



Revista de la Asociación Latinoamericana  
de Control de Calidad, Patología y  
Recuperación de la Construcción

E-ISSN: 2007-6835

revistaalconpat@gmail.com

Asociación Latinoamericana de Control  
de Calidad, Patología y Recuperación de

Reyes, J.; Silva, I.; Pérez, T.; Corvo, F.; Martínez, W.; Alonso, E. M.; Quintana, P.

El deterioro del Baluarte de San Pedro, un estudio de caso.

Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y  
Recuperación de la Construcción, vol. 2, núm. 3, septiembre-diciembre, 2012, pp. 170-  
184

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la  
Construcción, A. C.  
Mérida, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427639589004>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



# Revista ALCONPAT

[http://www.mda.cinvestav.mx/revista\\_alconpat](http://www.mda.cinvestav.mx/revista_alconpat)



Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

## El deterioro del Baluarte de San Pedro, un estudio de caso.

J. Reyes<sup>1</sup>, I. Silva<sup>1</sup>, T. Pérez<sup>1</sup>, F. Corvo<sup>1</sup>, W. Martínez<sup>2</sup>, E. M. Alonso<sup>2</sup> y P. Quintana<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Corrosión, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, Campeche, México, 24039. Email: tezperez@yahoo.com

<sup>2</sup>Departamento de Materiales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58070

<sup>3</sup>Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-Unidad Mérida.

### Información del artículo

Artículo recibido el 18 de Julio de 2012, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 31 de Julio de 2012. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el segundo número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2013

## RESUMEN

El centro histórico de la ciudad de San Francisco de Campeche, México, cuenta con edificios civiles y militares de la época colonial, los cuales se encuentran sometidos a la acción de agentes ambientales como humedad, radiación solar, temperatura, erosión eólica, acción biológica y productos de origen antropogénico que inducen su deterioro. El objetivo del presente estudio fue diagnosticar el daño y posible origen de costras negras en el Baluarte de San Pedro, edificio representativo del sistema defensivo de la ciudad. Las patologías de deterioro y el análisis mediante difracción de Rayos X realizado en muestras representativas del edificio indican la presencia de yeso en los muros sur y suroeste del Baluarte. Lo anterior es indicio de la acción de emisiones de vehículos automotores que circulan diariamente sobre las avenidas circundantes. Por otra parte, existe abundante colonización microbiana cuya actividad se relaciona con la presencia de oxalatos de calcio, compuestos característicos de procesos de biodeterioro.

© 2012 ALCONPAT Internacional

### Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 2, No. 3, Septiembre - Diciembre 2012, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista](http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista).

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, ISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de última modificación: 30 de Diciembre de 2012.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos y imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

**Palabras Clave:** Deterioro, edificios históricos, San Francisco de Campeche, Baluarte de San Pedro, biodeterioro.

## ABSTRACT

The downtown of San Francisco de Campeche, México, has several civilian and military ancient buildings dating from the Hispanic colonization. These buildings are exposed to environmental agents such as high relative humidity and temperature, sun radiation, wind erosion, biologic action and anthropogenic products, which produce their deterioration. The objective of this paper is to present and discuss the diagnosis of deterioration of the San Pedro bastion as well as the possible origin of black crusts observed over the walls. Visual inspection and X Ray Diffraction analysis detected gypsum at south and southwest walls, which is indicative of the action of combustion products of vehicles circulation over neighboring avenues. Moreover, it was observed abundant microbial colonization, which activity is related to the presence of calcium oxalates that are evidence of a bio-deterioration process.

**Keywords:** Deterioration, historic buildings, San Francisco de Campeche, Bastion of San Pedro, biodeterioration.

Autor de contacto: T. Pérez

El deterioro del Baluarte de San Pedro, un estudio de caso

## 1. INTRODUCCIÓN

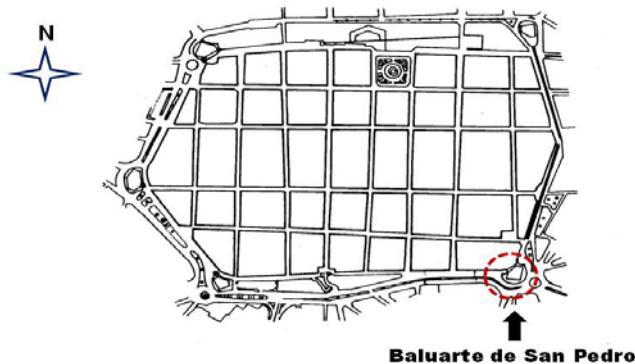
La ciudad de San Francisco de Campeche es en la actualidad, una de las ciudades de mayor dinamismo del Sureste Mexicano. En ella convive un pasado de esplendor representado por más de 1500 edificaciones civiles, militares y religiosas construidas durante el Periodo Colonial con un entorno urbano moderno en constante crecimiento.

### 1.1 Aspectos históricos

Durante el siglo XVII la ciudad de San Francisco de Campeche, México fue el único punto de movimiento mercantil de la península de Yucatán para la exportación de materias primas como maderas preciosas, palo de tinte y otros productos con destino al viejo continente. Lo anterior provocó que la ciudad fuera considerada blanco legítimo por piratas ingleses, franceses y holandeses que asolaban la región, lo que hizo necesario la construcción de un sistema defensivo constituido por fuertes, baterías, y un lienzo amurallado realizado con mampostería de piedra caliza y mortero de cal, que conectados por baluartes buscaba la protección de las casas señoriales y sus habitantes de ataques exteriores. El baluarte se ubica en la esquina suroeste del antiguo recinto amurallado de la ciudad (Figura 1a y 1b). Finalizado en 1702, fue la sexta fortificación levantada durante la construcción del complejo amurallado de la ciudad.



a



b

Figura 1. a) Baluarte de San Pedro, en la actualidad (Fotografía J. Reyes). b) Ubicación del baluarte de San Pedro en el Centro Histórico de San Francisco de Campeche (Imagen, Luis Mendoza).

Posee una planta de tipo pentagonal con cuatro de sus muros dando al exterior, y uno al interior (muro oeste), donde se encuentra la puerta de acceso. Sobre dicho acceso se muestra un dintel que tiene un escudo con la tiara papal y en su interior se encuentra un pequeño patio con una escalera que lleva a la azotea donde es posible apreciar sus garitones. Entre las funciones del Baluarte a lo largo de su historia, se tiene que fue prisión de la Santa Inquisición (siglo XVIII), cuartel militar y depósito de municiones y pólvora (siglo XIX), bodega y Museo de Artesanías (Siglo XX) y actualmente es el Museo de Artes Populares.

Debido a que el Baluarte de San Pedro tenía función de protección contra ataques terrestres no se encontraba directamente influenciado por la brisa marina y los cambios de marea como ocurría, por ejemplo, con aquellas estructuras localizadas frente al mar.

Esta particularidad contribuyó en gran medida, a que a excepción de daños físicos originados por el hombre, los procesos de deterioro de los muros del baluarte fueran condicionados por lentos procesos de degradación natural originados principalmente por agentes físicos del medio ambiente.

Sin embargo, con el paso del tiempo, la expansión urbana de la ciudad hizo necesario la construcción de avenidas, calles y aparcamientos para uso de la creciente flota vehicular de la ciudad. En las zonas aledañas al baluarte de San Pedro confluyen las Avenidas Circuito Baluarte y Gobernadores, y se hallan instalados paraderos de autobuses del Sistema de Transporte Público Municipal.

Estudios realizados por el Gobierno del estado de Campeche estimaron que de 1996 a 2003 la ciudad de San Francisco de Campeche sufrió un incremento promedio del 8 % en el número de unidades vehiculares, sin embargo, tan solo entre 2002 a 2003, este incremento fue del 13 %. Bajo estas condiciones, se esperaba que en 2010 el parque vehicular creciera hasta 69,130 unidades (AGI; AGN). Lo anterior implicaría invariablemente un aumento en los niveles de contaminación atmosférica. La contaminación atmosférica es consecuencia de un incremento en emisiones de origen industrial o vehicular. Gases como ozono ( $O_3$ ), óxidos de carbono (CO,  $CO_2$ ), nitrógeno ( $NO_2$ ,  $NO_3$ ), azufre ( $SO_2$ ) y partículas atmosféricas (PST,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) son comúnmente empleadas como indicadores de la calidad del aire en zonas urbanas. Estos contaminantes pueden originar daños a la salud, cambio en las condiciones ambientales y degradación de materiales. Son también precursores de la lluvia ácida y del deterioro de edificios y monumentos históricos construidos con materiales pétreos (Reyes, 2008; Corvo, 2010).

En zonas urbanas no industrializadas, las emisiones de vehículos automotores generan partículas y gases como los óxidos de azufre y nitrógeno que al contacto con la humedad del medio ambiente producen precipitación ácida, agente altamente corrosivo que disuelve los materiales pétreos de origen calcáreo e inducen la formación de costras de deterioro (Amoroso, 2004; Brimblecombe, 2004; Gaviño, 2004).

Durante su formación, las costras de deterioro pueden incorporar dentro de su matriz mineral partículas de polvo, biomasa y partículas de hollín producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles y que contribuyen a proporcionarles su color característico (Figura 2a y 2b). Las costras negras, además de originar daños estéticos, cambian las propiedades físicas y químicas de la roca o material pétreo sobre el cual se forman, comprometiendo su integridad a largo plazo.

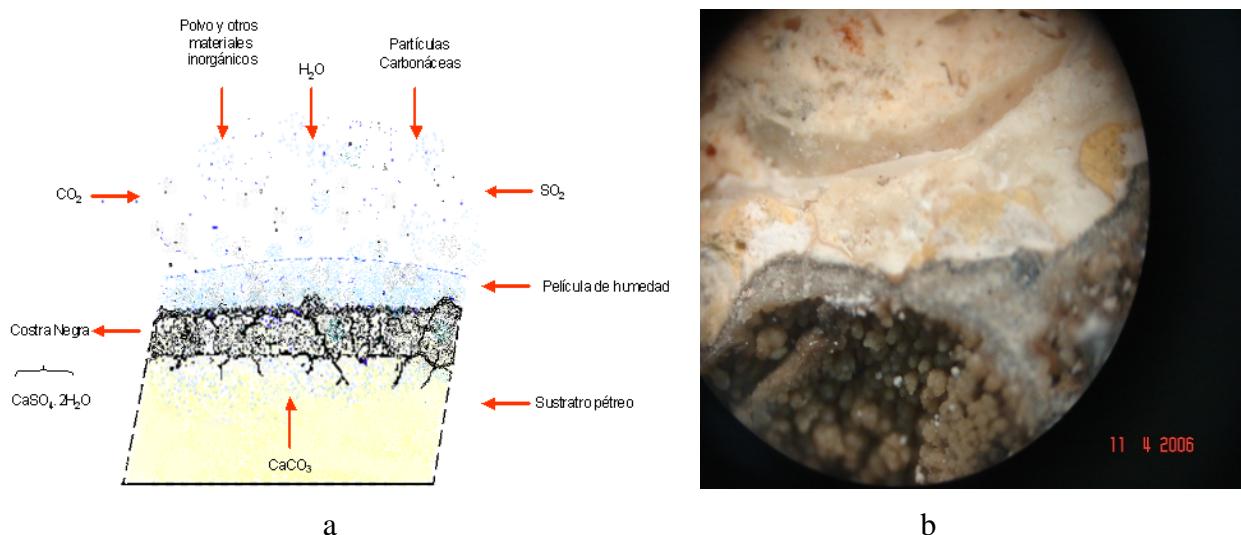


Figura 2. a) Proceso de formación de una costra negra (Reyes, 2004). b) Aspecto microscópico de una costra negra de un edificio histórico de la ciudad de San Francisco de Campeche obtenida mediante microscopía óptica convencional (4X) (Fotografía J. Reyes).

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizó una inspección visual buscando las condiciones óptimas de iluminación y una evaluación macroscópica de las patologías de deterioro observadas en los cinco muros exteriores del Baluarte de San Pedro (Figura 3), considerando aspectos como: coloración, presencia de microorganismos, manchas, pintura, costras visibles, erosión, fracturas, presencia de costras de deterioro entre otros. Durante la inspección visual se realizó un registro fotográfico y se ubicaron aquellas zonas en las cuales se desarrollaban costras negras.

Fragmentos de las costras de los muros oeste, suroeste y sur fueron seleccionados de acuerdo a la presencia de costras negras, por el hecho de que no se tiene antecedente de algún estudio reportado. Se analizaron mediante Difracción de Rayos X (DRX), por el método de polvos, en un difractómetro de Geometría Brag-Bentano (Siemens D5000), empleando radiación monocromática proveniente de la emisión de cobre. Se realizaron pruebas preliminares para definir las condiciones adecuadas de registro y del campo difraccional, seleccionando un tamaño de paso de  $0.02^\circ$  ( $2\Theta$ ) y un campo difraccional de  $2$  a  $60^\circ$ , así como un tiempo de paso de 2 segundos. Para la identificación de las fases minerales presentes en las muestras se empleó la base de datos del ICDD (International Center for Difraction Data).

Apesar de este tipo de tratamento ser conhecido a algumas décadas, pouca informação técnica e científica tem sido publicada sobre este tema. Para preencher pelo menos parte desta lacuna, o trabalho de tese de Medeiros (Medeiros, 2008) abordou esta categoria de tratamento de superfície para concreto.

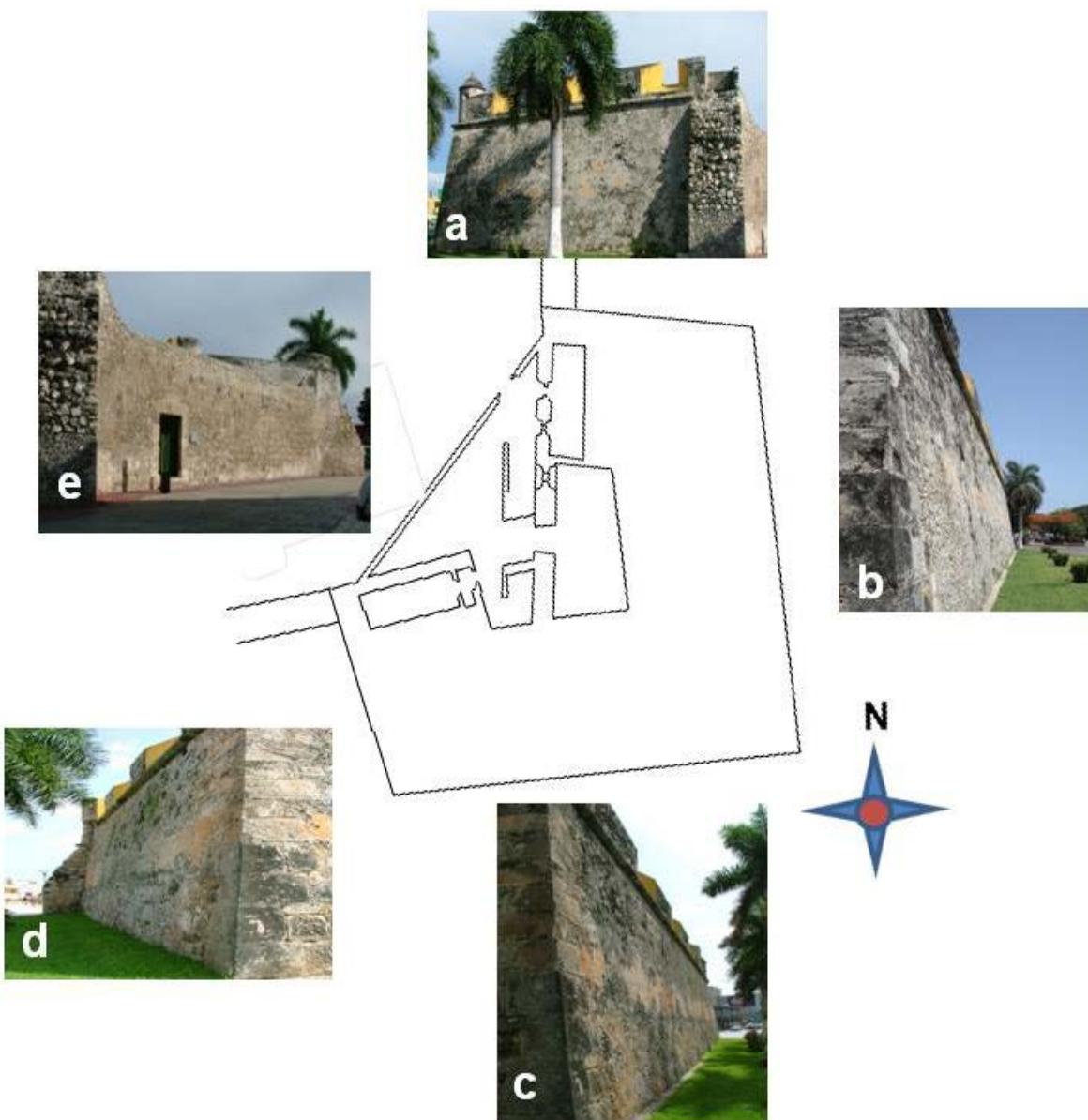


Figura 3. Aspecto general de los cinco muros exteriores del Baluarte de San Pedro. a) Norte, b) este, c) sur, d) suroeste, e) oeste (Fotografías J. Reyes). Al centro, esquema de planta del edificio.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra un listado de las patologías de deterioro observadas en los muros exteriores del baluarte de San Pedro. Por su parte, la Tabla 2 muestra los principales agentes de deterioro ambiental asociados a las patologías observadas.

Tabla 1. Patologías de deterioro observadas en los muros exteriores del Baluarte de San Pedro. (+)observada, (-) no observada.

Patología	Muro				
	Norte	Este	Sur	Suroeste	Oeste
Erosión de canteras y aplanados	+	+	+	+	+
Pérdida general de aplanados	+	+	+	+	+
Formación de cavernas	-	+	-	+	+
Disgregación del mortero de unión	+	+	+	+	+
Arenización de rocas y morteros constituyentes de mampostería	-	-	-	-	+
Desarrollo microbiano en zonas elevadas, libres de mortero, incluyendo roca, e interior de resquicios y cavernas	-	+	+	+	+
Costras negras	-	-	+	+	-
Costras grises	-	+	+	+	-
Costras ocres (asociadas a pigmentos)	-	-	+	-	-
Eflorescencias	-	+	-	+	-
Sangrado de paredes	-	-	+	+	-
Alveolización de aplanados y roca	-	-	-	+	+
Colonización por plantas y animales superiores	-	+	+	+	-
Grafitis	-	-	-	+	-
Basura en jardines	-	-	-	+	-

Tabla 2. Agentes de deterioro ambiental asociados a las patologías observadas en el Baluarte de San Pedro.

Muro	Agente de deterioro
Norte	Ascensión capilar de humedad, Biodeterioro.
Este	Efecto erosivo de viento y precipitación pluvial, ascensión capilar de humedad, contaminación atmosférica, biodeterioro
Sur	Efecto erosivo del viento y de la precipitación pluvial, ascensión capilar de humedad, contaminación atmosférica, biodeterioro, actividad antropogénica
Suroeste	Actividad antropogénica, efecto erosivo del viento y precipitación pluvial, ascensión capilar de humedad, contaminación atmosférica, biodeterioro.
Oeste	Efecto erosivo del viento y precipitación pluvial, biodeterioro.

### 3.1 Muro oeste

El Muro oeste es la cara intramuros del Baluarte de San Pedro. La calle que pasaba por su costado fue cerrada al tráfico de automóviles y actualmente se encuentra peatonalizada (Figura 3a). En estas zonas se observó la pérdida del mortero de unión de la mampostería de roca caliza, la cual mostraba síntomas de erosión, formación de picaduras y cavernas, y en algunos casos el mortero de unión y la roca se encontraban disgregados (Figura 4a). Muestra una pérdida generalizada de aplanados que favorece disgregación del mortero de unión, induciendo la aparición de grietas que en algunos casos forma verdaderas cavernas, dentro de las cuales anidan organismos superiores y que mantienen condiciones de humedad ideales para el desarrollo de colonias microbianas (Figura 4b). En los sitios en que aún se conservan aplanados existen rasgos de alveolizaciones originadas por el viento.

Sobre una altura de aproximadamente 3 metros a partir del piso, se observa una pequeña franja que aún conserva el aplanado, sobre el cual se desarrollan algunas colonias de microorganismos color negro, probablemente líquenes. Estas colonias tienen la propiedad de retener humedad y facilitan su absorción por parte de aplanados y mampostería, lo que induce a su agrietamiento, disgregación y levantamiento. En este muro la acción del viento parece ser el principal agente de deterioro



Figura 4. Muro oeste, a) cavernas b) Pérdida de aplanados con colonización microbiana. (Fotografías J. Reyes).

### 3.2 Muro suroeste

El muro suroeste (Figura 3d), se ubica a escasos metros de dos paraderos de autobuses, localizados ambos sobre la Avenida Circuito Baluarte, de gran afluencia vehicular. En esta área lamentablemente se aprecia cierta falta de limpieza y descuido. El muro conserva buena parte de su aplanado con restos de pigmentos de color naranja, sobre los cuales se pueden observar algunos grafitis.

A diferencia del muro oeste, la acción del viento parece ser la menos importante. Se observó la presencia de colonias microbianas de color negro, así como de musgos, especialmente en el nivel inferior, donde la humedad capilar es mayor y donde al mismo tiempo se acumula el polvo. En esta zona se aprecia pérdida de mortero, lo que deja visible la mampostería. La ascensión de humedad desde el suelo favorece la pérdida de material del muro y en algunas zonas se observan cavernas de considerable extensión, así como resquicios y agrietamientos en los cuales crecen plantas y organismos superiores (Figuras 5a y 5b). La esquina en contacto con la cara sur está construida con bloques de cantera calcárea. Algunos de estos bloques se encuentran erosionados y sobre la totalidad de ellos se desarrollan colonias de microorganismos cuyas biopáginas las cubren parcialmente.



Figura 5. Muro suroeste a) plantas superiores en grieta. b) Nido de hormigas en caverna. c) Costra negra. (Fotografías J. Reyes).

Una particularidad de este muro es la aparición de manchas localizadas, de aspecto oscuro, que se desarrollan principalmente sobre los morteros, aunque en algunos casos también sobre roca desnuda, especialmente en zonas protegidas del viento y de la lluvia (Figura 5c).

Las manchas presentan el aspecto típico de las costras sulfatadas (también conocidas como costras negras), que se originan por la reacción del dióxido de azufre con el material calcáreo para formar yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), producto de neoformación que atrapa dentro de su estructura mineral partículas de hollín y suciedad que le confieren ese aspecto característico (Chertoy, 2004).

En la Figura 6, se presenta un difractograma obtenido mediante DRX de un fragmento de costra negra retirada del baluarte de San Pedro. El análisis permitió identificar como fase mineral mayoritaria la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que es una fase de carbonato de calcio recristalizado, que es el componente principal de la roca sedimentaria original. Sin embargo, la presencia de otras fases como el yeso, mineral sedimentario de origen químico, confirman el impacto que las emisiones de los autobuses del sistema de transporte urbano tienen sobre el muro suroeste del Baluarte de San Pedro.

Así mismo, la presencia de las fases wevelita ( $\text{Ca}_2\text{CaO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) y wedelita ( $\text{Ca}_2\text{CaO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que son oxalatos de calcio indicadoras de actividad microbiana (Escamilla, 2012).

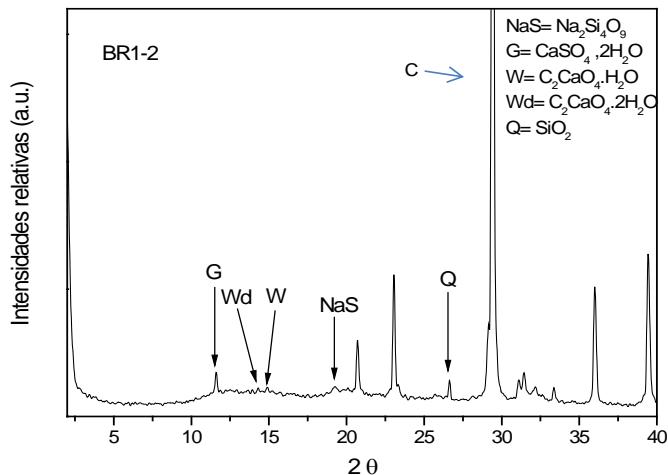


Figura 6. Difractograma obtenido mediante DRX de una muestra de costras negras del muro suroeste del Baluarte de San Pedro. C= Calcita, Q=Silicato, Wd=Wedelita, C=Carbonato de Calcio, W=Wevelita. G= Yeso.

### 3.3 Muro sur

En la Figura 4c, se presenta el aspecto general del muro sur del Baluarte de San Pedro. Este muro resulta ser el que se conserva en mejor estado la mayor parte de su aplanado, mucho del cual presenta restos de pigmentos de color ocre, localizado longitudinalmente en la parte central del muro y que presenta deterioro por picadura.

Este muro muestra importante desarrollo microbiano, especialmente en aquellos bloques de piedra caliza que conforman los vértices sur-suroeste y sureste del edificio. Aquí la presencia de microorganismos se generaliza en la parte inferior del muro y se observa notable crecimiento de plantas superiores y musgos en algunos resquicios. Este muro también se encuentra en contacto con el suelo, lo que favorece la ascensión capilar de humedad.

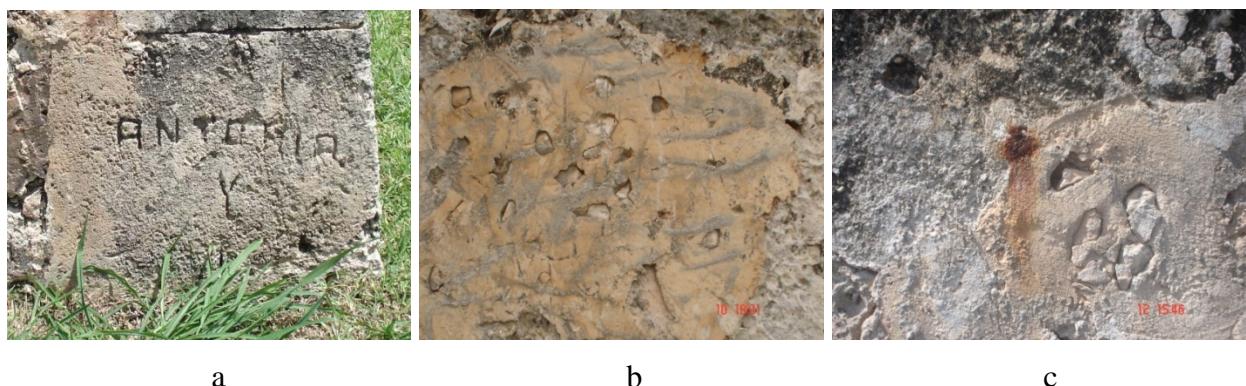


Figura 7. Muro Sur, a) bloque de piedra caliza deteriorado. b) Desarrollo de estrías longitudinales sobre un aplanado del muro sur. C) Lixiviado de color rojizo. (Fotografías J. Reyes).

Esta disponibilidad de humedad, parece ser el factor catalizador para la aparición de un grupo de esflorescencias de color gris, que crecen en forma de estrías longitudinales sobre una franja de aplanado por debajo de los 2 metros de altura (Figura 7b).

En algunas zonas, el aplanado se encuentra levantado, dejando los bloques de piedra que conforman la mampostería en contacto con el medio ambiente, lo que favorece procesos de erosión y disgregación del mortero de unión.

Dentro de esta franja se localizan algunas manchas obscuras con aspecto de costras sulfatadas (similares a las observadas en la cara suroeste), que crecen sobre restos de mortero con pigmento. Al parecer, el pigmento actúa como centro de nucleación de estas costras, actuando como sustrato y favoreciendo su crecimiento. La Figura 8 muestra el difractograma correspondiente. En ella se puede observar la presencia de yeso, wedelita y wevelita, tal y como ocurrió en el muro suroeste. Así mismo, sobre el mortero se observan manchas de lixiviados de color rojizo, característico de materiales pétreos con alto contenido de hierro.

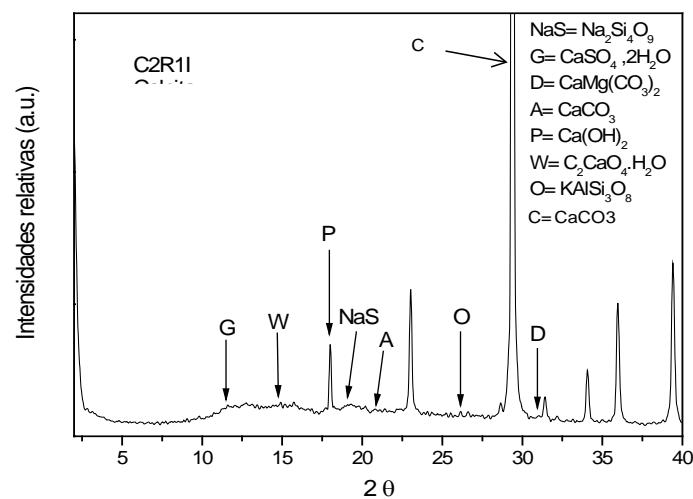


Figura 8. Diffractograma correspondiente a una muestra de costra negra proveniente del muro sur del baluarte de San Pedro C= Calcita, D= Dolomita, G= Yeso, O = silicato de aluminio y potasio, P= Portlandita, Q=Silicato, Wd=Wedelita, W=Wevelita.

### 3.4 Muro este

El muro este conserva la mayor parte de su aplanado (Figura 3b). En él, se pueden observar dos áreas perfectamente definidas, que indican procesos de intervención diferentes. La primera, que va desde el nivel del suelo hasta una altura de aproximadamente dos metros, muestra un mortero con eflorescencias compactas en forma de estrías longitudinales de color gris, similares a aquellas observadas en el muro sur (Figura 9a).

El ascenso capilar de humedad capilar, debido al contacto de la base del muro con el suelo, facilita ciclos de disolución/recristalización de cementantes calizos, cuyas sales se pueden observar en diferentes áreas del muro. Así mismo, la humedad favorece que en zonas libres de aplanado por debajo de dos metros de altura se desarrolle plantas superiores (Figura 9a).



Figura 9. Baluarte de San Pedro, muro este. a) Crecimiento de plantas superiores por debajo de los 2 metros de altura. En la misma zona, sobre mortero se aprecian eflorescencias de color gris en forma de estrías longitudinales. b) mampostería libre de mortero. (Fotografías J. Reyes).

Por arriba de dos metros, el aplanado presenta una franja de mortero que aún conserva pigmento de color ocre, con síntomas de deterioro superficial por picaduras (Figura 9a). Arriba de esta franja se puede apreciar el crecimiento de colonias microbianas de color negro. Estos microorganismos también crecen en las esquinas sureste y noreste del muro, sobre rocas de cantera y zonas aledañas en las cuales el mortero se encuentra erosionado, mostrando en algunas partes la mampostería y creando condiciones ideales para la colonización por microorganismos (Figura 9b).

### 3.5 Muro Norte

La cara norte muestra un importante desarrollo microbiano, que cubre cerca del 40 % de la superficie del muro (Figura 3a). En algunas zonas que incluyen mampostería libre de aplanado y roca desnuda se observa el desarrollo de verdaderos consorcios microbianos que incluyen musgos, líquenes y hongos (Figura 10a). La presencia de una coloración verde por debajo de la superficie de morteros y piedras intemperizadas indica la existencia de colonias de bacterias endolíticas. La mayor parte del pigmento ha desaparecido, sin embargo no se observa una pérdida generalizada del mortero. En las zonas libres de mortero la roca presenta colonización microbiana de tonalidades naranja, roja, blanca y negra (Figura 10b).

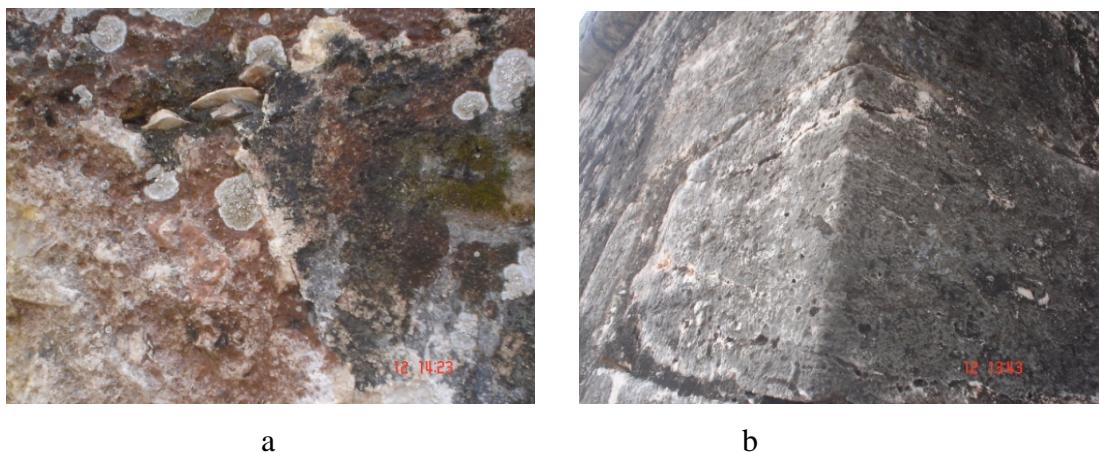


Figura 10. a) Consorcio microbiano presente en el muro norte. b) Colonización microbiana sobre piedra de cantera caliza del vértice noreste del Baluarte de San Pedro. (Fotografías J. Reyes).

El desarrollo de esta enorme diversidad microbiana parece estar relacionada con dos condiciones particulares de este muro: durante la mayor parte de día el muro se encuentra protegido de la acción directa del sol, y, también existe acción capilar de humedad proveniente del suelo. Esto implica que el muro se encuentra con niveles de humedad superiores a los observados en las demás caras del edificio. Esta afecta tanto las mamposterías, como aplanados y piedra de cantera, como aquellas que conforman el vértice noreste, que se encuentra completamente colonizado. (Figuras 10a y 10b).

De hecho el efecto erosivo del viento es poco notable y por el contrario, el mortero de unión de la mampostería se manifiesta húmedo al tacto, es decir el viento no actúa como un agente de desgaste mecánico de abrasión, ni ejerce un efecto importante en el secado superficial, sino que más bien actúa como transporte de partículas antropogénicas y/o aerosoles marinos. Por otra parte en algunas partes el mortero del aplanado se encuentra abombado o despegado y en el espacio existente entre éste y la mampostería se observa el crecimiento de musgos, líquenes y plantas superiores, estas últimas más generalizadas en la parte inferior de muro. No se observa la presencia de costras de deterioro de origen químico ni procesos de recristalización de sales.

La Tabla 3 presenta un resumen de los compuestos encontrados por Difracción de Rayos X en los sitios seleccionados. Se aprecia una distribución en los diferentes muros, así como en las diversas muestras, lo cual permite valorar la importancia del uso de una técnica avanzada como parte del análisis del deterioro de edificaciones consideradas patrimonio cultural histórico.

Tabla 3. Compuestos encontrados en los muros del Baluarte de San Pedro.

Fases minerales	CARAS DEL BALUARTE DE SAN PEDRO							
	Norte	Suroeste				Sur		
		1	2	3	4	5	6	7
Aragonita, $\text{CaCO}_3$	-	-	-	-	-	-	+	-
Calcita, $\text{CaCO}_3$	+	+	+	+	+	+	+	+
Caolinita, $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	-	-	-	+	-	+	-	-
Cristobalita, $\text{SiO}_2$	-	-	-	-	-	+	-	-
Cuarzo, $\text{SiO}_2$	+	-	+	-	+	+	-	+
Dolomita, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	-	-	-	+	-	+	+	-
Goethita, $\text{FeO}(\text{OH})$	-	-	-	+	-	-	-	-
$\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	-	-	-	+	-	-	-	-
Halite, $\text{NaCl}$	+	-	-	-	-	-	-	-
Hidroxilapatito, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$	-	-	+	-	+	-	-	-
Illita, $\text{K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	+	-	-
Ortoclasa, $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	-	-	+	-	-	-	+	-
Portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	-	-	-	-	-	-	+	-
Silicato de sodio, $\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9$	-	-	-	+	-	+	+	+
Weddellita, $\text{C}_2\text{CaO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	+	+	-	+
Whewellita, $\text{C}_2\text{CaO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	+	+	+
Yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-	-	+	-	+	-	+	+

En cuanto a la agresividad del medio marino tropical, se hace la observación que la ciudad de Campeche se localiza en la parte del Golfo de México en la Península de Yucatán. Su posición geográfica es particular, porque los vientos dominantes provienen del Este y Noreste la mayor parte del año, lo que implica que van de tierra a mar y la salinidad que depositan sobre los edificios no es tan alta (Gutiérrez, 1996) como sería de esperar en una ciudad costera. También es de considerar que el Baluarte de San Pedro se ubica aproximadamente a 600 m de la línea de costa, por lo que la concentración salina es reducida por la barrera de edificios del centro histórico. Este efecto de pantalla ya ha sido reportado, haciendo notar la diferencia de concentración de cloruro con respecto a la línea de costa (Castro, 1995; Castañeda).

## 4. CONCLUSIONES

El Baluarte de San Pedro es un monumento representativo de las construcciones militares de la época colonial en la ciudad de San Francisco de Campeche, México y en la actualidad se encuentra sometido a una enorme presión ambiental que induce su deterioro. Campeche es una de las nueve ciudades coloniales mexicanas incluidas en la lista de Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO, desde 1999. Se presenta un trabajo pionero de patología de edificaciones para el Centro Histórico de la ciudad de Campeche, por lo que esta etapa es un diagnóstico inicial.

Los procesos de degradación natural predominantes en el baluarte son acción eólica que origina erosión y desgaste, así como el biodeterioro. Este último de especial importancia en el muro Norte, donde las condiciones de humedad, radiación solar y temperatura facilitan la actividad microbiana, cuyos componentes colonizan gran parte del muro.

La aplicación de Difracción de Rayos X fue determinante en la caracterización de los compuestos formados sobre los muros, lo que permite aproximar el origen y desarrollo de las costras negras. La presencia de yeso en las costras de deterioro de las caras suroeste y sur indican, que las emisiones de los vehículos automotores que circulan diariamente por la Avenida Circuito Baluartes y el paradero de autobuses ubicado en las cercanías del muro suroeste aceleran la degradación de los componentes primarios del edificio induciendo la aparición de costras negras. Resulta conveniente e inmediato considerar medidas de mitigación para el control de las emisiones urbanas así como el desarrollo de estrategias de prevención con el fin de controlar los factores que inducen el desarrollo de microorganismos que originan biodeterioro.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento del proyecto FOMIX CAMP-CO-05, “Influencia del entorno urbanos en los procesos de degradación de edificios militares y religiosos de la época colonial en la ciudad de Campeche. Así mismo, se agradece el apoyo prestado por el M. en C. Daniel Aguilar durante el análisis mediante DRX. Este trabajo se realizó en el marco de la Red PROMEP Para la Conservación de Materiales de Interés Histórico y Artístico.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- AGI , AGS/Secretaría\_Guerra, 7237, EXP. 307/1/1 RECTO  
AGN, R. Rios y Acequías V.1, EXP. 7-BIS, FS, 111-119  
Amoroso, G., Fassina, V. (1983), *Stone decay and conservation*, (Amsterdam, Holland, Elsevier).  
Brimblecombe P., Grossi C. M. (2004), *The rate of darkening of material surface. Air Pollution and Cultural Heritage*. Saiz-Jimenez ed.: pp 193-198.  
Castañeda A., Corvo F., Howland J. J. and Pérez T., *Corrosion of steel reinforced concrete in tropical coastal atmosphere of Havana City*, Química Nova, In Press.  
Castro P. (1995), *Difusión y corrosión por iones cloruro en concreto reforzado*. Tesis doctoral, Facultad de Química, UNAM.  
Chertov, O., A. Gorbushina, et al. (2004), *A model for microcolonial fungi growing on rock surfaces*. Ecological Modelling 177: pp 415-426.

- Corvo F., Reyes J., Valdes C., Villaseñor F., Cuesta O., Aguilar D. and Quintana P. (2010), *Influence of Air Pollution and Humidity on Limestone Materials Degradation in Historical Buildings Located in Cities Under Tropical Coastal Climates*, Water, Air & Soil Pollution **205** 1-4: pp. 359-375.
- Escamilla R. G., Reyes J., Pérez-López T., Monteón V. (2012), López-Alcántara R.. *Identification of Microorganisms Associated to the Biodegradation of Historic Masonry Structure in San Francisco de Campeche City, México*, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1374 2012 Materials Research Society.
- Gaviño M. (2004), *Alteración cromática de monumentos tras la limpieza con láser. Origen, Naturaleza y eliminación del amarillamiento de las piedras*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Gutiérrez G. and Winant C. D. (1996), *Seasonal patterns of winds stress and wind stress curl over the Gulf of Mexico*. Journal of Geophysical Research, **101**, 8: pp. 127.
- Reyes J. (2004), *Criterios diagnósticos para la identificación de componentes orgánicos en materia particulada procedente del tráfico automovilístico y su aplicación al estudio del deterioro de la Catedral de Sevilla*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Reyes J., Gutiérrez G., Centeno G., Treviño D., Bartolo P., Quintana P., Azamar J. A., Pérez T. (2008), *Chemical characterization of crusts formed in mortars of historical buildings in San Francisco de Campeche City, Mexico*. First Historical Mortar Conference. Lisbon, Portugal.