, la limpieza por métodos químicos y los repelentes para recubrimientos.

La limpieza y el lavado de la piedra revelan su color y textura al descubrir los detalles de esculturas y relieves; además, ayudan a remover los sulfatos y otras sales que contribuyen a su deterioro. La limpieza se realiza con agua o vapor a presión, aunque a veces es necesario el uso de chorros de arena seca o húmeda para remover partículas adheridas fuertemente a la superficie.

Los métodos mecánicos son adecuados sólo para la limpieza de superficies lisas, ya que los grabados, las esculturas y los relieves pueden ser fácilmente maltratados. Estos métodos requieren el uso de lijas, cepillos metálicos y rotatorios, etcétera. La mayoría de los agentes químicos de limpieza contiene sales solubles o las forma al reaccionar con la piedra, por lo que su uso no es muy recomendable en el caso de edificios de interés histórico.

El uso de repelentes de agua y recubrimientos cuando la piedra está seca, protege mientras la humedad no penetra. Una vez que suceda esto, el agua se evapora y cristaliza cualquier sal en solución, lo que genera tensiones dentro del material y eventualmente lo quebranta.

Si es necesario reemplazar piedra deteriorada, entonces debe emplearse material del mismo tipo y color. En ciertas circunstancias, el uso de materiales plásticos es recomendable, aunque no en la restauración de edificios históricos. Generalmente,

el objetivo en estos casos es preservar el trabajo original, pero si tiene un valor artístico, entonces es preferible quitarlo del lugar y ponerlo bajo resguardo o sustituirlo con réplicas. Esto fue lo que se hizo recientemente con las Cariátides del Partenón de Atenas.

Daños físicos y su costo económico

El deterioro y la degradación por corrosión de los materiales de construcciones expuestas a atmósferas contaminadas, producen uno o más de los siguientes efectos sobre el edificio: la solidez estructural de los componentes puede verse afectada; la falla de un componente puede conducir a la falla de otro; la utilidad del edificio en general puede verse afectada, y la apariencia estética del edificio se deteriora.

Para poder calcular los costos que implica reparar materiales [minerales] contaminados, es importante considerar los efectos anteriores desde dos puntos de vista: los efectos (a) y (b) se relacionan con el daño físico experimentado; los efectos (c) y (d) se relacionan con los usos y beneficios proporcionados por el edificio.

Bajo ciertas circunstancias, cuando los daños físicos son evidentes, los costos son relativamente fáciles de calcular, pero en otros casos es necesario estimarlos, lo cual se realiza: cuando el deterioro físico no es un indicador suficiente de la causa del daño; cuando el deterioro físico se debe a diferentes causas y el costo en cada caso tiene que recibir un cierto peso o valor en términos económicos; y



cuando el deterioro físico no puede ser medido dada su naturaleza.

Todo lo anterior se ubica en el plano subjetivo, como la apariencia visual de los materiales y las reacciones experimentadas por los seres humanos, más que con el deterioro físico observado. Es un error muy común pensar que el cálculo de los costos está restringido a situaciones en las que el deterioro sufrido tiene un valor comercial. Cuando es así, su cálculo es relativamente fácil, pero sólo constituye parte del ejercicio de su estimación. También se da el caso de que haya que calcular costos cuando los daños no tengan ningún significado comercial, como ocurre con el costo social por la pérdida de amenidades naturales.

De esta forma, los costos totales pueden dividirse en económicos y sociales, y se toma en consideración a los primeros únicamente cuando los daños físicos puedan ser fácilmente identificables. Estos valores económicos se refieren a gastos realizados en la limpieza, mantenimiento y restauración de materiales dañados y respectivos costos.

En el caso de edificios históricos, catedrales y monumentos arqueológicos, existen problemas cuando trabajos artísticos en piedra, bajorrelieves y esculturas se desfiguran o desaparecen debido a la contaminación atmosférica u otra causa. Esto se debe a que, al estimar los costos, se puede incurrir en su subestimación, ya que estos trabajos son irremplazables. En el pasado, los gastos que implica la corrosión de edificios y estructuras expues-

tas a la intemperie —incluidos daños a monumentos antiguos y edificios de interés cultural e histórico— habían sido evaluados únicamente en términos de aquellos derivados del trabajo de mantenimiento. Es claro que las estimaciones obtenidas no eran totalmente correctas.

El deterioro físico de los materiales por la contaminación atmosférica se traduce en la reducción de su vida útil. El valor de su pérdida o deterioro se obtiene con la estimación de los costos extra por la limpieza y mantenimiento de la estructura y por el reemplazo del material antes de que concluya su vida útil. Estos costos son la primera parte de los gastos que implica la contaminación, que corresponden al aspecto económico; la segunda parte se relaciona con las pérdidas de amenidades y su costo social.

Daño a las amenidades y costo social

El término “amenidades” encierra un concepto muy amplio que incluye sitios naturales o hechos por el hombre, que sirven para su bienestar aunque no sean esenciales para su supervivencia. Las amenidades naturales incluyen parques, playas, ríos y canales, así como a las especies que los habitan.

Las amenidades hechas por el hombre incluyen monumentos históricos, edificios e iglesias de interés arquitectónico y cultural. Este tipo de amenidades debe distinguirse de las amenidades de servicio, como transporte público, cines, teatros, etcétera, que por alguna razón poseen un valor comercial o asociado.

El problema aquí se da al tratar de hacer cálculos de estos costos cuando la amenidad referida no tiene asociado ningún valor en el mercado. Existen dificultades prácticas para obtener datos de mercado, aun cuando algunos sitios de amenidades recreativas cobren alguna tarifa de admisión o de otro tipo.

Se han realizado grandes esfuerzos para tratar de estimar los costos con base en la demanda de algún tipo de amenidad, o asociando su valor con la disposición de los usuarios a pagar por su uso. El método más utilizado fue desarrollado por Clawson⁶ y básicamente requiere tres tipos de información, que supone dos restricciones.

Primero se requieren datos del número de visitantes del lugar por unidad de tiempo, la procedencia del visitante (clasificada por zona) y los gastos de viaje, que incluyen gastos de admisión si existieran. Sin embargo, estos costos comprenden la duración del viaje, lo que implica evaluar si dicho viaje fue placentero o no. Las restricciones que supone el método son que el acto de viajar no proporcione ningún placer y que los visitantes procedentes de zonas diferentes tengan las mismas características en todo, excepto en los gastos de viaje.

Por un lado, si se tiene algún placer por viajar, entonces la demanda recreativa del lugar se sobrestima. Por otro, si la gente que vive más cerca

del lugar lo aprecia más que la gente que vive en lugares distantes, entonces en este caso los cálculos podrían subestimar la demanda recreativa. Con lo anterior resulta posible calcular la demanda recreativa por la amenidad en cuestión, pero aún será necesario identificar cambios en la demanda a causa de los diferentes niveles de contaminación, pues es en estos términos que se calculan los costos de los daños.

Este método se puede utilizar para calcular los costos debidos a la pérdida o deterioro de amenidades como los monumentos o edificios de interés histórico y cultural, por la contaminación atmosférica. Es necesario estimar los beneficios obtenidos del lugar antes de su deterioro —lo cual resulta a veces complicado—, con el objetivo de obtener las pérdidas totales debidas a la contaminación. Surge un problema cuando se desean calcular los costos totales de varios sitios a la vez. La evaluación separada del daño en cada sitio, seguida por la suma total de los daños, probablemente dé un resultado incorrecto.

Existe otro problema cuando el sitio histórico es de interés mundial, como el Partenón de Atenas, por dar un ejemplo. En este caso la gente puede recibir beneficios y satisfacciones por la simple existencia del lugar aun sin visitarlo, y obtener satisfacción sólo al verlo o al saber que el sitio ha sido preservado. Estos beneficios son difíciles de

⁶ Marion Clawson, "Methods of Measuring the Demand for and Value of Outdoor Recreation", *Resource for the Future*, Reprint 10, Washington D.C., 1959.



identificar y evaluar, por lo cual el cálculo de los costos se complica.

Hay otro tipo de problemas, como el incremento en el número de visitantes potenciales debido al conocimiento del sitio por el público en general y su disposición a pagar por la autenticidad de esculturas y otros objetos de arte, la facilidad de acceso al sitio, etcétera. Además, la tasa de visitantes puede no ser un indicador apropiado de las preferencias del consumidor por cierto tipo de amenidades.⁷

Con todo lo anterior es posible estimar en términos económicos el daño físico debido a la contaminación, con base en las restricciones mencionadas. Esto se lograría mediante técnicas experimentales, análisis de costos y muestreos y cuestionarios para el caso de amenidades. Sitios como Chichén Itzá o Teotihuacán son especialmente apropiados para llevar a cabo un ejercicio de este tipo.

Limpieza y mantenimiento

La contaminación atmosférica tiene un efecto directo o indirecto en los materiales que reduce su vida activa, los daña y desfigura, ennegrece sus superficies y les da una apariencia desagradable. Esto es especialmente importante en los edificios de interés histórico y arquitectónico, ya que se degrada o destruye la herencia cultural y el sentido de continuidad de los pueblos y ciudades. Existen

diversos métodos para contrarrestar los efectos de la contaminación atmosférica, aunque el remedio más eficaz es el control de las fuentes contaminantes. Sin embargo, en la actualidad la limpieza y el mantenimiento de los materiales de construcción es el método más importante mientras persistan los efectos de la contaminación.

México, junto con muchos otros países, tiene una herencia cultural muy rica y variada que es necesario preservar. En estos tiempos en que la faz de pueblos y ciudades está cambiando dramáticamente, es necesario tener en cuenta que los edificios de interés cultural e histórico no pueden considerarse aisladamente. Grupos de casas y edificios antiguos dan carácter y atractivo a un lugar, por lo que su destrucción deja huecos difíciles de llenar. Muchos edificios valiosos se han perdido o deteriorado por demolición, contaminación y muchas otras causas.

Los cambios son inevitables, pero en lugares donde han desaparecido antiguos edificios, la gente experimenta una sensación de inseguridad y pérdida de continuidad de su lugar. Por ello es necesario mantener y preservar edificios de interés histórico, cultural o arquitectónico, de todo tipo y periodo histórico, darles un uso útil y, a la vez, brindar satisfacción a visitantes, residentes y paseantes.

⁷ Jonathan Ayles, *The Social Cost Benefit Analysis of Historic Building Restoration*, Artis & Nobay, Londres, 1978.