

Impacto de la contaminación atmosférica en las edificaciones patrimoniales de La Habana, Cuba. Efectos para un futuro climático

Impact of environmental pollution in the historical buildings of Havana, Cuba. Effect of future climate change

A. Hernández ^{1*}

* Departamento de Diagnóstico Levantamiento, Empresa Restaura, OHC, Habana Vieja, CUBA

Fecha de Recepción: 20/12/2017

Fecha de Aceptación: 25/05/2018

PAG 219-228

Abstract

In the last decades, the quality of the air on the Old City of La Habana has become a growing concern regarding the durability and the aesthetics of the historical buildings. The aim of this work is to assess the impact of atmospheric pollutants on the conservation of the historic buildings of La Habana, declared World Heritage Site by UNESCO in 1982. The city located between 20-2600 m from the north coast is constantly exposed to increasing levels of atmospheric pollutants mainly from anthropogenic sources. The future projections on climate for the Caribbean area reflect changes in temperature, humidity and rainfall levels, which will have implications for the preservation of the heritage buildings.

Keywords: Historical buildings, environmental pollution, corrosion, material recession

Resumen

La calidad del aire en la Habana Vieja ha venido siendo desde las últimas décadas una preocupación creciente en cuanto a durabilidad y estética de las edificaciones históricas. El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de la contaminación atmosférica en la preservación de las edificaciones históricas de La Habana, declarada Patrimonio de la Humanidad en 1982 por la UNESCO. La ciudad, ubicada entre 20-2600 m de la costa norte, está constantemente expuesta al incremento en los niveles de contaminación atmosférica, fundamentalmente de fuentes antropogénicas. Las proyecciones futuras del clima para el área del Caribe reflejan cambios en la temperatura, humedad y precipitaciones, los cuales tendrán implicaciones para la preservación del patrimonio construido.

Palabras clave: Edificaciones históricas, contaminación atmosférica, corrosión, degradación de los materiales

1. Introducción

Desde de la mitad del siglo pasado han ocurrido eventos climáticos que han resultado en un incremento de la temperatura global, cambios en las precipitaciones, en el nivel de mar, en las condiciones de los suelos y la ocurrencia frecuente de eventos climáticos extremos (IPCC, 2007; Kumar e Imam, 2013). Como consecuencia de los fenómenos mencionados, las edificaciones históricas han sufrido un deterioro en la estética y durabilidad de sus materiales.

La deposición de compuestos químicos y material particulado (PM) - por sus siglas en inglés - sobre la superficie de las edificaciones, se aprecia en términos de deterioro, amarillamiento y ennegrecimiento de los elementos estructurales y arquitectónicos (Belfiori et al., 2013; Bonazzaa et al., 2005; Brimblecombe y Grossi, 2010; Ghedini et al., 20016; Inkpen, 2004). Estos impactos han sido considerados como crónicos (Kucera, 1995; Screpanti y De Marco, 2009) y a menudo irreversibles, ejerciendo su acción durante largos periodos de tiempo.

Dentro de los contaminantes atmosféricos presentes en el aire, los que más influyen en el deterioro de los materiales de las edificaciones son: los compuestos de azufre (SO_x), el ozono troposférico (O_3), el dióxido de carbono (CO_2), los compuestos nitrogenados (NO_x), los iones cloruros (Cl^-) y los PM. El impacto negativo de estos elementos puede variar desde un entorno local a uno global (Kumar e Imam, 2013; Rao et al., 2014).

El rápido crecimiento industrial y urbano que influye en la calidad del aire de las regiones, es la causa fundamental del deterioro y envejecimiento acelerado encontrado en la mayoría de las edificaciones (Bonazzaa et al., 2005; Helene y Borges, 2009; Jacob y Winner, 2009; Kucera, 1995). Estas alteraciones han provocado daños en los elementos metálicos y plásticos debido al incremento de la velocidad de corrosión por exposición a medio ambientes agresivos, deterioro de las fachadas causado por el depósito de las partículas suspendidas en el aire (Brimblecombe y Grossi, 2010; Grossi y Brimblecombe, 2008; Grossi y Brimblecombe, 2016) entre otras causas.

El conocimiento sobre los contaminantes presentes en el aire, sus niveles de concentración, mecanismos de transporte y la velocidad de deposición es vital para un manejo medio ambiental eficiente enfocado en extender la vida útil de las edificaciones históricas y modernas así como de las infraestructuras.

¹ Autor de correspondencia:

Departamento de Diagnóstico Levantamiento, Empresa Restaura, OHC, Habana Vieja, CUBA
E-mail: alberto@diagnosticos.proyectos.ohc.cu



Prácticamente todos los elementos estructurales y arquitectónicos se convierten en barreras contra las corrientes de aire, actuando como reservorios de contaminantes atmosféricos (Ozga, 2009). En consecuencia, permiten la formación de costras negras (Di Turo et al., 2016) por acumulación de cristales de sulfatos de calcio y de otros compuestos químicos, que propiciados por los aerosoles, esporas y los PM, quedan atrapados en las estructuras minerales presentes en los poros de la piedra. Sobre estos elementos expuestos a las fuentes de emisiones y atmosferas agresivas, actúan los mecanismos de deposición húmeda y seca (Ozga, 2009). Aquellos elementos que poseen mayor capacidad de retención (capiteles, superficies bajo las cornisas y balcones, canes y muchos otros) muestran mayores daños porque no reciben el impacto directo del sol, el aire y la lluvia.

El Centro Histórico de La Habana, ubicado entre los 20 y 2.600 m de la costa norte, fue declarado por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad en 1982. Gradualmente las edificaciones históricas han comenzado a mostrar signos de deterioro, reflejado en el ennegrecimiento y amarilleamiento de las fachadas, grietas, corrosión y biodeterioro. El patrón de color observado en las fachadas de las edificaciones es más oscuro en los primeros niveles, y disminuye gradualmente a medida que se incrementa en altura. Las principales fuentes de contaminación atmosférica actual son de tipo industrial y antropogénico.

En La Habana se ha estado monitoreando y midiendo la calidad del aire desde la década de 1970 (Véliz y Machado, 1999). A partir de 1990, las estaciones de monitoreo han registrado emisiones de gases invernadero, especialmente compuestos de SO₂, NO_x y PM₁₀ (Reyes et al., 2011). En base a estos registros, se han desarrollado otros

estudios para promover políticas y programas medio ambientales pero enfocados principalmente hacia los sectores de la salud, agricultura y biodiversidad (Almoguea, 2008; CITMA, 2005; Peñalver y Lara, 1998; Véliz y Machado, 1999).

El Fondo Habitacional tiene más de 50 años y las edificaciones históricas tienen casi cinco siglos desde el inicio de las primeras fundaciones, sin embargo, aún no existe un mecanismo eficiente para estimar las pérdidas directas e indirectas relacionadas con los daños por corrosión y deterioro de los materiales. (Castañeda y Rodríguez, 2014). Se han realizado algunos estudios sobre la relación existente entre los parámetros climáticos y los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos en la Capital (Castañeda et al., 2012; F. Corbo et al., 2009; Oroza, 2016), sin embargo, aún falta conocimiento sobre los efectos de la contaminación del aire en la preservación de las edificaciones históricas de La Habana. Por consiguiente, la posibilidad de implementar estrategias preventivas para la durabilidad de las edificaciones patrimoniales y de nueva construcción, aún es limitada.

2. Materiales y métodos

2.1 Recopilación de datos

La recopilación de datos se realizó en las esculturas y fachadas de edificaciones afectadas por la formación de costras negras, amarilleamiento, suciedad, grietas y otros deterioros provocados por la contaminación. El estudio comenzó el año 2016 y terminó en agosto de 2017. La evaluación abarcó varias avenidas y calles de Centro Habana, incluida La Habana Vieja (Figura 1).



Figura 1. Mapa de la zona evaluada

2.2 Identificación del tipo de medio ambiente

Se realizó una correlación entre los contaminantes atmosféricos reportados para la Ciudad de La Habana y sus niveles de concentración en el aire durante la última década (Castañeda et al., 2012; Placeres et al., 2004; Varona et al., 2011). A partir de estos resultados, se estableció la

clasificación atmosférica y tiempo de humectación (TDH) (ISO, 2012). Para los parámetros climáticos (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) se emplearon los datos recopilados por el Instituto Nacional de Meteorología (INSMET) (Figura 2).

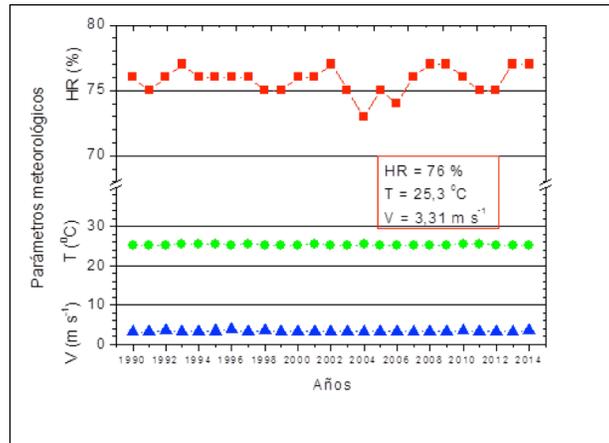


Figura 2. Datos climáticos reportados por el INSMET entre 1990 y 2014

2.3 Cálculo de la pérdida de metal por corrosión (r_{corr})

La estimación de la pérdida de masa por corrosión se realizó para el acero al carbono, cobre, cinc y aluminio para un año de exposición, de acuerdo a la norma ISO 9223:2012. Para velocidad de deposición de cloruro (Cl) y sulfuro (SO₂) (S_d y P_d respectivamente) y TDH, se emplearon

los datos publicados (Castañeda et al., 2012) fueron derivados para la distancia comprendida entre los 20 y 2.600 m desde la franja costera norte (Tabla 1).

Para los cálculos matemáticos, se empleó el software computacional Wolfram Mathematica versión 9.0. Los gráficos fueron construidos usando el software computacional Origin Pro versión 8.0.

Tabla 1. Variables medidas en La Habana

Variables	Valor
TDH (horas/año)	4966 - 3782
D_{Cl} (mg/md)	719,5 - 2,7
[SO ₂] (µg/m)	32,7

Las ecuaciones propuestas por la ISO 9223:2012 para estimar la pérdida de masa de los parámetros medio ambientales, para el primer año de exposición son:

Acero al carbono:

$$r_{corr} = 1.77P_d^{0.52} * \exp(0.020HR + f_{St}) + 0.102S_d^{0.62} * \exp(0.033HR + 0.040T)$$

$$f_{St} = -0.054(T - 10)$$

Cobre:

$$r_{corr} = 0.0053P_d^{0.26} * \exp(0.059HR + f_{Cu}) + 0.01025S_d^{0.27} * \exp(0.036HR + 0.049T)$$

$$f_{Cu} = -0.080(T - 10)$$

Cinc:

$$r_{corr} = 0.0129P_d^{0.44} * \exp(0.046HR + f_{Zn}) + 0.0175S_d^{0.57} * \exp(0.008HR + 0.085T)$$

$$f_{Zn} = -0.071(T - 10)$$

Aluminio:

$$r_{corr} = 0.0042P_d^{0.73} * \exp(0.025HR + f_{Al}) + 0.018S_d^{0.60} * \exp(0.020HR + 0.094T)$$

$$f_{Al} = -0.043(T - 10)$$



donde:

r_{corr} : velocidad de corrosión para el primer año de exposición atmosférica, $\mu\text{m/año}$.

T: temperatura del aire, $^{\circ}\text{C}$

HR: humedad relativa, %

P: tasa de depósito de SO_2 , $\text{mg/m}^2\text{día}$

S: tasa de depósito de Cl^- , $\text{mg/m}^2\text{día}$

2.4 Análisis para un escenario futuro de cambio climático

Las estimaciones de la pérdida de masa de los materiales para las proyecciones futuras se basaron en los datos climáticos desarrollados para la zona del Caribe (Jacob y Winner, 2009). En el modelo climático obtenido, se espera un incremento de la temperatura regional de 2°C para los próximos 80 años. Para este escenario futuro, se aplicó un modelo de la curva dosis-respuesta (Klinesmith et al., 2007) para los siguientes metales:

Acero al carbono:

$$R = 13.4t^{0.98} \left(\frac{TDH}{3800}\right)^{0.46} \left(1 + \frac{[SO_2]}{25}\right)^{0.62} \left(1 + \frac{[D_{Cl}]}{50}\right)^{0.34} e^{0.016(T+20)}$$

Cobre:

$$R = 0.46t^{0.15} \left(\frac{TDH}{3800}\right)^{0.02} \left(1 + \frac{[SO_2]}{25}\right)^{0.38} \left(1 + \frac{[D_{Cl}]}{50}\right)^{0.46} e^{0.02(T+20)}$$

Cinc:

$$R = 0.16t^{0.36} \left(\frac{TDH}{3800}\right)^{0.24} \left(1 + \frac{[SO_2]}{25}\right)^{0.82} \left(1 + \frac{[D_{Cl}]}{50}\right)^{0.44} e^{0.05(T+20)}$$

Aluminio:

$$R = 0.094t^{0.05} \left(\frac{TDH}{3800}\right)^{0.23} \left(1 + \frac{[SO_2]}{25}\right)^{1.14} \left(1 + \frac{[D_{Cl}]}{50}\right)^{0.42} e^{0.01(T+20)}$$

donde:

R: pérdida de masa por ataque corrosivo, $\mu\text{m/año}$.

$[SO_2]$: media anual de concentraciones gaseosas, $\mu\text{g/m}^3$.

$[D_{Cl}]$: deposición de cloruros, $\text{mg/m}^2\text{d}$.

TDH: tiempo de humectación, horas/año.

T: temperatura media anual, $^{\circ}\text{C}$

t: tiempo de exposición, años.

3. Resultados y discusión

La Figura 3 muestra el comportamiento de los contaminantes atmosféricos para las mediciones realizadas en La Habana entre 1998 y 2011. Los resultados señalan que las concentraciones de SO_2 y hollín en el aire han aumentado gradualmente. Por el contrario, la presencia de PM_{10} refleja una disminución entre los dos periodos. En el caso del NH_3 atmosférico, los niveles medidos exceden la categoría normal (ISO, 2012) con un valor de $54,10 \mu\text{g/m}^3$. En base a los resultados de las concentraciones de contaminantes atmosféricos medidos en la Capital, esta se clasifica en un ambiente Urbano/Industrial.

Los primeros informes sobre el impacto de los contaminantes y del clima costero en las edificaciones de Cuba se registraron en 1995 (F. Corvo et al., 1995). En la V

Cumbre del Medio Ambiente y Desarrollo, el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA, 2005) publicó valores de NO_2 de $3,3 \mu\text{g/m}^3$, NH_3 de $5,6 \mu\text{g/m}^3$ y SO_2 de $0,8 \mu\text{g/m}^3$ para la capital. También se emitieron declaraciones sobre los impactos de la lluvia ácida, cuyas mediciones realizadas por la estación meteorológica de Casa Blanca (INSMET) registraron un pH de 5,3.

Los estudios publicados por Varona et al. (2011) muestran un incremento en los niveles de contaminación, con valores máximos de $\text{NO}_2 = 120,3 \mu\text{g/m}^3$, $\text{NH}_3 = 54,1 \mu\text{g/m}^3$ y $\text{SO}_2 = 32,7 \mu\text{g/m}^3$. En esta investigación se reportaron como datos adicionales para la concentración de PM_{10} con un valor de $41,08 \mu\text{g/m}^3$ y de hollín con $30 \mu\text{g/m}^3$. Respecto del O_3 troposférico, las mediciones solo se realizaron para la rama de la agricultura (Almogua, 2008). Los resultados obtenidos muestran concentraciones de entre 40 y 120 ppb. Un estudio realizado en sitios y monumentos históricos en Italia (Screpanti y De Marco, 2009) obtuvo concentraciones similares, demostrando el efecto de este elemento en el deterioro de los materiales como el cobre y la piedra caliza. Para el Centro Histórico de La Habana no se han hecho estudios de los niveles de O_3 troposférico, por lo que se desconoce su impacto en las edificaciones históricas.

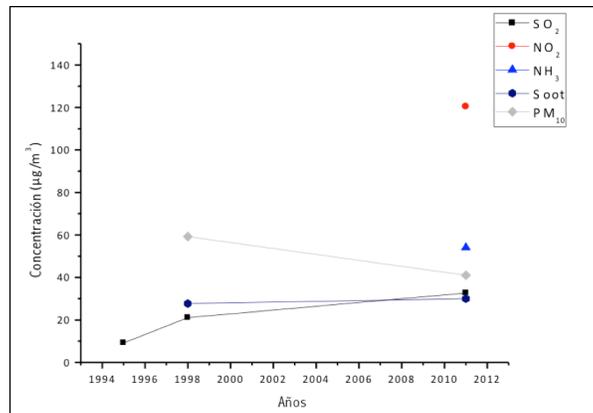


Figura 3. Progresión de los niveles de contaminación del aire en La Habana

Como resultado del incremento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en La Habana, casi todas las edificaciones y elementos esculturales muestran signos de ennegrecimiento, acidificación, pérdida de material, crecimiento de microorganismos y presencia de

plantas superiores (Figura 4 y figura 5). La Tabla 2 muestra los daños más comunes por contaminación atmosférica en las edificaciones históricas de La Habana.

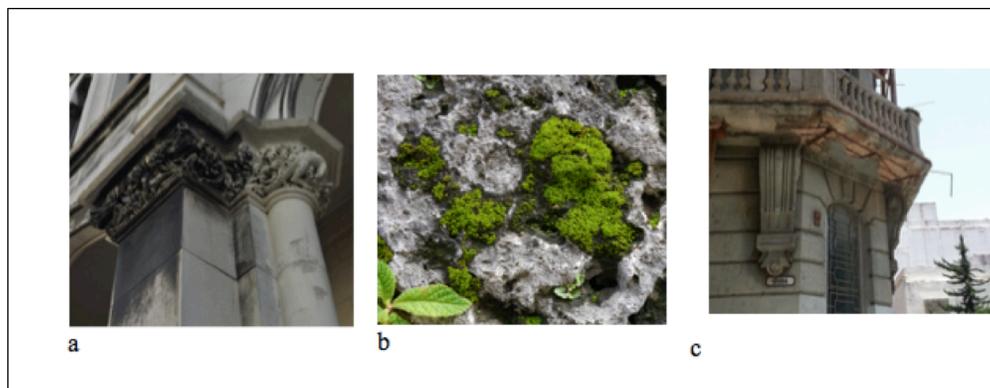


Figura 4. Edificios históricos en La Habana con signos de deterioro: a) Columnas de la Iglesia de Reina, en Avenida Reina. b) Crecimiento de algas y plantas superiores sobre los muros de la Catedral de La Habana. c) Balcones de un edificio del año 1950 en calle Cuba, extremadamente afectados por la carbonatación y corrosión de los aceros de refuerzo



Figura 5. Esculturas ubicadas en La Habana Vieja afectadas por costras negras y polvo causado por la contaminación atmosférica. a) Atlantes, Embajada de España. b) Atlantes, Palacio Cueto. c) Estatua de San Carlos, Catedral de La Habana.

Tabla 2. Daños comunes presentes en las edificaciones históricas de La Habana

Edificio	Tipo de daño	Fecha de Construcción	Sustrato	Trabajos de restauración anteriores
Iglesia de Reina	Costras negras	1923	Hormigón armado	Sin información disponible
Iglesia del Carmen	Costras negras	1825	Hormigón armado	Sin información disponible
Catedral de La Habana	Pérdida de material, polvo, crecimiento de algas y plantas de mayor tamaño	1773	Piedra caliza	2015
Convento San Francisco de Asís (fachada principal)	Pérdida de material, extremadamente ennegrecida	1580	Piedra caliza	Sin información disponible
Museo de las Ciencias Finlay (fachada)	Costras amarillas, polvo	1925	Piedra caliza	Sin información disponible
Palacio de los Capitanes Generales	Costras amarillas, polvo	1792	Piedra caliza	La limpieza de la fachada principal está en curso
Iglesia de Paula	Depósito de hollín, pérdida de material	1730	Piedra caliza	Sin información disponible
Capitolio	Costras amarillas, polvo, corrosión, acidificación	1929	Hormigón armado	En curso
Lonja del Comercio	Costras negras, polvo	1939	Hormigón armado	Sin información disponible
Palacio de Dionisio Velasco	Costras negras, polvo	Principios Siglo XX	Hormigón armado	2016

Los niveles de humedad relativa (HR) promedio anual y la frecuencia de precipitaciones propician la deposición húmeda de los contaminantes atmosféricos sobre la superficie de las edificaciones. La velocidad del viento transporta las partículas varios kilómetros, extendiendo la agresividad atmosférica hacia zonas con menores niveles de emisiones. La humectación de los materiales cálcicos con una HR superior al 65% permite la activación de los mecanismos de transporte de los contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) y compuestos sulfurosos, incrementando la porosidad y acidificando el sustrato base (Castañeda, 2013; Howland, 2012). Las edificaciones cercanas próximas a las avenidas con alto elevado tráfico vehicular son las que se encuentran más afectadas por la formación de costras negras y la acumulación de polvo. En un estudio realizado en el Convento de San Francisco de Asís (Reyes et al., 2011) ubicada próxima a la del Avenida Puerto, el promedio de deposición de compuestos de azufre fue superior a 12 mg.m⁻²d y los depósitos de compuestos de nitrógeno fue superior a 16 mg.m⁻²d⁻¹. El impacto de estos compuestos sobre las edificaciones de hormigón armado produce disminución de

alcalinidad en la pasta de cemento, lo que implica la pérdida de pasividad del refuerzo de acero, iniciando así el fenómeno de la corrosión.

Los tipos de deterioro discutidos con anterioridad son ampliamente visibles en casi todas las edificaciones existentes en la zona antigua de la capital, con un marcado impacto en los edificios y esculturas patrimoniales. Los mayores daños estructurales y estéticos se encuentran en las zonas más densamente pobladas, en avenidas con alto flujo vehicular y en edificios ubicados en la primera línea de costa de La Habana. Particularmente, en la franja costera norte, en alrededor de los 20 m distancia con respecto a la costa, la durabilidad de los materiales es extremadamente baja, debido al efecto del aerosol marino y de las emisiones provenientes de las fuentes móviles que transitan por la Avenida del Malecón, por lo que los materiales se deterioran a una tasa muy elevada.

La Tabla 3 indica las categorías de exposición para los niveles de contaminantes atmosféricos registrados en La Habana. A modo de referencia, se emuestran las categorías de agresividad corrosiva atmosférica de acuerdo a lo indicado por la ISO 9223:2012.

Tabla 3. Relación entre contaminantes y categorías para La Habana

Referencias	Concentraciones máximas de contaminantes atmosféricos (µg/m)				
	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	NH ₃	Hollín
(Placeres et al., 2004)	21,5	-	59,2	-	-
(Varona et al., 2011)	32,7	120,3	41,09	54,10	21,86
Intervalos ISO 9223:2012	5-100	20-150	30-70	<20	-
Categoría	Urbano	Urbano	Urbano/Industrial	Normal	-

*: (-) valores no reportados

Los resultados de r_{corr} obtenidos mediante la aplicación de los modelos (ISO, 2012) para el primer año de exposición señalan un incremento en la categoría de agresividad corrosiva de acuerdo con lo que informa Castañeda et al. (2012) para distancias entre los 20 y 4.500 m desde la línea de la costa norte en La Habana (Tabla 4). Para

el caso del acero al carbono y el cinc, el nivel de corrosión obtenido es de CX (extremo) para la distancia de 20 m y para el cobre se mantiene en nivel C5 (muy alto). La Figura 6 muestra la pérdida de masa de los metales con respecto a la distancia de la costa norte. Las categorías de agresividad corrosiva atmosférica se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Corrosividad atmosférica en La Habana para los metales estudiados

Material	Acero al carbono						
Dist. del mar (m)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
r_{corr} (µm/año)	269,2	42,2	28,2	42,3	25,6	23,7	23,9
Intervalo ISO 9223:2012(µm/año)	200-700	25-50				1,3-25	
Categoría	CX	C3	C3	C3	C3	C2	C2
Material	Cobre						
Dist. del mar (m)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
r_{corr} (µm/año)	4,3	1,8	1,4	1,7	1,3	1,2	1,2
Intervalo ISO 9223:2012(µm/año)	2,8-5,6	1,3-2,8				0,6-1,3	
Categoría	C5	C4	C4	C4	C4	C3	C3
Material	Cinc						
Dist. del mar (m)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
r_{corr} (µm/año)	12,9	2,1	1,3	2,0	1,2	1,1	1,1
Intervalo ISO 9223:2012(µm/año)	8,4-25	2,1-4,2	0,7-2,1				
Categoría	CX	C4	C3	C3	C3	C3	C3
Material	Aluminio						
Dist. del mar (m)	20	360	615	1500	1600	2678	4500
r_{corr} (µm/año)	5,21	0,66	0,37	0,64	0,32	0,29	0,28
Intervalo ISO 9223:2012(µm/año)	-	-	-	-	-	-	-
Categoría	-	-	-	-	-	-	-



Para el espacio correspondiente al Centro Histórico de La Habana, el comportamiento de degradación de los materiales metálicos es el siguiente:

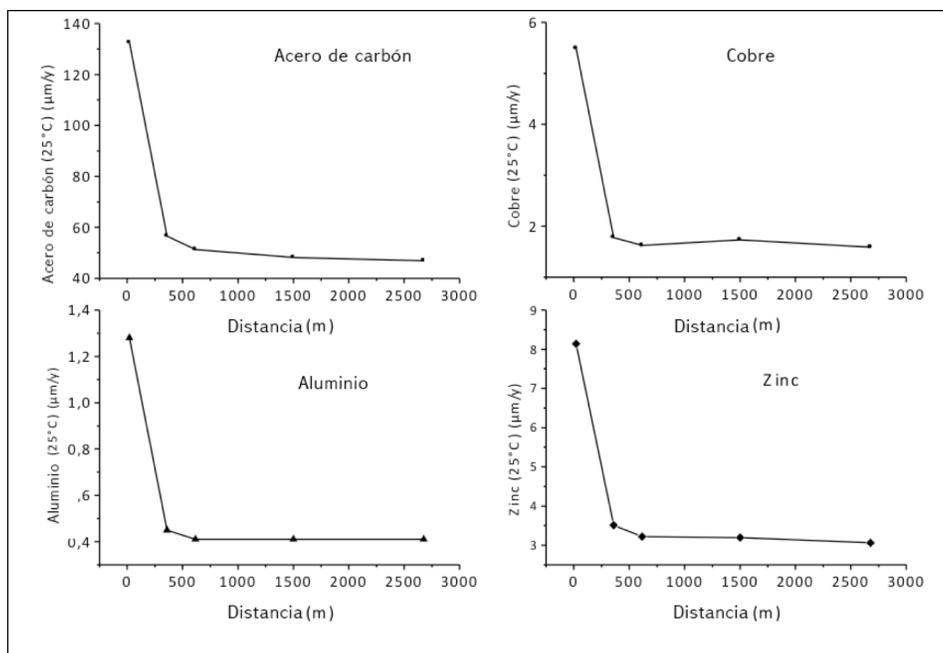


Figura 6. Pérdida de masa de los metales para la zona del Centro Histórico de La Habana

3.1 Posibles efectos para un escenario de cambio climático

Desde el siglo pasado, las emisiones en La Habana se han incrementado gradualmente. El impacto negativo de los contaminantes atmosféricos sobre las edificaciones patrimoniales es innegable y requiere la implementación de acciones, políticas y estrategias de mitigación basadas en la durabilidad. La ocurrencia de eventos climáticos extremos y el efecto que producen en la ciudad es cada año más devastador, incrementando el impacto en la velocidad de deterioro de las edificaciones patrimoniales, en especial, en aquellas próximas a la costa norte.

Los modelos climáticos para el siglo XXI (Jacob y Winner, 2009) indican cambios en el clima global. Para las condiciones futuras de Cuba, la simulación muestra un incremento de 1 a 2°C, mientras que las precipitaciones tenderán a disminuir en un 10%. De acuerdo a esta predicción, el clima en la región de América Central tenderá hacia un medio ambiente más seco y más cálido.

El aumento de la temperatura regional provocará el calentamiento del océano y del aire, lo que incrementará la posible formación de huracanes. En La Habana, si se

mantiene los niveles actuales de emisiones combinado con el escenario predictivo, las variaciones del clima aumentarán el secado de la vegetación urbana, el contenido de polvo suspendido en el aire, el contenido de partículas carbónicas, la velocidad de degradación de los materiales (Figura 7) entre otras consecuencias.

De acuerdo con Grossi y Brimblecombe (2007), el aumento de la radiación solar puede acelerar el deterioro de los materiales orgánicos, tales como los empleados para los tratamientos de conservación de la piedra o los recubrimientos de pintura. Los cambios en la temperatura también pueden afectar los ciclos de humectación y secado y, por lo tanto, la deposición de los gases ácidos. Las edificaciones patrimoniales y los metales como el acero al carbono, cobre y zinc serán los más afectados. En consecuencia, la velocidad de disolución de los materiales, especialmente los calcáreos, aumentará. A medida que la frecuencia de precipitaciones decline, se incrementarán las deposiciones de contaminantes y polvo sobre las fachadas de las edificaciones.

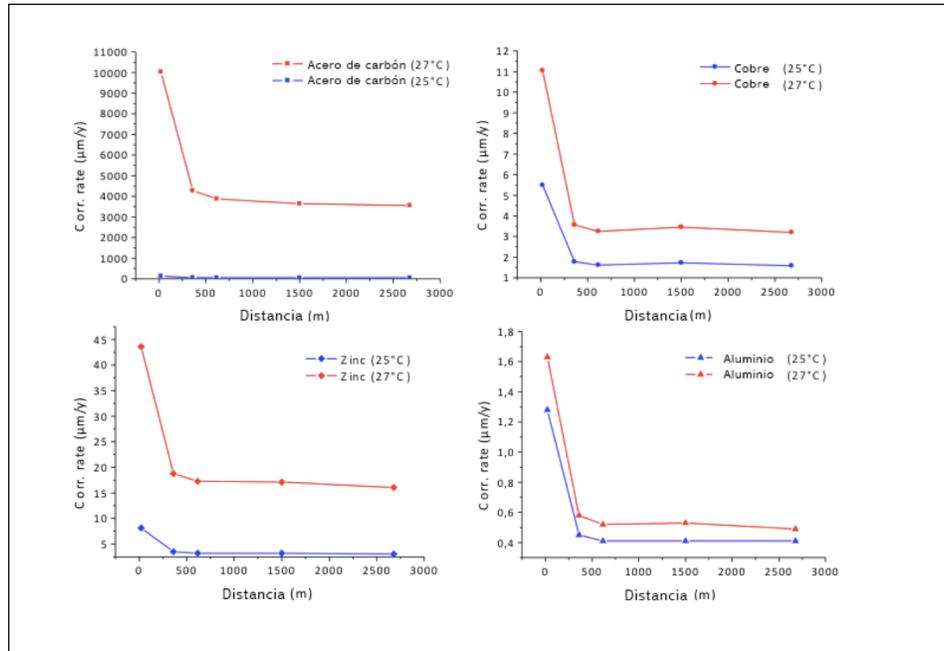


Figura 7. Comportamiento de la degradación de los metales a 25°C y a 27°C en un posible evento de cambio climático

Las variaciones en el clima regional favorecerán el aumento de los niveles de concentración de O₃. La entrada de las estaciones del año, el tiempo de permanencia y los niveles de los compuestos de NO_x tendrán una influencia significativa. Por lo tanto, la estética y las condiciones estructurales de las edificaciones también se verá afectada por los niveles de concentración del O₃ troposférico.

4. Conclusiones

El estudio demuestra el efecto de la contaminación atmosférica en el deterioro de los monumentos y edificaciones patrimoniales de La Habana. La formación de costras negras, corrosión y la deposición de polvo son los daños más frecuentes encontrados en las fachadas de los edificios. En especial en aquellos ubicados cerca de las zonas

urbanas con elevado tráfico vehicular. Los resultados obtenidos con los modelos matemáticos aplicados demuestran la corrosividad atmosférica extrema para los primeros 20 m de la franja costera norte. Las concentraciones de los contaminantes presentes en el aire de la Capital se encuentran en la categoría de Urbano/Industrial de acuerdo a la norma ISO 9223:2012.

El Centro Histórico de La Habana, ubicado muy cerca de la costa norte, presenta una elevada vulnerabilidad. Las edificaciones muestran un acelerado deterioro estético y estructural debido a los elevados niveles de contaminantes atmosféricos presentes en la ciudad, provenientes mayormente de fuentes antropogénicas.

Es imperativo aplicar acciones y estrategias de mitigación enfocadas en la durabilidad a fin de adaptarse a los futuros procesos de cambio climático.

5. Referencias

Almogua J. R. (2008), Current situation of the monitoring of tropospheric ozone in Cuba as part of the Caribbean and the fourth meteorological region (pp. 23). CITMA: INSMET.

Belfiore C. M.; Barca D.; Bonazza, A.; Comite V.; Russa M. F. L.; Pezzino A.; Ruffolo C.; Sabbioni C. (2013), Application of spectrometric analysis to the identification of pollution sources causing cultural heritage damage. *Environmental Science and Pollution Research*, 20: 8848–8859. doi:http://dx.doi.org/10.1007/s11356-013-1810-y.

Bonazza, A.; Sabbioni, C.; Ghedini, N. (2005), Quantitative data on carbon fractions in interpretation of black crusts and soiling on European built heritage. *Atmospheric Environment*, 39: 2607-2618. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.01.040.

Brimblecombe P.; Grossi C. M. (2010), Potential damage to modern building materials from 21st century air pollution. *The Scientific World Journal*, 10: 116-125. doi:http://dx.doi.org/10.1100/tsw.2010.17.



- Castañeda A. (2013)**, Estudio de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en La Habana. (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría".
- Castañeda A.; Albear J. H.; Corvo F. (2012)**, Corrosion of steel reinforced concrete in the tropical coastal atmosphere of Havana city, Cuba. *Quimica Nova*, XY(00): 1-10.
- Castañeda A.; Rodríguez M. R. (2014)**, Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 45: 52-59.
- CITMA (2005)**, Environmental Situation of Cuba (pp. 70). V International Summit of Environment and Development.
- Corvo F.; Betancourt N.; Mendoza A. (1995)**, The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel. *Corrosion Science*, 37(12): 1889-1901.
- Corvo F.; Pérez T.; Reyes J.; Dzib L.; González-Sánchez J.; Castañeda A. (2009)**, Atmospheric corrosion in tropical humid climates. *Transworld Research Network*: 1-34.
- Di Turo F.; Proietti C.; Screpanti A.; Fornasier M. Francesca; Cionni I.; Favero G.; Marco A. D. (2016)**, Impacts of air pollution on cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios. *Environmental Pollution*: 1-9. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.042>.
- Ghedini N.; Sabbioni C.; Bonazza A.; Carlogobbi G. (2006)**, Chemical-Thermal quantitative methodology for carbon speciation in damage layers on building surfaces. *Environmental Science and Technology*, 40(3): 939-944. doi:<http://dx.doi.org/10.1021/es050164l>.
- Grossi C. M.; Brimblecombe P. (2007)**, Effect of long-term changes in air pollution and climate on the decay and blackening of European stone buildings. *Geological Society, London, Special Publications*, 271(1): 117-130.
- Grossi C. M.; Brimblecombe P. (2008)**, Past and future colouring patterns of historic stone buildings. *Materiales de Construcción*, 58(289-290): 143-160.
- Grossi C. M.; Brimblecombe P. (2016)**, Effect of long-term changes in air pollution and climate on the decay and blackening of European stone buildings. *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*, 117-130.
- Helene P.; Castro-Borges P. C. (2009)**, A novel method to predict concrete carbonation. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 1(1): 25-35.
- Howland J. J. (2012)**, Performance by durability of reinforced concrete structures. Department of Civil Engineering Politechnic Institute of Havana.
- Inkpen R. (2004)**, Atmospheric pollution, climate change and historic buildings. Retrieved 7 julio 2015, 2015, from <http://www.buildingconservation.com/articles/atmospheric/atmospheric.htm>
- IPCC (2007)**, Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo. Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (Directores de la publicación). IPCC: Ginebra, Suiza. 104p.
- ISO (2012)**, ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation. International Standard Organization (ISO)
- Jacob D.; Winner D. A. (2009)**, Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43: 51-63. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>.
- Klinesmith D. E.; McCuen R. H.; Albrecht P. (2007)**, Effect of environmental conditions on corrosion rates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19: 9.
- Kucera V.; Fitz S. (1995)**, Direct and indirect air pollution effects on materials including cultural monuments. *Water, Air & Soil Pollution*, 85: 12.
- Kumar P.; Imam B. (2013)**, Footprints of air pollution and changing environment on the sustainability of built infrastructure. *Science of The Total Environment*, 444: 85-101. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.056>.
- Oroza A. H. (2016)**, Influence of atmospheric pollution on the decay of historic buildings in Old Havana City. (Thesis for the degree of Master in Environmental Management). Superior Institute of Applied Technologies and Sciences: University of Havana.
- Ozga I. J. (2009)**, Multi-pollutants impact on modern cement built heritage. (Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias de la Conservación). Universidad de Bologna.
- Peñalver M. T.; Lara L. A. (1998)**, Contaminación del aire en Ciudad de La Habana: uso de muestreadores pasivos. *Revista Cubana Higiene y Epidemiología*, 36(2): 152-158.
- Placeres M. R.; Bermejo P. M.; Lacasaña-Navarro M.; Rojo-Solís M. M. T.; Aguilar-Valdés J.; Romieu, I. (2004)**, Contaminación atmosférica, asma bronquial e infecciones respiratorias agudas en menores de edad, de La Habana. *Salud Pública de México*, 46(3): 222-233.
- Rao N. V.; Rajasekhar M.; Rao G. C. (2014)**, Detrimental effect of Air pollution, Corrosion on Building Materials and Historical Structures. *American Journal of Engineering Research*, 3(3): 359-364.
- Reyes J.; Corvo F.; Espinoza-Morales Y. ; Dzib B.; Perez T.; Valdes C.; Aguilar D.; Quintana P. (2011)**, Influence of Air Pollution on Degradation of Historic Buildings at the Urban Tropical Atmosphere of San Francisco de Campeche City, México P. A. G. Chmielewski (Ed.) *Monitoring, Control and Effects of Air Pollution* (pp. 201-226). Retrieved from <https://www.intechopen.com/books/monitoring-control-and-effects-of-air-pollution/influence-of-air-pollution-on-degradation-of-historic-buildings-at-the-urban-tropical-atmosphere-of>
- Screpanti A.; De Marco A. (2009)**, Corrosion on cultural heritage buildings in Italy. A role for ozone? *Environmental Pollution*, 157: 1513-1520. doi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19026474>
- Varona M.; Maldonado G.; Esquivel M.; Fernández A. (2011)**, Daily changes of air pollutant levels in Havana (CUBA). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 11: 786-792.

